

การออกแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงด้วยเลเซอร์ที่มีมอดูเลเตอร์ชนิดคูคลินไฟฟ้าอยู่ภายใน  
ด้วยอัตราข้อมูล 2.5 กิกะบิตต่อวินาที  
สำหรับงานประยุกต์ทางด้านการรับส่งสัญญาณแสงหลายความยาวคลื่น



นางสาวพลลธร ศรีจำ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A DESIGN OF 2.5 GB/S ELECTRO-ABSORPTION MODULATOR  
INTEGRATED LASER TRANSMITTER  
IN WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING APPLICATIONS

Miss Palatorn Sricham

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงด้วยเลเซอร์ที่มีมอดูเลเตอร์ชนิด  
คูคกิ้นคลื่นไฟฟ้าอยู่ในตัว ด้วยอัตราข้อมูล 2.5 กิกะบิตต่อวินาที  
สำหรับงานประยุกต์ทางด้านการรับส่งสัญญาณแสงหลายความยาว  
คลื่น

โดย

นางสาวพลลาร ศรีจ๋า


สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

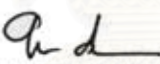
อาจารย์ที่ปรึกษา

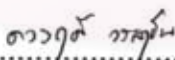
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดวงฤดี วรสุชีพ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้แก่นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศศิริวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดวงฤดี วรสุชีพ)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.ศรัณย์ สัมฤทธิ์เดชขจร)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันเฉลิม โปรา)

พลารร ศรีจำ : การออกแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงด้วยเลเซอร์ที่มีมอดูเลเตอร์ชนิดดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า  
 อยู่ใน ด้วยอัตราข้อมูล 2.5 กิกะบิตต่อวินาที สำหรับงานประยุกต์ทางด้าน การรับส่งสัญญาณแสง  
 หลายความยาวคลื่น. (A DESIGN OF 2.5 GB/S ELECTRO-ABSORPTION MODULATOR  
 INTEGRATED LASER TRANSMITTER IN WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING  
 APPLICATIONS) อ.ที่ปรึกษา : ผศ. ดร.ดวงฤดี วรสุชีพ, 111 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้ นำเสนอรายละเอียดการออกแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงด้วยเลเซอร์ที่มีมอดูเลเตอร์ชนิด  
 ดกกลืนคลื่นไฟฟ้าอยู่ใน (Electro-Absorption Modulator Integrated Laser, EML) ที่อัตราข้อมูล 2.5 Gb/s  
 ะการรับส่งสัญญาณในระบบการรับส่งสัญญาณหลายความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing,  
 /DM) พร้อมแสดงผลการทดลอง WDM ผ่านเส้นใยนำแสงโหมดเดียวชนิดมาตรฐานระยะทาง 50 km จากการ  
 ดลองวัดค่าอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate, BER) ได้ต่ำกว่า  $10^{-9}$  และค่า Power Penalty อยู่ภายใต้  
 ัจจำกัดของมาตรฐาน ITU-T G.692.

## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
 ษาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
 ารศึกษา 2550

ลายมือชื่อนิสิต..... พลารร ศรีจำ  
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... ดวงฤดี วรสุชีพ

## 4970460421 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: OPTICAL TRANSMITTER / ELECTRO-ABSORPTION MODULATOR / ELECTRO-ABSORPTION MODULATOR INTEGRATED LASER / INTENSITY MODULATION / WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING

MISS PALATORN SRICHAM : A DESIGN OF 2.5 GB/S ELECTRO-ABSORPTION MODULATOR INTEGRATED LASER TRANSMITTER IN WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING APPLICATIONS. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. DUANG-RUDEE WORASUCHEEP, Ph.D., 111 pp.

This thesis presents a design of a 2.5 Gb/s electro-absorption modulator integrated laser (EML) transmitter for the wavelength division multiplexing (WDM) system. The experimental results of multi-channel data transmission over 50-km standard single mode fiber (SSMF) show that its bit error rate (BER) well below  $10^{-9}$  and its power penalty is under the ITU-T G.692 standard limit.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Electrical Engineering

Field of study Electrical Engineering

Academic year 2007

Student's signature.....

Advisor's signature.....

*Palatorn Sricham*  
*Dual Waly*

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีได้ ต้องขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงสำหรับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดวงฤดี วรรณชีพ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านให้ความกรุณาให้คำปรึกษา เสนอแนะให้ข้อคิดตลอดเวลา ทั้งที่เกี่ยวกับงานวิจัยและเกี่ยวกับหลักในการดำเนินชีวิต อีกทั้งส่งเสริมให้มีแรงกระตุ้นและกำลังใจในการทำวิจัยด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณอาจารย์ทุกๆ ท่านที่ได้ให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยนี้ ซึ่งช่วยให้ผู้ทำวิจัยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในการวิจัยได้อย่างลุล่วง

ขอขอบคุณโครงการวิจัยร่วมเสริมสร้างความเชื่อมโยงระหว่างภาควิชาไฟฟ้าและภาคเอกชนทางด้านการวิจัยและพัฒนา สำหรับทุนสนับสนุนการวิจัยและจัดซื้อครุภัณฑ์สำคัญต่างๆ ในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณบริษัทไทยไฟเบอร์ออปติก จำกัด และบริษัท OFS (Denmark) ที่บริจาคเส้นใยนำแสงโหมดเดียวชนิดมาตรฐานและชนิด Truewave-RS ชนิดละ 50 กิโลเมตร

ขอขอบคุณหน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีโฟโตนิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ที่อนุญาตให้ใช้อุปกรณ์ Fusion Splice

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกคนรอบตัวผู้วิจัย ไม่ว่าจะป็นภายในและภายนอกห้องปฏิบัติการวิจัย สำหรับความช่วยเหลือ คำแนะนำ กำลังใจในการทำวิจัยตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัวของผู้ทำวิจัย สำหรับความรักและกำลังใจที่มีค่าทำให้วิทยานิพนธ์เสร็จสิ้นได้ในที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
ดัชนีคำศัพท์.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	3
1.3 เป้าหมายและขอบเขตของการวิจัย .....	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย .....	4
1.6 ประมวลวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง .....	6
2.1 องค์ประกอบของตัวส่งสัญญาณทางแสง (Optical Transmitter Components).....	6
2.1.1 แหล่งกำเนิดแสง (Optical Source) .....	7
2.1.2 ตัวขยายสัญญาณเพื่อขับตัวมอดูเลเตอร์ (Modulator Driver Amplifier) .....	10
2.1.3 ตัวมอดูเลเตอร์ทางแสง (Optical Modulator) .....	10
2.2 วิธีการมอดูเลตทางความเข้มแสง.....	11
2.2.1 การมอดูเลตโดยตรง (Direct Modulation) .....	11
2.2.2 การมอดูเลตด้วยวิธีดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า (Electro-Absorption Modulation) .....	13
2.2.3 การมอดูเลตภายนอก (External Modulation) .....	15
2.3 การรับส่งสัญญาณแสงหลายความยาวคลื่น.....	16
2.3.1 องค์ประกอบของระบบการรับส่งสัญญาณแสงหลายความยาวคลื่น .....	16
2.4 การควบคุมอุณหภูมิของเลเซอร์.....	18
2.4.1 อุปกรณ์ที่ช่วยในการควบคุมอุณหภูมิเลเซอร์ .....	18
2.4.2 วงจรป้อนกลับที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิเลเซอร์.....	21
2.5 การผิดเพี้ยนของสัญญาณเมื่อผ่านเส้นใยนำแสง.....	22

2.5.1 การลดทอน (Attenuation).....	22
2.5.2 การกระจายโครมาติก (Chromatic dispersion) .....	23
บทที่ 3 การออกแบบวงจร .....	26
3.1 ตัวขับมอดูเลเตอร์ชนิดดัดคลื่นไฟฟ้า.....	26
3.2 ตัวควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) .....	28
3.3 ตัวควบคุมกระแส (Current Controller) .....	29
3.4 ตัวเลเซอร์ที่มีตัวมอดูเลเตอร์ดัดคลื่นไฟฟ้าอยู่ภายใน (EML) .....	30
บทที่ 4 การออกแบบลายวงจรตัวส่งสัญญาณทางแสง .....	33
4.1 ขั้นตอนและเทคนิคในการออกแบบลายวงจรความถี่สูง.....	33
4.1.1 เลือกว่าัดดู.....	33
4.1.2 การออกแบบสายส่ง.....	36
4.1.3 การวางเส้นทาง (Routing).....	40
4.2 การออกแบบลายวงจรของตัวส่งสัญญาณทางแสง .....	43
4.2.1 ลายวงจรขับ EAM.....	44
4.2.2 ลายวงจร EML Mount .....	47
4.2.3 ลายวงจรควบคุมกระแส .....	47
4.2.4 ลายวงจรเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ .....	48
บทที่ 5 ระบบการรับส่งสัญญาณหลายความยาวคลื่นแสง .....	49
5.1 ภาคส่งสัญญาณ.....	49
5.1.1 ระบบ WDM 3 ช่องสัญญาณที่ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 100 GHz.....	49
5.1.2 ระบบ WDM 2 ช่องสัญญาณเพื่อปรับระยะห่างช่องสัญญาณ.....	51
5.2 ตัวกลางในการรับส่งสัญญาณ.....	52
5.2.1 เส้นใยนำแสงชนิด SSMF 50 km.....	52
5.2.2 เส้นใยนำแสงชนิด Truwave-RS 50 km .....	53
5.3 ภาครับสัญญาณแสง.....	54
5.3.1 Fiber Bragg Grating (FBG).....	55
5.3.2 Optical Circulator .....	55
5.3.3 ตัวรับสัญญาณทางแสงชนิด Avalanche (Avalanche Photo Diode, APD) .....	56
บทที่ 6 ผลการวัดประสิทธิภาพของตัวส่งสัญญาณทางแสงผ่านระบบการรับส่งสัญญาณหลายความยาวคลื่น.....	58
6.1 คุณลักษณะของ EML.....	58



6.1.1 คุณลักษณะแสงต่อเนื่องของ EML.....	58
6.1.2 คุณลักษณะของ EML กรณีที่มีการมอดูเลตด้วยวิธีดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า.....	60
6.2 การเชื่อมต่อบอร์ดประเมินเพื่อทดลองส่งสัญญาณทางแสง .....	61
6.3 ประสิทธิภาพของตัวส่งสัญญาณทางแสงต้นแบบ .....	62
6.3.1 แผนภาพรูปตาของแสงขาออก .....	64
6.3.2 สเปกตรัมของแสงขาออก.....	67
6.3.3 การควบคุมความยาวคลื่นของเลเซอร์ด้วยตัวควบคุมอุณหภูมิ.....	68
6.3.4 การส่ายของสัญญาณ (Jitter) .....	70
6.3.5 พลังงานที่บอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสงใช้ (Power consumption) .....	71
6.4 การทดสอบรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสงชนิดต่างๆ.....	71
6.4.1 การป้อนกลับ (Loop back) .....	71
6.4.2 ผ่านเส้นใยนำแสงชนิด SSMF 50 km .....	72
6.4.3 ผ่านเส้นใยนำแสงชนิด Truwave-RS 50 km .....	73
6.5 การทดสอบระบบ WDM .....	76
6.5.1 ผลการทดลองภาคส่งสัญญาณ.....	76
6.5.2 ผลการทดลองภาครับสัญญาณ.....	78
6.6 การปรับระยะระหว่างช่องสัญญาณ (Channel spacing).....	84
6.6.1 ผลการทดลองภาคส่งสัญญาณ.....	84
6.6.2 ผลการทดลองภาครับสัญญาณ.....	87
6.6.3 Power Penalty .....	96
บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ .....	97
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	97
7.2 ข้อเสนอแนะ .....	98
รายการอ้างอิง.....	100
ภาคผนวก.....	103
ภาคผนวก ก. บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่.....	104
ภาคผนวก ข. Schematic ของวงจรตัวส่งสัญญาณทางแสง .....	109
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	111

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่ได้ิเล็กตริกและ loss tangent ของวัสดุไดิเล็กตริก .....	34
ตารางที่ 4.2 ค่าความหนาของทองแดง .....	36



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 1.1 องค์ประกอบพื้นฐานของระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง .....	2
รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของตัวส่งสัญญาณทางแสง .....	6
รูปที่ 2.2 สเปกตรัมของแสงที่ออกมาจาก Fabry–Perot Laser .....	8
รูปที่ 2.3 สเปกตรัมของแสงที่ออกมาจาก Distributed Feedback Laser .....	9
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วเลเซอร์กับกำลังแสงขาออกกับอุณหภูมิ .....	9
รูปที่ 2.5 หลักการทำงานของตัวมอดูเลเตอร์ทางแสง .....	11
รูปที่ 2.6 หลักการมอดูเลตโดยตรง .....	12
รูปที่ 2.7 โครงสร้าง DFB เลเซอร์ที่มีมอดูเลเตอร์ชนิดคูกลิ้นคลื่นไฟฟ้ารวมอยู่ด้วย .....	13
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงขาออก (dB) กับแรงดันไบแอส (V) .....	14
รูปที่ 2.9 โครงสร้างของ Mach–Zehnder Interferometer Modulator .....	15
รูปที่ 2.10 การรับส่งสัญญาณแสงหลายความยาวคลื่นบนเส้นใยนำแสง .....	17
รูปที่ 2.11 คู่ต่อสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการดูดหรือคายความร้อน .....	19
รูปที่ 2.12 คู่ต่อ TEC [19] .....	19
รูปที่ 2.13 ประสิทธิภาพในการปั๊มพลังงานความร้อนต่อกระแสขั้ว .....	20
รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานและอุณหภูมิของ Thermistor .....	21
รูปที่ 2.15 วงจรป้อนกลับในการควบคุมอุณหภูมิของเลเซอร์ .....	22
รูปที่ 2.16 การขยายกว้างออกของพัลส์แสงเนื่องจากการกระจายเชิงวัสดุ .....	23
รูปที่ 2.17 การขยายกว้างออกของพัลส์แสงเนื่องจากการกระจายท่อนำคลื่น .....	24
รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงส่วนประกอบตัวส่งสัญญาณทางแสง .....	26
รูปที่ 3.2 บอร์ดวงจร EAM Driver Evaluation Board ของบริษัท MAXIM .....	27
รูปที่ 3.3 แผนภาพวงจรภายในของตัวขับ EAM ที่ใช้ในการทดลอง .....	27
รูปที่ 3.4 ตัวควบคุมอุณหภูมิ โมดูล LDT–5100 ของบริษัท ILX Lighthwave .....	28
รูปที่ 3.5 ตัวควบคุมกระแส โมดูล LDX–3100 ของบริษัท ILX Lighthwave .....	30
รูปที่ 3.6 EML และ Laser Mount ที่ใช้ในการทดลอง .....	31
รูปที่ 3.7 การเชื่อมต่ออุปกรณ์เพื่อส่งสัญญาณทางแสง 2.5 Gb/s .....	31
รูปที่ 4.1 ค่าไดอิเล็กตริกขึ้นกับอุณหภูมิ .....	34
รูปที่ 4.2 ค่าไดอิเล็กตริกขึ้นกับความถี่ .....	35

รูปที่ 4.3 การลดทอนของสัญญาณในวัสดุแต่ละชนิด .....	35
รูปที่ 4.4 คุณลักษณะการประมาณค่าอิมพีแดนซ์ของ microstrip line .....	37
รูปที่ 4.5 ค่าอิมพีแดนซ์ของ Microstrip เมื่อมีการเปลี่ยนความกว้างของสายส่ง (W) .....	37
รูปที่ 4.6 ค่าอิมพีแดนซ์ของ Microstrip เมื่อมีการเปลี่ยนความสูงของไดอิเล็กตริก (H) .....	38
รูปที่ 4.7 ค่าอิมพีแดนซ์ของ Microstrip เมื่อมีการเปลี่ยนความหนาของทองแดง (T) .....	38
รูปที่ 4.8 คุณลักษณะการประมาณค่าอิมพีแดนซ์ของ stripline .....	39
รูปที่ 4.9 Propagation delay ของสายส่งเมื่อเปลี่ยนค่าคงที่ไดอิเล็กตริก.....	39
รูปที่ 4.10 ภาพตัดขวางของสายวงจร Single-ended .....	40
รูปที่ 4.11 สัญญาณ Differential .....	41
รูปที่ 4.12 ความยาวของสัญญาณ Differential ไม่เท่ากัน ทำให้เกิดการเหลื่อมกันของ สัญญาณ.....	41
รูปที่ 4.13 สายวงจรของสัญญาณ Differential ที่ไม่ต่อเนื่อง ไม่จำเป็นต้องทำให้วงจรสมมูล .....	42
รูปที่ 4.14 ปัญหาที่เกิดจากระดับสัญญาณขาเข้าสูงเกินกว่าขีดจำกัด .....	42
รูปที่ 4.15 การเชื่อมต่อตัวส่งสัญญาณทางแสงชนิด EML ที่ออกแบบ .....	43
รูปที่ 4.16 PCB stackup.....	44
รูปที่ 4.17 สายวงจรตัวส่งสัญญาณทางแสงความเร็ว 2.5 Gb/s .....	44
รูปที่ 4.18 สายวงจรตัวขับ EAM.....	45
รูปที่ 4.19 สายวงจร EML Mount.....	47
รูปที่ 4.20 สายวงจรควบคุมกระแส.....	47
รูปที่ 4.21 วงจรควบคุมกำลังแสงของเลเซอร์.....	48
รูปที่ 4.22 สายวงจรเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ.....	48
รูปที่ 5.1 ลักษณะของตัวคู่ต่อสัญญาณทางแสง.....	50
รูปที่ 5.2 การรวมสัญญาณแสงสามความยาวคลื่นด้วยตัวคู่ต่อสัญญาณสองตัว.....	50
รูปที่ 5.3 การเชื่อมต่อภาคส่งสัญญาณเพื่อทดลองระบบ WDM.....	51
รูปที่ 5.4 การเชื่อมต่อระบบ WDM 2 ช่องสัญญาณ.....	52
รูปที่ 5.5 การเชื่อมต่อเส้นใยนำแสงชนิด SSMF ระยะทาง 50 km.....	53
รูปที่ 5.6 ผลการทดสอบเส้นใยนำแสงชนิด SSMF 50 km ด้วย OTDR.....	53
รูปที่ 5.7 การเชื่อมต่อเส้นใยนำแสงชนิด Truwave-RS ระยะทาง 50 km .....	54
รูปที่ 5.8 ผลการทดสอบเส้นใยนำแสงชนิด Truwave-RS 50 km ด้วย OTDR .....	54
รูปที่ 5.9 การเชื่อมต่อภาครับสัญญาณเพื่อทดลองระบบ WDM .....	54

รูปที่ 5.10 Fiber Bragg Grating ที่ใช้ในการทดลองระบบ WDM .....	55
รูปที่ 5.11 Optical Circulator ที่ใช้ในการทดลองระบบ WDM .....	56
รูปที่ 5.12 APD โมเดล R195A ที่ใช้ในการรับสัญญาณข้อมูลทางแสง (บริษัทCyoptics).....	57
รูปที่ 5.13 บอร์ดตัวรับสัญญาณข้อมูลทางแสง .....	57
รูปที่ 6.1 คุณลักษณะของ DFB ภายใน EML ระหว่างกำลังแสงขาออกกับกระแสขับเลเซอร์ .....	59
รูปที่ 6.2 สเปกตรัมของแสงขาออกของตัวเลเซอร์.....	59
รูปที่ 6.3 คุณลักษณะของ EAM ระหว่างกำลังแสงขาออกกับแรงดันไบแอสที่พอร์ต RF .....	60
รูปที่ 6.4 การเชื่อมต่อบอร์ดประเมินของชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่างๆ ของตัวส่งสัญญาณทางแสง .....	61
รูปที่ 6.5 สัญญาณข้อมูลขาเข้า ระดับสัญญาณ CML.....	61
รูปที่ 6.6 (ก)สัญญาณข้อมูลไฟฟ้าขาเข้าเลเซอร์ (ข) สัญญาณข้อมูลทางแสงขาออก .....	62
รูปที่ 6.7 ตัวส่งสัญญาณแสงต้นแบบ .....	62
รูปที่ 6.8 การเชื่อมต่อตัวส่งสัญญาณทางแสง.....	63
รูปที่ 6.9 แผนภาพรูปตาของสัญญาณแสงขาออกเมื่อคงค่าแรงดันมอดูเลตและปรับแรงดันไบแอส.....	64
รูปที่ 6.10 ระดับสัญญาณแสงเมื่อปรับระดับแรงดันไบแอส.....	65
รูปที่ 6.11 แผนภาพรูปตาของสัญญาณขาออกเมื่อคงค่าแรงดันไบแอสและปรับแรงดันมอดูเลต .....	65
รูปที่ 6.12 ระดับสัญญาณแสงเมื่อปรับระดับแรงดันมอดูเลต .....	66
รูปที่ 6.13 แผนภาพรูปตาของสัญญาณขาออกของตัวส่งสัญญาณทางแสงต้นแบบ 2.5 Gb/s.....	67
รูปที่ 6.14 สเปกตรัมทางแสงของสัญญาณทางแสงขาออกของตัวส่งสัญญาณต้นแบบ.....	68
รูปที่ 6.15 ผลการปรับจูนความยาวคลื่นของเลเซอร์ด้วยตัวควบคุมอุณหภูมิ.....	69
รูปที่ 6.16 สเปกตรัมสัญญาณทางแสงขาออกจากตัวส่งสัญญาณทางแสง .....	70
รูปที่ 6.17 วัด jitter ด้วยวิธี Histogram .....	70
รูปที่ 6.18 แผนภาพรูปตาสัญญาณทางไฟฟ้าขาออกจาก APD+TIA .....	72
รูปที่ 6.19 สัญญาณแสงขาออกจาก SSMF 50 km .....	72
รูปที่ 6.20 สัญญาณทางไฟฟ้าขาออกจาก APD+TIA (กรณีแสงผ่าน SSMF 50 km) .....	73
รูปที่ 6.21 สัญญาณแสงขาออกจาก Truwave-RS 50 km .....	74
รูปที่ 6.22 สัญญาณทางไฟฟ้าขาออกจาก APD+TIA (กรณีแสงผ่าน Truwave-RS 50 km).....	74

รูปที่ 6.23 อัตราผิดพลาดบิต 3 กรณี (1) Loop back (2) ผ่าน SSMF 50 km และ (3) ผ่าน Truewave-RS 50 km .....	75
รูปที่ 6.24 (ก) ภาคส่งสัญญาณของระบบ WDM (ข) ภาครับสัญญาณของระบบ WDM .....	76
รูปที่ 6.25 สเปกตรัมการรวมกันของสัญญาณแสงสองช่องสัญญาณ .....	77
รูปที่ 6.26 สเปกตรัมการรวมกันของสัญญาณแสงสามช่องสัญญาณ .....	77
รูปที่ 6.27 สัญญาณทางแสงขาออกพอร์ตที่ 3 ของตัว Circulator .....	78
รูปที่ 6.28 สัญญาณทางแสงขาออกของตัว FBG .....	79
รูปที่ 6.29 แผนภาพรูปตาของสัญญาณขาออกจากตัว APD+TIA (โดยมีค่าลดทอน 6 dB) .....	80
รูปที่ 6.30 ผลการวัด BER ต่อกำลังแสงที่ตัวรับสัญญาณทางแสงรับได้ในสองกรณี .....	81
รูปที่ 6.31 สัญญาณไฟฟ้าขาออกจาก SSMF 50 km ในระบบ WDM 100 GHz .....	81
รูปที่ 6.32 อัตราผิดพลาดบิตผ่านเส้นใยนำแสงในระบบ WDM 100 GHz .....	82
รูปที่ 6.33 สัญญาณไฟฟ้าขาออกจาก Truewave-RS 50 km ในระบบ WDM 100 GHz .....	83
รูปที่ 6.34 อัตราผิดพลาดบิตผ่านเส้นใยนำแสงในระบบ WDM 100 GHz .....	83
รูปที่ 6.35 (ก) ภาคส่งสัญญาณ (ข) ภาครับสัญญาณในระบบ WDM 2 ช่องสัญญาณ .....	84
รูปที่ 6.36 สเปกตรัมของแสงขาออกในระบบ WDM ที่ channel spacing 100 GHz .....	85
รูปที่ 6.37 สัญญาณแสงขาออก ในระบบ WDM ที่มี channel spacing 100 GHz .....	85
รูปที่ 6.38 สเปกตรัมของแสงขาออกในระบบ WDM ที่มี channel spacing 50 GHz .....	86
รูปที่ 6.39 สัญญาณแสงขาออก ในระบบ WDM ที่มี channel spacing 50 GHz .....	86
รูปที่ 6.40 สเปกตรัมสัญญาณขาออกจาก FBG ในระบบ WDM ที่มี channel spacing 100 GHz .....	87
รูปที่ 6.41 สเปกตรัมสัญญาณความยาวคลื่นที่ 2 หลังดีมัลติเพลกซ์ ในระบบ WDM ที่มี channel spacing 100 GHz .....	88
รูปที่ 6.42 สัญญาณไฟฟ้าขาออกหลังการดีมัลติเพลกซ์ ใน WDM channel spacing 100 GHz .....	88
รูปที่ 6.43 สเปกตรัมสัญญาณขาออกจาก FBG ในระบบ WDM ที่มี channel spacing 50 GHz .....	89
รูปที่ 6.44 สเปกตรัมสัญญาณความยาวคลื่นที่ 2 หลังดีมัลติเพลกซ์ ในระบบ WDM ที่มี channel spacing 50 GHz .....	90
รูปที่ 6.45 สัญญาณไฟฟ้าขาออกหลังการดีมัลติเพลกซ์ ใน WDM channel spacing 50 GHz .....	90

รูปที่ 6.46 อัตราผิดพลาดบิตกรณีผ่านระบบ WDM channel spacing 100 GHz และ 50 GHz..... 91

รูปที่ 6.47 สัญญาณไฟฟ้าขาออกจากเส้นใยนำแสง SSMF 50 km ในระบบ WDM 100 GHz..... 92

รูปที่ 6.48 สัญญาณไฟฟ้าขาออกจากเส้นใยนำแสง Truewave-RS 50 km ใน WDM 100 GHz..... 92

รูปที่ 6.49 อัตราผิดพลาดบิตผ่านเส้นใยนำแสงในระบบ WDM 100 GHz ..... 93

รูปที่ 6.50 สัญญาณไฟฟ้าขาออกจากเส้นใยนำแสง SSMF 50 km ในระบบ WDM 50 GHz..... 94

รูปที่ 6.51 สัญญาณไฟฟ้าขาออกจากเส้นใยนำแสง Truewave-RS 50 km ใน WDM 50 GHz..... 95

รูปที่ 6.52 อัตราผิดพลาดบิตผ่านเส้นใยนำแสงในระบบ WDM 50 GHz ..... 95

รูปที่ 6.53 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณและค่า Power penalty ผ่านเส้นใยนำแสงชนิด SSMF และ Truewave-RS ระยะทาง 50 km..... 96

## ดัชนีคำศัพท์

Absorption	การดูดกลืน
Attenuation	การลดทอน
Avalanche Photo Diode, APD	ตัวตรวจจับสัญญาณทางแสงชนิด Avalanche
Bit Error Rate Tester, BERT	การทดสอบอัตราผิดพลาดบิต
Bit Error Rate, BER	อัตราผิดพลาดบิต
Channel Spacing	ระยะระหว่างช่องสัญญาณ
Chirp	การเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นขณะใช้งาน
Chromatic Dispersion	การกระจายโครมาติก
Common Mode Logic ,CML	ระดับสัญญาณชนิดตรรกะโหมตรงร่วม
Common Mode Noise	สัญญาณรบกวนแบบโหมตรงร่วม
Conductivity	ค่าสภาพนำไฟฟ้า
Continuous Wave, CW	สัญญาณแสงต่อเนื่อง
Crosstalk	สัญญาณแทรกข้ามวงจร
Current Controller	ตัวควบคุมกระแส
Cut Off Wavelength	ความยาวคลื่นขีดจำกัด
Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM	การรับส่งสัญญาณแสงหลายความยาวคลื่นแบบหนาแน่น
Dielectric Constant	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก
Differential Signal	สัญญาณแบบผลต่าง
Direct Modulation	การมอดูเลตตรง
Dispersion Compensation Fiber	เส้นใยนำแสงที่มีการชดเชยดิสเพอร์ชัน
Distributed Feedback Laser	เลเซอร์ฟีดแบ็กแบบกระจายตัว
Electrical Wave Propagation	การเดินทางของคลื่นไฟฟ้า
Electro–Absorption Modulation	การมอดูเลตด้วยวิธีดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า
Electro–Absorption Modulator	ตัวส่งสัญญาณทางแสงด้วยเลเซอร์ที่มี
Integrated Laser, EML	มอดูเลเตอร์ชนิดดูดกลืนคลื่นไฟฟ้าอยู่ภายใน
Electro–Absorption Modulator, EAM	ตัวมอดูเลเตอร์แบบดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า



Evaluation Board	บอร์ดประเมิน
External Modulation	การมอดูเลตภายนอก
Extinction Ratio, EX	ค่าสัดส่วนสัญญาณบิต 1 ต่อสัญญาณบิต 0
Eye Diagram	แผนภาพรูปตา
Feedback Loop	วงจรการป้อนกลับ
Fiber Optic Coupler	ตัวคู่ต่อสัญญาณทางแสง
Ground Bounce	การที่กระแสไหลผ่านกราวด์มากเกินไป
Group Velocity	ความเร็วกลุ่ม
Group Velocity Dispersion, GVD	การกระจายตามความเร็วกลุ่ม
High-Speed Digital System	ระบบดิจิทัลความเร็วสูง
Incoherent	แสงแบบอนาพันธ์
Integrated Circuit, IC	วงจรรวม
Intensity Modulation	การมอดูเลตทางความเข้มของแสง
Jitter Peak-to-Peak	การส่ายของสัญญาณจากยอดถึงยอด
Laser Driver	ตัวขับเลเซอร์
Laser Mount	ตัวจับเลเซอร์
Life Time	ช่วงเวลาชีวิต
Material Dispersion	การกระจายเชิงวัสดุ
Modulator Driver Amplifier	ตัวขยายสัญญาณเพื่อขับตัวมอดูเลเตอร์
Multichannel system	ระบบการรับส่งสัญญาณหลายช่องสัญญาณ
Multimode Fiber, MMF	เส้นใยนำแสงชนิดหลายโหมด
Optical Amplifier	ตัวขยายสัญญาณทางแสง
Optical Fiber	เส้นใยนำแสง
Optical Modulator	ตัวมอดูเลเตอร์ทางแสง
Optical power monitor	ตัววัดกำลังทางแสง
Optical Receiver	ตัวรับสัญญาณทางแสง
Optical Source	แหล่งกำเนิดแสง
Optical Spectrum Analyzer, OSA	เครื่องมือวัดสเปกตรัมทางแสง

Optical Time Domain Reflectometer, OTDR	เครื่องมือวัดการสะท้อนกลับของแสงในเชิงเวลา
Optical Transmitter	ตัวส่งสัญญาณทางแสง
Photodetector	ตัวตรวจจับแสง
Power Penalty	ค่าโทษกำลังทางแสง
Printed Circuit Board, PCB	บอร์ดลายวงจร
Propagation Delay	เวลาประวิงการแพร่กระจาย
Propagation Velocity	ความเร็วในการแพร่กระจาย
Pseudo-Random Binary Sequence, PRBS	ลำดับข้อมูลสุ่มเทียม
Refractive Index	ค่าดัชนีหักเห
Scattering	การกระเจิง
Sensitivity	ความไวกำลังแสง
Single Mode Fiber, SMF	เส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดียว
Single-Channel System	ระบบการรับส่งสัญญาณช่องสัญญาณเดียว
Single-Ended Signal	สัญญาณแบบเดี่ยว
Spectral Width	ความกว้างสเปกตรัม
Standard Single Mode Fiber, SSMF	เส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดียว
Temperature Controller	ตัวควบคุมอุณหภูมิ
Temperature sensor	ตัวตรวจจับอุณหภูมิ
Thermistor	ตัวต้านทานที่มีความต้านทานแปรผันตามอุณหภูมิ
Thermoelectric Cooler, TEC	ตัวควบคุมความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้า
Threshold Current	กระแสค่าขีดเริ่มเปลี่ยน
Transmission Line	สายส่งสัญญาณ
Transverse Electromagnetic Mode, TEM	โหมดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง
Waveguide Dispersion	การกระจายเชิงท่อนำคลื่น
Wavelength Division Multiplexing, WDM	การรับส่งสัญญาณแสงหลายความยาวคลื่น

# บทที่ 1

## บทนำ

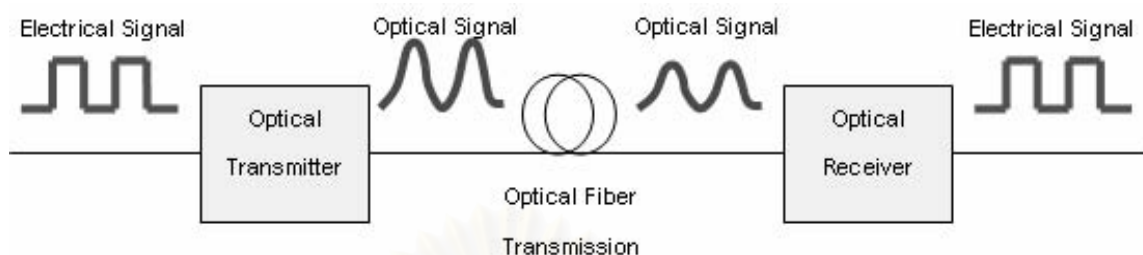
ในปัจจุบันนี้การติดต่อสื่อสารมีความสำคัญต่อการดำเนินชีวิตของมนุษย์อย่างมาก การพัฒนาศักยภาพของเทคโนโลยีการสื่อสารจึงเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการพัฒนาการสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอีกส่วนหนึ่งที่ได้นำเสนอแนวทางในการพัฒนารูปแบบวิธีการ ซึ่งมีส่วนช่วยพัฒนาระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงให้มีคุณภาพดีขึ้น โดยเนื้อหาในบทนี้ได้กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาที่นำมาศึกษา จากนั้นได้เสนอวัตถุประสงค์ เป้าหมายและขอบเขตของการวิจัย รวมไปถึงขั้นตอนการดำเนินงานและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีการสื่อสารในปัจจุบันสูงขึ้นอย่างไม่หยุดยั้ง ก่อให้เกิดความต้องการแบนด์วิดท์และคุณภาพของการส่งข้อมูลที่สูงมากขึ้นอย่างไม่มีขีดจำกัด จึงทำให้เทคโนโลยีการสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงเข้ามามีบทบาทสำคัญในการส่งข้อมูลเพื่อติดต่อสื่อสารกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นการค้นคว้าและวิจัยเพื่อพัฒนาขีดความสามารถของการสื่อสารด้วยสัญญาณทางแสงตั้งแต่ในสมัยอดีตจึงมีมาอย่างต่อเนื่อง หลังจากได้มีการประดิษฐ์เลเซอร์ตัวแรกขึ้นในปี ค.ศ. 1958 ต่อมาได้มีการพัฒนาเส้นใยนำแสง (Optical Fiber) ที่มีค่าลดทอนสัญญาณต่ำ ได้สำเร็จ ทำให้เส้นใยนำแสงนี้เข้ามาเป็นตัวกลางที่มีประสิทธิภาพในการรับส่งสัญญาณได้เป็นอย่างดี และเนื่องด้วยเส้นใยนำแสงเป็นตัวกลางที่มีน้ำหนักเบา ขนาดเล็ก ต้นทุนเกี่ยวกับวัตถุดิบต่ำ ไม่มีปัญหาเรื่องสัญญาณรบกวนเพราะทำมาจากวัสดุฉนวนไฟฟ้า และมีแบนด์วิดท์ที่มากมายมหาศาลเมื่อเทียบกับสายทองแดงที่ใช้กันอยู่ในระบบการสื่อสาร นอกจากนี้ยังได้มีการประดิษฐ์และพัฒนาตัวขยายสัญญาณทางแสง (Optical Amplifier) และไฟเบอร์แบรกกเรตติง (Fiber Bragg Grating) ซึ่งเป็นผลมาจากการพัฒนาขึ้นของเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำ ส่งผลให้การพัฒนาศักยภาพของระบบสูงขึ้นเป็นอย่างมาก

องค์ประกอบพื้นฐานของระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง ประกอบด้วยตัวส่งสัญญาณทางแสง (Optical Transmitter) เป็นแหล่งกำเนิดแสงและเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณแสง องค์ประกอบต่อมาคือ เส้นใยนำแสง เป็นตัวกลางการรับส่งสัญญาณ ทำมาจากแก้วหรือพลาสติก ในปัจจุบันมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน เช่น เส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดียว (Single Mode Fiber, SMF) เส้นใยนำแสงชนิดหลายโหมด (Multimode Fiber, MMF) เป็นต้น สุดท้ายที่

ปลายทางมีตัวรับสัญญาณทางแสง (Optical Receiver) ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงกลับเป็นสัญญาณไฟฟ้าและขยายสัญญาณออกสู่ผู้ใช้ต่อไป ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 องค์ประกอบพื้นฐานของระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง

เนื่องด้วยเส้นใยนำแสงมีแบนด์วิธดีในการส่งสัญญาณมาก เพื่อที่จะใช้ประโยชน์ของเส้นใยนำแสงให้คุ้มค่า จึงได้มีการนำเทคนิคการรับส่งสัญญาณแสงหลายความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing, WDM) ซึ่งเป็นการรวมช่องสัญญาณหลายช่องสัญญาณเข้าด้วยกันผ่านเส้นใยนำแสงเพียงเส้นเดียว ในปัจจุบันเทคโนโลยี WDM นี้มีการรวมช่องสัญญาณมากถึง 100 ช่องสัญญาณ จัดว่าเป็นการเพิ่มความหนาแน่นของข้อมูลเพื่อใช้ประโยชน์จากเส้นใยนำแสงที่มีแบนด์วิธดีมากถึงระดับเทราเฮิรตซ์นี้ให้คุ้มค่ามากที่สุด

จากการที่ระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงมีองค์ประกอบพื้นฐานดังกล่าว ทำให้มีนักวิจัยได้ค้นคว้าและพัฒนาองค์ประกอบเหล่านี้ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นเพื่อพัฒนาระบบการสื่อสารแบบ WDM ให้ก้าวหน้าเพียงพอต่อปริมาณข้อมูลที่เพิ่มขึ้นในอนาคต เช่น การออกแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงด้วยวิธีมอดูเลตโดยตรงด้วยความเร็ว 2.5 Gb/s [1] ตัวรับส่งสัญญาณทางแสงแบบปรับจูนความยาวคลื่นได้กว้าง [2] ตัวทรานพอนเดอร์ทางแสง 2.5 Gb/s [3] และเทคนิคการมอดูเลตแบบคูดกลืนคลื่นไฟฟ้าก็ได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ในตัวรับส่งสัญญาณใน [4] ซึ่งเป็นการออกแบบตัวทรานพอนเดอร์ทางแสงโดยใช้เทคนิคนี้ผ่านระยะทางสั้น 2 กิโลเมตรเท่านั้น

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสนใจในส่วนของตัวส่งสัญญาณทางแสง ซึ่งจะออกแบบและพัฒนาให้ตัวส่งสัญญาณทางแสงนี้ใช้งานได้ที่อัตราข้อมูลความเร็วสูงถึง 2.5 Gb/s โดยใช้หลักการมอดูเลตทางความเข้ม ด้วยเทคนิคการมอดูเลตแบบคูดกลืนคลื่นไฟฟ้า และเลเซอร์ที่ใช้ยังสามารถปรับความยาวคลื่นแสงได้ จึงนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบการรับส่งสัญญาณข้อมูลหลายความยาวคลื่น ผ่านเส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว (Standard Single Mode Fiber, SSMF) และชนิด Truwave-Reduced Slope (Truwave-RS) ระยะทาง 50 km โดยมีอัตราความผิดพลาดบิตน้อยกว่า  $10^{-9}$

ในประเทศไทยแม้มีการใช้งานระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงเป็นระยะเวลาพอสมควรแล้ว แต่แทบทั้งหมดจะเป็นระบบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ เนื่องจากประเทศเรายังขาดบุคลากรที่มี

ความเข้าใจในการออกแบบและประกอบระบบ นอกจากนี้อุปกรณ์ต่างๆ ในการรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสงไม่ว่าจะเป็นตัวส่งสัญญาณทางแสง ตัวรับสัญญาณทางแสงและอุปกรณ์อื่นๆ ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศนั้นไม่มีการเปิดเผยข้อมูลการออกแบบ ประเทศไทยจึงไม่สามารถที่จะออกแบบและสร้างอุปกรณ์ขึ้นมาใช้เองได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องริเริ่มศึกษาระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงทั้งการวางระบบ การออกแบบอุปกรณ์ และการศึกษาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพหรือความจุด้วยเทคนิคต่างๆ เพื่อประเทศไทยจะได้พัฒนาความรู้ ความชำนาญทางการออกแบบ และสามารถประกอบระบบและอุปกรณ์การสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงให้ก้าวทันนานาอารยประเทศในอนาคตได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงด้วยเลเซอร์ที่มีมอดูเลเตอร์ชนิดดัดคลื่นไฟฟ้า อยู่ภายใน (Electro-Absorption Modulator Integrated Laser, EML) ด้วยอัตราข้อมูล 2.5 Gb/s
2. เพื่อประยุกต์ตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ได้ออกแบบ ในการรับส่งสัญญาณแสงหลายความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing, WDM) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 1.3 เป้าหมายและขอบเขตของการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีเป้าหมายในการออกแบบตัวส่งสัญญาณทางแสง โดยใช้เทคนิคในการมอดูเลตด้วยวิธีดัดคลื่นไฟฟ้า ที่ความเร็วข้อมูล 2.5 Gb/s เพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้ใน ระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงในระบบ WDM ผ่านเส้นใยนำแสงระยะทาง 50 km เพื่อให้มีอัตราความผิดพลาดบิตน้อยกว่า  $10^{-9}$  และ Power penalty น้อยกว่า 1 dB สอดคล้องกับมาตรฐาน ITU-T G.692 [5]

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาความรู้พื้นฐานของระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงและปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการ ผิดเพี้ยนของสัญญาณเมื่อส่งแสงผ่านเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดียว
2. ศึกษาเรียนรู้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้อยู่ในห้องปฏิบัติการ
3. ศึกษาและออกแบบระบบการรับส่งสัญญาณแสงหลายความยาวคลื่น
4. ศึกษาและออกแบบองค์ประกอบต่างๆ ในตัวส่งสัญญาณทางแสงและการมอดูเลตทาง ความเข้มด้วยวิธีดัดคลื่นไฟฟ้า

5. จัดซื้ออุปกรณ์และสร้างต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงด้วยอุปกรณ์มอดูเลเตอร์ชนิดคูคกิ้นคลื่นไฟฟ้าที่ควมรวมเลเซอร์ภายใน ด้วยอัตราข้อมูล 2.5 Gb/s
6. ประกอบตัวส่งสัญญาณทางแสงด้วยอุปกรณ์มอดูเลเตอร์ชนิดคูคกิ้นคลื่นไฟฟ้าที่ควมรวมเลเซอร์ภายใน ด้วยอัตราข้อมูล 2.5 Gb/s
7. ทดสอบ และปรับปรุงประสิทธิภาพตัวส่งสัญญาณทางแสง
8. ทดสอบการส่งข้อมูลผ่านระบบการรับส่งสัญญาณแสงหลายความยาวคลื่น WDM ให้ได้ อัตราผิดพลาดบิตตามที่ต้องการ
9. วิเคราะห์ผลการทดลองและปรับปรุงตัวส่งสัญญาณทางแสง
10. ทำรายงานฉบับสมบูรณ์

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. มีความรู้ความเข้าใจองค์ประกอบของตัวส่งสัญญาณทางแสงและระบบการรับส่งสัญญาณแสงหลายความยาวคลื่น
2. สามารถออกแบบและประกอบตัวส่งสัญญาณทางแสงด้วยอัตราข้อมูล 2.5 Gb/s เพื่อประยุกต์ใช้ในระบบการรับส่งสัญญาณแสงหลายความยาวคลื่นได้

### 1.6 ประมวลวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 บทนำ : เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาวัตถุประสงค์ เป้าหมายและขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง : เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับตัวส่งสัญญาณทางแสง การมอดูเลตทางความเข้มแสง ระบบการรับส่งสัญญาณแสงหลายความยาวคลื่น การควบคุมอุณหภูมิของเลเซอร์ รวมถึงปัจจัยที่ทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณเมื่อผ่านเส้นใยนำแสง

บทที่ 3 การออกแบบ : เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการเลือกอุปกรณ์ที่นำมาประกอบเป็นตัวส่งสัญญาณทางแสงพร้อมหน้าที่ยางานของอุปกรณ์ที่เลือกใช้

บทที่ 4 การออกแบบลายวงจรตัวส่งสัญญาณทางแสง : เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนและเทคนิคในการออกแบบลายวงจรความถี่สูง พร้อมทั้งกล่าวถึงการออกแบบลายวงจรตัวส่งสัญญาณทางแสง

บทที่ 5 ระบบการรับส่งสัญญาณหลายความยาวคลื่นแสง : เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงองค์ประกอบในระบบการรับส่งสัญญาณหลายความยาวคลื่นแสง ซึ่งประกอบด้วย ภาคส่งสัญญาณ ตัวกลางในการรับส่งสัญญาณ และภาครับสัญญาณ

บทที่ 6 ผลการวัดประสิทธิภาพของตัวส่งสัญญาณทางแสงผ่านระบบการรับส่งสัญญาณหลายความยาวคลื่น : เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวัดประสิทธิภาพของตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ออกแบบ ผ่านระบบการรับส่งสัญญาณหลายความยาวคลื่น

บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ : เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะสำหรับใช้เป็นแนวทางในการทำวิจัยขั้นต่อไป



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

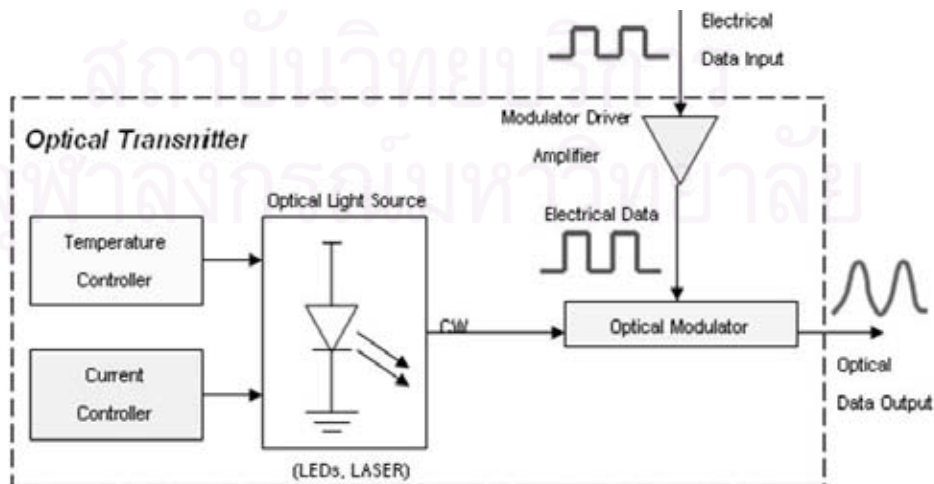
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกี่ยวข้องกับการออกแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงจึงจำเป็นต้องศึกษาองค์ประกอบพื้นฐานของตัวส่งสัญญาณทางแสงและวิธีการมอดูเลตสัญญาณทางความเข้มแสง ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ จากนั้นใช้หลักการเกี่ยวกับการรับส่งสัญญาณแสงหลายความยาวคลื่นในหัวข้อ 2.3 เพื่อนำตัวส่งสัญญาณทางแสงไปประยุกต์ใช้งาน โดยจำเป็นต้องศึกษาการควบคุมอุณหภูมิของเลเซอร์ในหัวข้อ 2.4 เพื่อที่จะสามารถปรับความยาวคลื่นให้เป็นไปตามที่ต้องการได้ จากนั้นจึงออกแบบลายวงจรตัวส่งสัญญาณทางแสงด้วยเลเซอร์ที่มีมอดูเลเตอร์ชนิดดูดกลืนคลื่นไฟฟ้าอยู่ภายใน ด้วยอัตราข้อมูล 2.5 Gb/s เพื่องานประยุกต์ทางด้านการรับส่งสัญญาณแสงหลายความยาวคลื่น

#### 2.1 องค์ประกอบของตัวส่งสัญญาณทางแสง (Optical Transmitter Components)

ตัวส่งสัญญาณทางแสงนั้นประกอบด้วยอุปกรณ์พื้นฐานที่สำคัญ คือ (1) แหล่งกำเนิดแสงเพื่อสร้างสัญญาณแสงต่อเนื่อง (Continuous Wave, CW) ในบางครั้งจะมีวงจรควบคุมกระแสและวงจรควบคุมอุณหภูมิ เพื่อให้สัญญาณทางแสงขาออกมีเสถียรภาพมากขึ้น (2) ตัวขยายสัญญาณเพื่อขับตัวมอดูเลเตอร์ สำหรับขยายขนาดสัญญาณให้มีขนาดเพียงพอในการขับมอดูเลเตอร์ และ (3) ตัวมอดูเลเตอร์ ทำหน้าที่ในการมอดูเลตสัญญาณทางแสง [6 – 8] ซึ่งการเชื่อมต่อกันขององค์ประกอบตัวส่งสัญญาณทางแสงเป็นดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของตัวส่งสัญญาณทางแสง



### 2.1.1 แหล่งกำเนิดแสง (Optical Source)

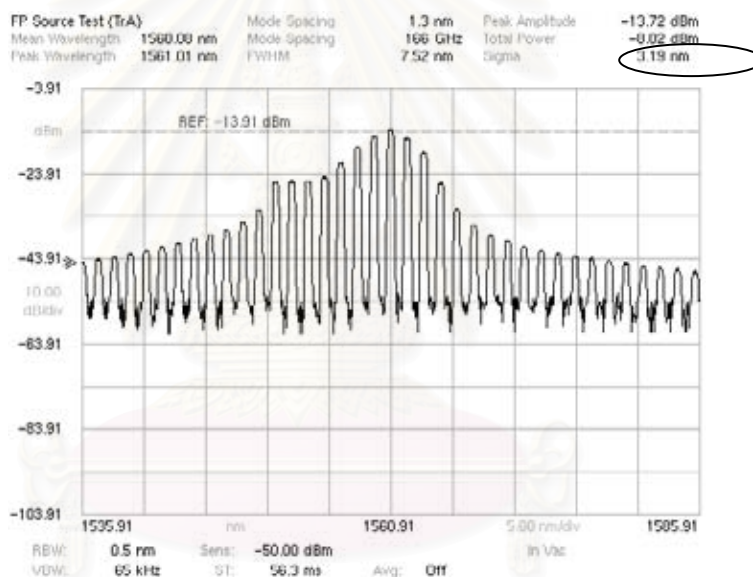
เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ผลิตแสง สร้างมาจากวัสดุสารกึ่งตัวนำ โดยแหล่งกำเนิดแสงที่นิยมใช้กันในงานโทรคมนาคมนี้มีอยู่สองชนิดคือ ไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode, LED) และเลเซอร์ (Laser Diodes, LD) เนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงทั้งสองชนิดนี้สามารถผลิตแสงที่มีขนาดของลำแสงเข้าสู่เส้นใยนำแสงได้เป็นอย่างดี

1) ไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode, LED) เป็นอุปกรณ์ที่ผลิตมาจากสารกึ่งตัวนำที่เป็นรอยต่อระหว่างพีเอ็น (p-n junction) เมื่อจ่ายแรงดันไบแอสเดินหน้า (Forward bias) บริเวณรอยต่อพีเอ็นจะสามารถผลิตแสงออกมาเป็นสัดส่วนกับกระแสไฟที่จ่ายเข้าไป แสงที่ได้จาก LED นี้จะเป็นแสงแบบอนาพันธ์ (Incoherent) คือลำแสงจะกระจายต่างออกเป็นวงกว้าง มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 800–900 nm และเนื่องจากลำแสงจะมีสเปกตรัมกว้าง (50–200 nm) ทำให้การประยุกต์ใช้ในงานสื่อสารนั้นได้ที่ความเร็วอัตราข้อมูลไม่สูงมาก ประมาณ 100–200 Mb/s นอกจากนี้ LED ส่งผ่านเส้นใยนำแสงให้กำลังสูงสุดได้ไม่มากนัก อีกทั้งส่งได้ระยะทางเพียงไม่กี่กิโลเมตรเท่านั้น LED ที่นิยมใช้มีสองชนิดคือ ไดโอดเปล่งแสงจากขอบ (Edge Emitting LED, ELED) ที่ปล่อยแสงให้ออกทางด้านข้าง และ ไดโอดเปล่งแสงจากผิวหน้า (Surface Emitting LED, SLED) แสงจะออกทางด้านบนผิวหน้า และมีความกว้างสเปกตรัมกว้างกว่าชนิดแรกเล็กน้อย โดยปกติในการสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง LED จะถูกใช้งานคู่กับเส้นใยนำแสงชนิดหลายโหมด เพราะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใกล้เคียงกัน โดยจะต่อกันโดยตรงหรือใช้เลนส์เป็นอุปกรณ์ช่วยในการรวมแสงก่อนเข้าสู่เส้นใยนำแสงก็ได้

2) ไดโอดเลเซอร์ (Laser Diodes, LD) เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้งานในการสื่อสารทางแสงดีกว่า LED เนื่องจากแสงที่ผลิตได้จากไดโอดเลเซอร์นั้นเป็นแสงความยาวคลื่นเดียวไม่มีความต่างเฟสกัน (Coherent) อีกทั้งขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของลำแสงมีขนาดเล็ก ทำให้ประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงผ่านเส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดียวได้ แสงจะถูกส่งผ่านเข้าสู่เส้นใยนำแสงได้ 50–80% ไดโอดเลเซอร์จะผลิตแสงที่มีกำลังสูงตามแต่ละชนิดของวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ใช้

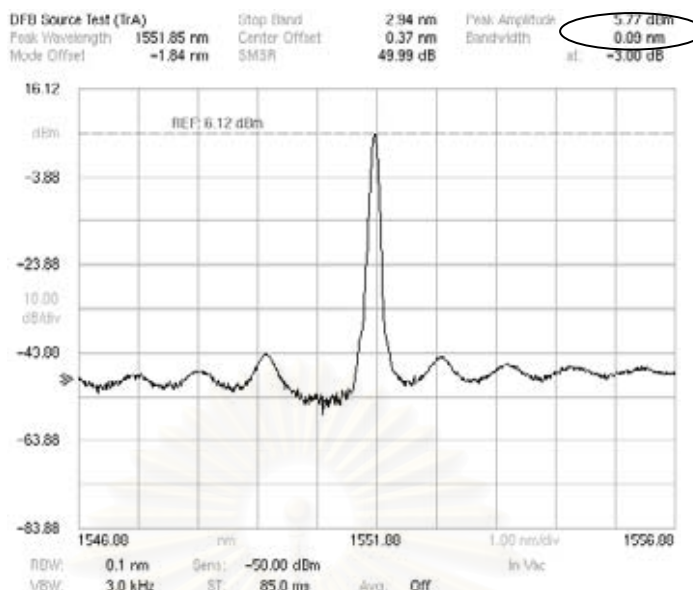
โครงสร้างของไดโอดเลเซอร์นั้นเป็นรอยต่อระหว่างพีเอ็นเหมือนกับ LED แต่จะมีความซับซ้อนกว่า โดยมีหลักการทำงานสามกระบวนการ คือ กระบวนการ Absorption เมื่อมีแสงเข้ามากระทบ อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานขึ้นไปอยู่ระดับพลังงานที่สูงกว่า กระบวนการที่สองคือ Spontaneous Emission ที่ระดับพลังงานสูงอิเล็กตรอนจะไม่เสถียร เมื่ออิเล็กตรอนอยู่ในระดับพลังงานที่สูงได้ระยะเวลาหนึ่งจะตกกลับลงมาเองที่ระดับพลังงานล่างพร้อมกับปล่อยแสงออกมา

แต่แสงที่ออกมาด้วยกระบวนการนี้ไม่ใช่แสงเลเซอร์ แต่จะเป็นแสงสัญญาณรบกวน กระบวนการที่สามคือ Stimulated Emission โดยอิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานสูงเมื่อมีการกระตุ้นด้วยแสงให้อิเล็กตรอนตกกลับมาที่ระดับพลังงานล่าง จะมีแสงปล่อยออกมา นั่นก็คือแสงเลเซอร์นั่นเอง โดยแสงนี้将有ความยาวคลื่นประมาณ 1.3–1.6 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นแสงที่ความกว้างของสเปกตรัมแคบกว่า LED เลเซอร์ที่ใช้ในการสื่อสารในปัจจุบันมีหลายชนิด ยกตัวอย่างเช่น เลเซอร์ชนิดฟาร์บริ-เพโรต์ (Fabry-Perot Laser) ภายในจะประกอบด้วยชั้นสะท้อน(Reflecting Layers) แนวตั้งที่ทำหน้าที่เหมือนกระจก ที่ปลายช่องปิด แสงจะสะท้อนไปมาระหว่างชั้นสะท้อนนี้ ทำให้เกิดความถี่ก้ำก๋อ (Resonance frequency) หลายความถี่ จึงมีความกว้างสเปกตรัม (Sigma,  $\sigma$ ) กว้าง ในการวัดค่าความกว้างสเปกตรัม จะวัดจากยอดกำลังสูงสุดลงมา 3 dB ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งแสดงตัวอย่างแสงที่ออกมาจาก Fabry-Perot Laser มีความกว้างสเปกตรัม 3.19 nm



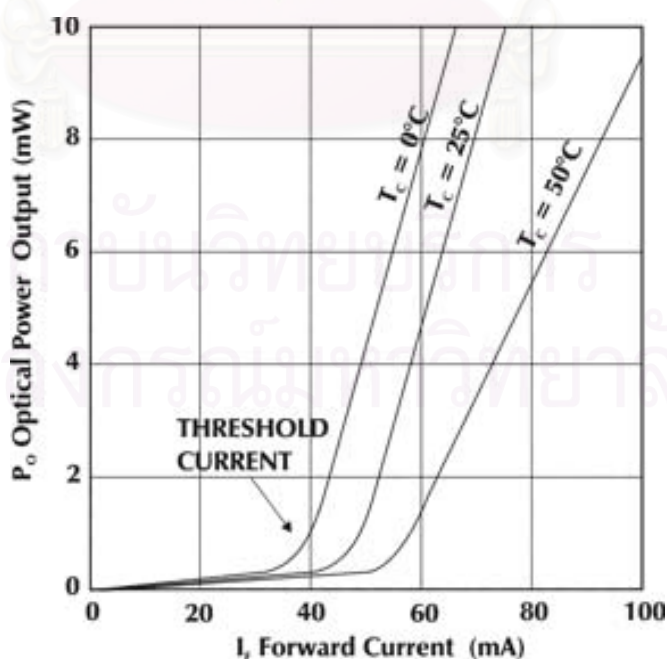
รูปที่ 2.2 สเปกตรัมของแสงที่ออกมาจาก Fabry-Perot Laser

เลเซอร์อีกชนิดที่นิยมใช้กันคือ เลเซอร์ป้อนกลับแบบกระจายตัว (Distributed Feedback Laser, DFB) ซึ่งจะใช้หลักการหักเหของเกรตติง ที่ภายในมีค่าดัชนีหักเหแตกต่างกันเป็นคาบ ช่วยในการสะท้อนแสงไปมาในช่องปิดแทนชั้นสะท้อน แสงจะมีความถี่ก้ำก๋อเพียงความถี่เดียว ดังนั้นแสงจะมีความกว้างสเปกตรัมแคบกว่า Fabry-Perot Laser มาก รูปที่ 2.3 เป็นตัวอย่างแสงที่ออกมาจาก DFB Laser มีความกว้างสเปกตรัม 0.09 nm ซึ่งแคบกว่าแสงจาก Fabry-Perot Laser หลายสิบเท่าตัว



รูปที่ 2.3 สเปกตรัมของแสงที่ออกมาจาก Distributed Feedback Laser

กำลังแสงขาออกของเลเซอร์นั้นขึ้นอยู่กับกระแสขับเลเซอร์ โดยจะต้องป้อนกระแสขับเลเซอร์ให้มากกว่ากระแสค่าขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold Current,  $I_{th}$ ) เลเซอร์จึงจะปล่อยแสงเป็นคลื่นต่อเนื่อง โดยกำลังแสงที่ได้จะแปรผันตรงตามกับกระแส ดังรูปที่ 2.4 นอกจากนั้นคุณลักษณะของเลเซอร์ยังเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิอีกด้วย ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นกระแสค่าขีดเริ่มเปลี่ยนก็จะเพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งความชันของกราฟก็จะชันน้อยลง เป็นต้น



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขับเลเซอร์กับกำลังแสงขาออกกับอุณหภูมิ

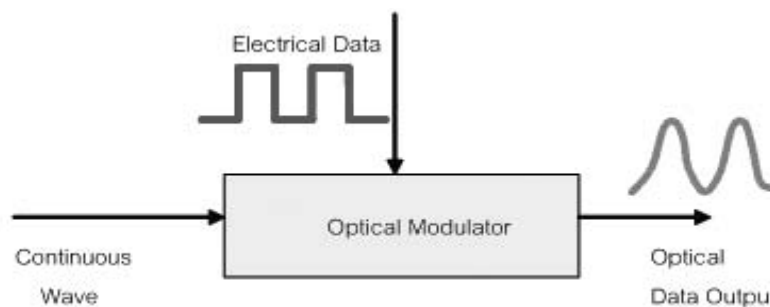
เมื่อเปรียบเทียบกับ LED คุณลักษณะของเลเซอร์จะมีประสิทธิภาพดีและเหมาะสมกับการสื่อสารทางแสงมากกว่า แต่มีราคาแพงกว่า และเมื่อผ่านการใช้งานเป็นระยะเวลาหลายๆ จะเกิดปัญหาเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิและกำลังแสงที่ไม่คงที่ขึ้น จึงจำเป็นต้องมีตัวควบคุมอุณหภูมิและกำลังแสงเพื่อให้ได้สัญญาณแสงที่สม่ำเสมอ ปัญหาจากอุณหภูมิหรือ Peltier Effect [9] จะส่งผลให้สัญญาณแสงไม่นิ่ง จากรูปที่ 2.4 ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นคุณลักษณะของเลเซอร์จะเปลี่ยนแปลงไป กระแสค่าขีดเริ่มเปลี่ยนและช่วงของกระแสที่ใช้ทำงาน (Operating Current) จะสูงขึ้นด้วย จำเป็นต้องใช้ Thermoelectric cooler (TEC) และตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานแปรตามอุณหภูมิหรือ เทอร์มิสเตอร์ (Thermistor) เข้ามาช่วยในการควบคุมอุณหภูมิของเลเซอร์ ในขณะที่ทำงาน (จะกล่าวต่อในหัวข้อ 2.4) ส่วนในกรณีปัญหาเรื่องกำลังทางแสง จำเป็นต้องมีตัวตรวจจับแสงที่รวมอยู่ในอุปกรณ์เดียวกันกับเลเซอร์ เช่น มีตัวตรวจจับแสง (Photodetector) บรรจุอยู่ในสำหรับวัดค่ากำลังแสง แล้วป้อนกลับไปช่วยควบคุมกระแสไบแอสที่จ่ายให้กับเลเซอร์ เพื่อให้กำลังขาออกมีค่าคงที่ตามที่ต้องการ

### 2.1.2 ตัวขยายสัญญาณเพื่อขับตัวมอดูเลเตอร์ (Modulator Driver Amplifier)

เป็นอุปกรณ์ที่มีหน้าที่ขยายสัญญาณไฟฟ้าสำหรับขับตัวมอดูเลเตอร์ทางแสง เนื่องจากตัวมอดูเลเตอร์จำเป็นต้องใช้ระดับการแกว่งของแรงดันที่สูงในการมอดูเลตสัญญาณข้อมูล แต่สัญญาณข้อมูลที่ได้ออกมาจากวงจรรวมจะมีระดับแรงดันที่ต่ำประมาณ  $0.3-1 V_{p-p}$  เท่านั้น ซึ่งมีค่าน้อยเกินไปสำหรับป้อนเข้าตัวมอดูเลเตอร์ (ประมาณ  $2 V_{p-p}$  หรือมากกว่านั้น) จึงจำเป็นต้องมีตัวขยายสัญญาณเพื่อให้มีขนาดเพียงพอที่จะขับตัวมอดูเลเตอร์ให้ทำงานได้

### 2.1.3 ตัวมอดูเลเตอร์ทางแสง (Optical Modulator)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติบางอย่างของคลื่นแสง คลื่นแสงอาจจะถูกมอดูเลตได้สามทางคือ ทางความเข้มแสง ทางเฟส หรือทางความถี่ โดยมากแล้วนิยมใช้การมอดูเลตทางความเข้มแสงเพราะทำได้ง่าย อีกทั้งทางภาครับก็จะสามารถตรวจจับสัญญาณโดยตรงได้ง่ายอีกด้วย เนื่องจากในการมอดูเลตสัญญาณข้อมูลทางความเข้ม สัญญาณข้อมูลจะถูกแทนที่ด้วยระดับกำลังของแสงโดยตรงเลย ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 หลักการทำงานของตัวมอดูเลเตอร์ทางแสง

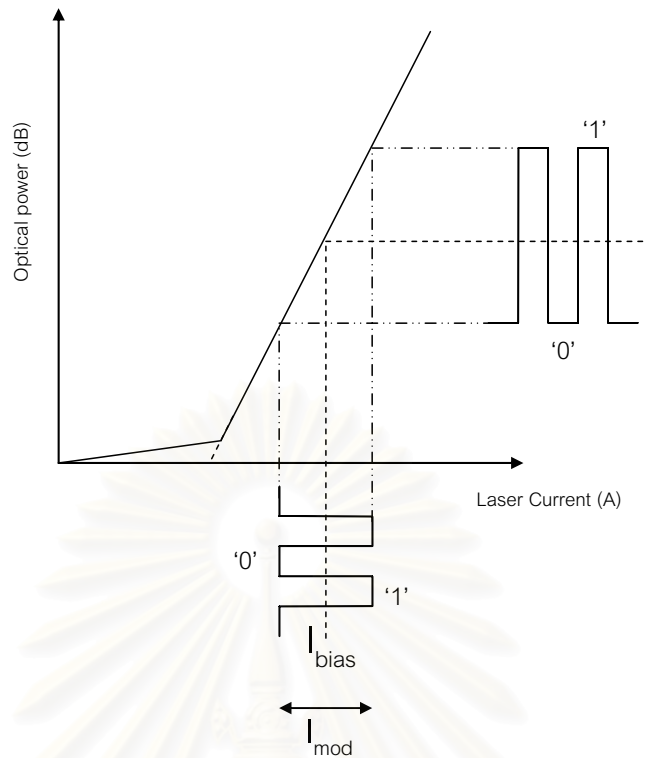
ตัวมอดูเลเตอร์ทางความเข้มแสงยังแบ่งออกได้หลายชนิดด้วยกัน เช่น ตัวมอดูเลเตอร์แบบดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า (Electro-Absorption Modulator, EAM) ตัวมอดูเลเตอร์ภายนอกชนิด Mach-Zehnder Modulator (MZM) แต่หากอัตราบิตข้อมูลมีความเร็วสูงมากเกินกว่า 10 Gb/s จะนิยมใช้ตัวมอดูเลเตอร์ภายนอกมากกว่า เพราะสามารถตอบสนองต่อสัญญาณความถี่สูงได้ไวกว่า สิ่งสำคัญสำหรับการมอดูเลตแบบนี้คือ สัญญาณขาเข้าต้องมีการแกว่งของระดับแรงดันไฟฟ้าสูงมาก จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ขยายสัญญาณดังกล่าวในหัวข้อ 2.1.2 ให้มีขนาดสัญญาณที่เหมาะสม

## 2.2 วิธีการมอดูเลตทางความเข้มแสง

วิธีในการมอดูเลตทางความเข้มแสงสามารถทำได้สามวิธีคือ (1) การมอดูเลตโดยตรง (2) การมอดูเลตด้วยวิธีดูดกลืนคลื่นไฟฟ้าที่ควมรวมเลเซอร์ภายใน และ (3) การมอดูเลตภายนอก โดยทั้งสามวิธีจะมีหลักการทำงานดังนี้

### 2.2.1 การมอดูเลตโดยตรง (Direct Modulation)

เป็นวิธีการมอดูเลตที่ง่ายที่สุด ไม่ยุ่งยากซับซ้อนเหมือนวิธีอื่น และไม่จำเป็นต้องใช้ตัวมอดูเลเตอร์และตัวขับมอดูเลเตอร์ แต่จะใช้ตัวขับเลเซอร์ (Laser Driver) แทน หลักการทำงานของ การมอดูเลตโดยตรงนั้นจะป้อนสัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้าเข้าตัวขับเลเซอร์ ซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณข้อมูลให้เพียงพอในการไบแอสเดินหน้าตัวเลเซอร์ ตัวขับเลเซอร์จะทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณบิต '1' และบิต '0' เหมือนเดิม แต่จะอยู่ในโดเมนกระแสที่มากเพียงพอเพื่อขับเลเซอร์ให้ได้ระดับกำลังแสงขาออกตามต้องการ ดังรูปที่ 2.6 สัญญาณข้อมูลบิต '1' เมื่อมอดูเลตแล้วจะถูกแทนที่ด้วยระดับกำลังแสงค่าหนึ่ง ส่วนสัญญาณข้อมูลบิต '0' จะถูกแทนที่ด้วยระดับกำลังแสงอีกค่าหนึ่งซึ่งน้อยกว่า



รูปที่ 2.6 หลักการมอดูเลตโดยตรง

กระแสสองค่าที่มีความจำเป็นในการมอดูเลตสัญญาณคือ กระแสไบแอส ( $I_{bias}$ ) เป็นกระแสคงที่ที่ใช้ตั้งช่วงการทำงานของตัวเลเซอร์ให้อยู่เหนือค่าขีดเริ่มเปลี่ยนและเป็นตัวกำหนดระดับกำลังแสงขาออกของเลเซอร์ ส่วนกระแสอีกชนิดคือกระแสมอดูเลต ( $I_{mod}$ ) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการกำหนดความแตกต่างของระดับกำลังแสงของสัญญาณข้อมูลบิต '1' และบิต '0' ซึ่งถ้าสัดส่วนของระดับกำลังทางแสงสัญญาณบิต '1' และบิต '0' มีสูงหรือค่าสัดส่วนเอกซ์ติงชัน (Extinction ratio, EX) ก็จะมีสูง ซึ่งจะส่งผลดีกับการรับ-ส่งข้อมูลทำให้มีอัตราความผิดพลาดลดลง ค่าสัดส่วน EX คืออัตราส่วนระหว่างกำลังสัญญาณข้อมูลบิต '1' ต่อกำลังสัญญาณข้อมูลบิต '0' ค่าในหน่วย dB แสดงได้ดังสมการ (2.1) [10]

$$\text{Extinction ratio (EX)} = 10 \log_{10} \frac{A}{B} \quad (2.1)$$

โดยพารามิเตอร์ A = ระดับกำลังแสงเฉลี่ยที่บริเวณกึ่งกลางของบิต '1'

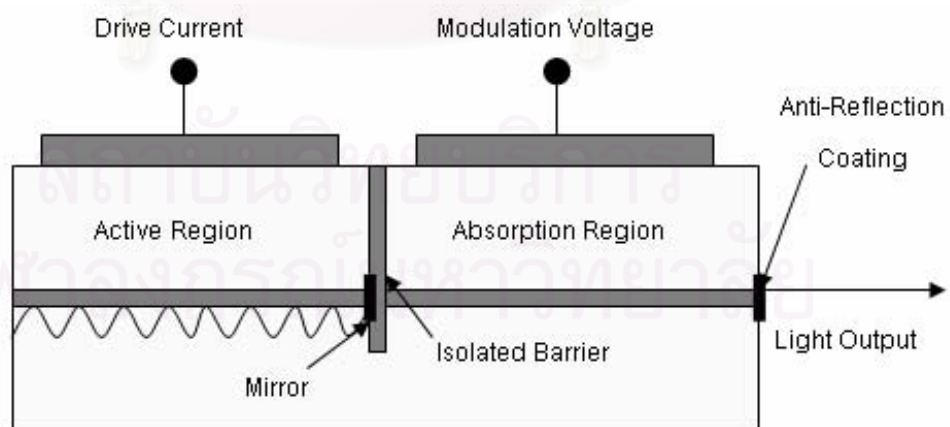
B = ระดับกำลังแสงเฉลี่ยที่บริเวณกึ่งกลางของบิต '0'

ค่า EX ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของสัญญาณว่าสัญญาณแสงขาออกนั้นมีสัดส่วนของกำลังสัญญาณข้อมูลสอดคล้องกับมาตรฐาน ITU-T G.692 หรือไม่

การมอดูเลตโดยตรงจะไม่สามารถส่งสัญญาณที่มีอัตราบิตข้อมูลสูงได้ เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านช่วงเวลาชีวิต (Life Time) ของประจุของสารกึ่งตัวนำ ทำให้แบนด์วิดท์ในการส่งข้อมูลสูงเพียงประมาณ 3 Gb/s [8] ดังนั้นถ้าหากต้องการที่จะส่งสัญญาณข้อมูลที่มีอัตราความเร็วสูงขึ้น จำเป็นต้องใช้วิธีอื่นแทน นอกจากนี้การมอดูเลตโดยตรงยังมีปัญหาเรื่อง การเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นขณะใช้งาน (Chirp) เมื่อระดับกระแสที่ใช้ในการขับเลเซอร์เปลี่ยนไป ความยาวคลื่นก็จะเปลี่ยนตามไปด้วย ทำให้ไม่เหมาะกับระบบ WDM อีกทั้งปัญหานี้ทำให้เพาส์สัญญาณเกิดการกระจายตัวมาก จึงไม่สามารถส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสงเป็นระยะไกลๆ ได้ จำเป็นต้องใช้เทคนิคการมอดูเลตด้วยวิธีอื่นแทน

## 2.2.2 การมอดูเลตด้วยวิธีดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า (Electro-Absorption Modulation)

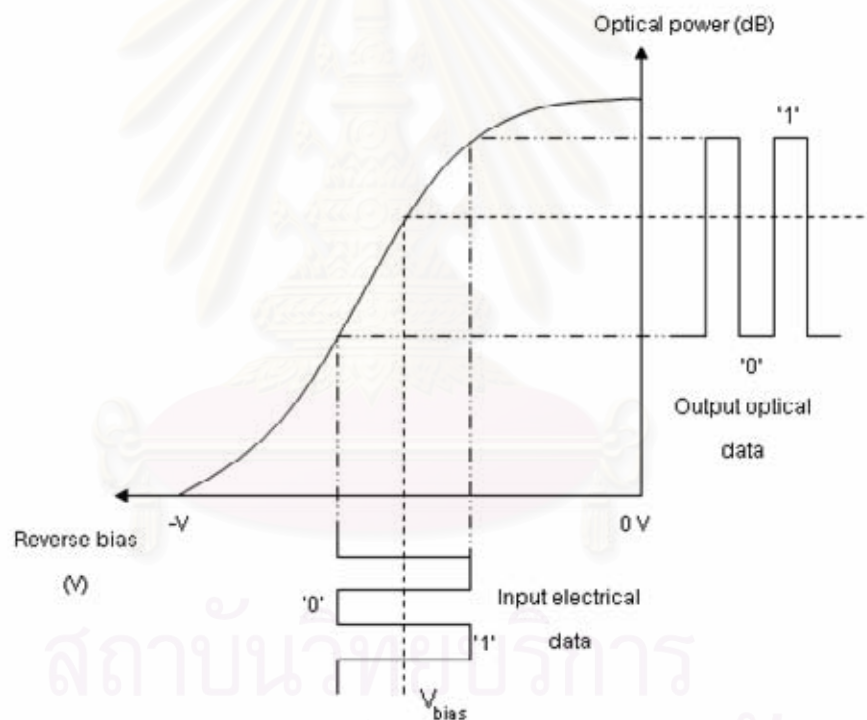
การมอดูเลตด้วยอุปกรณ์ EAM ซึ่งเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำแบบรอยต่อพีเอ็นที่ทำจากวัสดุ InGaAsP/InP จะใช้หลักการดูดกลืนแสง โดยถ้าไบแอสย้อนกลับมากขึ้น ก็จะมีการดูดกลืนแสงมากขึ้น แต่แสงที่ผ่านนั้นต้องมีพลังงานมากกว่าแถบความกว้างพลังงาน (Bandgap energy) ของวัสดุ ถึงจะถูกดูดกลืนพลังงาน และความยาวคลื่นที่ถูกดูดกลืนไปก็ต้องเป็นความยาวคลื่นที่สั้นกว่าความยาวคลื่นขีดจำกัด (Cut off wavelength) ของอุปกรณ์ด้วย สำหรับความเร็วที่ได้จากการมอดูเลตแบบนี้จะสามารถส่งข้อมูลได้ถึง 10 Gb/s ซึ่งเป็นการมอดูเลตที่เร็วขึ้นกว่าการเปิด-ปิดสัญญาณแบบมอดูเลตโดยตรง ทั้งยังลดปัญหาเรื่อง Chirp ได้ด้วย เพราะกระแสที่ใช้ขับเลเซอร์เป็นกระแสคงที่ ทำให้ความยาวคลื่นคงที่ด้วย



รูปที่ 2.7 โครงสร้าง DFB เลเซอร์ที่มีมอดูเลเตอร์ชนิดดูดกลืนคลื่นไฟฟ้ารวมอยู่ด้วย

โครงสร้างในการมอดูเลตสัญญาณแบบดูดกลืนนั้น จะนำส่วนของ DFB laser และ EAM เข้ามารวมอยู่บนชิปตัวเดียวกัน โดยจะวางแยกจากกันด้วยตัวกั้นและกระแส โดยจะเรียกอุปกรณ์

นี้ว่าเลเซอร์ที่มอดูเลตด้วยการดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า (Electro-Absorption Modulator Integrated Laser, EML) ดังรูปที่ 2.7 บริเวณแอคทีฟ (Active Region) ในรูปก็คือส่วนที่เป็น DFB laser เมื่อจ่ายกระแสไฟเพื่อขับเลเซอร์ เลเซอร์ก็จะผลิตแสงต่อเนื่อง (Continuous Wave, CW) ส่งผ่านไปยังบริเวณดูดกลืน (Absorption Region) ถ้าไม่มีการจ่ายแรงดันมอดูเลต ลำแสงต่อเนื่องก็จะผ่านบริเวณนี้ออกสู่ภายนอก แต่เมื่อมีแรงดันมอดูเลตที่เป็นสัญญาณข้อมูลเข้ามาที่บริเวณดูดกลืนนี้ แรงดันที่เข้ามาจะไบแอส ถ้ามีแรงดันเข้ามามาก ลำแสงต่อเนื่องที่มาจากเลเซอร์ก็จะถูกดูดกลืนมากตามไปด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงขาออกกับแรงดันที่จ่ายให้แก่อุปกรณ์เป็น ดังรูปที่ 2.8 ดังนั้นถ้าบิตข้อมูลเป็น '1' ระดับแรงดันไบแอสติดลบน้อย แสงจะถูกดูดกลืนน้อย จึงเหลือแสงออกจากอุปกรณ์มาก สำหรับบิตข้อมูลที่เป็น '0' ระดับแรงดันไบแอสจะมีค่าติดลบมาก แสงจะถูกดูดกลืนมาก แสงที่เหลือออกมาจะมีกำลังน้อยกว่า จึงได้เป็นการมอดูเลตสัญญาณแสงตามความเข้มของแสง (Intensity Modulation, IM)



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงขาออก (dB) กับแรงดันไบแอส (V)

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ EML นี้ให้สามารถส่งข้อมูลที่อัตราบิตสูง 10 Gb/s และส่งได้ระยะทางไกลถึง 600 กิโลเมตร ที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร รวมทั้งไม่มีการใช้มอดูเลเตอร์ภายนอก ทำให้ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับอุปกรณ์ลดลง นอกจากนี้ยังได้มีการประดิษฐ์อุปกรณ์ EML ด้วยเทคนิคต่างๆ มากมายเพื่อปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น [11-13] เช่น โดยปกติ EAM จะช่วยแก้ปัญหาเรื่อง Chirp แต่เมื่อมีการทำงานที่กำลังสูงๆ การมอดูเลตแบบดูดกลืนคลื่นไฟฟ้านี้



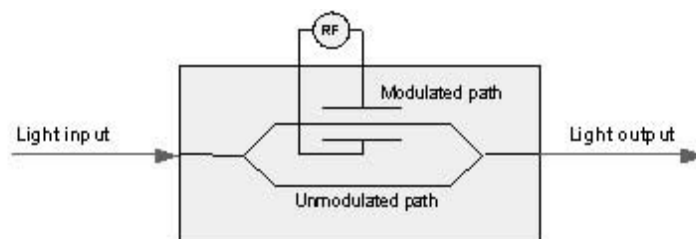
จะเริ่มมีปัญหาระยะ Chirp เหมือนกับกรณีของการมอดูเลตโดยตรง จึงมีงานวิจัยคิดค้นประดิษฐ์ EAM โดยใช้หลักการลดช่วงเวลาชีวิตของพาหะลง [11] ทำให้ในขณะนี้มีอุปกรณ์ EML ที่ส่งสัญญาณแสงที่กำลังสูงได้โดยไม่มีปัญหาระยะ Chirp มากนัก เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับการมอดูเลตโดยตรงแล้วปัญหาระยะ Chirp จะน้อยกว่ามาก

### 2.2.3 การมอดูเลตภายนอก (External Modulation)

เป็นการมอดูเลตที่ซับซ้อนและยุ่งยากกว่าสองวิธีแรก แต่ทำงานด้วยอัตราข้อมูลสูงเกินกว่า 10 Gb/s ได้ ดังนั้นการสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงด้วยความเร็วสูงขึ้นไปกว่านี้จำเป็นต้องใช้การมอดูเลตภายนอกทั้งสิ้น ซึ่งในปัจจุบันมีผลงานวิจัยที่สามารถส่งข้อมูลที่อัตราสูงสุดถึง 107 Gb/s [14] แต่เนื่องจากความสามารถของตัวขยายสัญญาณเพื่อขับตัวมอดูเลเตอร์ยังไม่สามารถไปถึงระดับ 107 Gb/s ได้ ทำให้ต้องป้อนข้อมูลที่มีแรงดันสูงเข้าไปในตัวมอดูเลเตอร์โดยตรง

หลักการทำงานของการมอดูเลตภายนอกนั้น อุปกรณ์มอดูเลเตอร์ทางแสงจะแยกออกจากกันกับแหล่งกำเนิดแสง เพื่อมอดูเลตสัญญาณทางความเข้ม ลำแสงต่อเนื่องจะถูกสร้างขึ้นด้วยเลเซอร์ ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้เลเซอร์ชนิด DFB มอดูเลเตอร์ทางแสงจะทำหน้าที่เหมือนเป็นช่องเปิด-ปิด โดยจะมีสัญญาณข้อมูลที่ส่งเข้ามาขับตัวมอดูเลเตอร์นี้ เมื่อสัญญาณข้อมูลบิต '1' มอดูเลเตอร์ก็จะเปิดช่องทางให้แสงผ่านออกสู่ภายนอก ที่ระดับสัญญาณข้อมูลบิต '0' ก็จะมีช่องทางเดินของแสง ไม่ให้แสงผ่านออก

ตัวมอดูเลเตอร์ทางแสงที่ใช้ในการมอดูเลตภายนอกส่วนใหญ่จะใช้ Mach-Zehnder Interferometer ซึ่งผลิตจากสารกึ่งตัวนำ ชื่อ  $\text{LiNbO}_3$  มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.9 เมื่อแสงผ่านเข้ามาจะแยกออกเป็นสองทางเท่าๆ กัน เส้นทางล่างจะส่งผ่านแสงไปเลยโดยที่ไม่ได้ทำอะไร ส่วนเส้นทางบนถูกมอดูเลตด้วยสัญญาณข้อมูลที่ต้องการจะส่ง โดยเส้นทางนี้จะติดตั้งแท่งอิเล็กโทรด เมื่อจ่ายแรงดันของสัญญาณข้อมูล แรงดันนี้จะไปทำให้ดัชนีหักเหของแสงเปลี่ยนไปก่อให้เกิดความล่าช้าของเฟสเป็นสัดส่วนกับขนาดของแรงดันที่จ่าย และเมื่อแสงทั้งสองเส้นทางมารวมกันอีกครั้ง ถ้าแสงทั้งสองเส้นทางมีเฟสที่ตรงกันจะก่อให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน สัญญาณขาออกจะเป็นสัญญาณเปิด คือมีแสงผ่านออกมา แต่ถ้าแทรกสอดแบบหักล้างกันซึ่งหมายถึงมีเฟสต่างกัน 180 องศา สัญญาณขาออกจะเป็นสัญญาณปิดไม่มีแสงผ่านออก



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของ Mach-Zehnder Interferometer Modulator

ระบบการรับส่งสัญญาณทางแสงที่ใช้วิธีการมอดูเลตภายนอกจะทำให้ระบบมีราคาสูง เพราะมีความซับซ้อนและยุ่งยากกว่าการใช้การมอดูเลตประเภทอื่นมาก เพราะต้องใช้ตัวมอดูเลเตอร์แยกออกจากเลเซอร์ ทำให้ระบบมีขนาดใหญ่และซับซ้อน อีกทั้งยังใช้พลังงานโดยรวมมากกว่า และยังมีปัญหาเรื่องโพลาไรซ์ในการเชื่อมต่อระหว่างเลเซอร์กับตัวมอดูเลเตอร์ทางแสง

การพิจารณาเลือกวิธีการมอดูเลต ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติหลายประการพร้อมทั้งคำนึงถึงความคุ้มค่าในการใช้งาน การมอดูเลตโดยตรงนั้นง่ายและราคาถูก แต่ไม่สามารถที่จะส่งข้อมูลที่อัตราความเร็วสูงได้ อีกทั้งยังมีปัญหาเรื่องการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นหรือ Chirp มาก ซึ่งไม่สามารถใช้งานในระบบ WDM ได้ การมอดูเลตด้วยการรวบรวมตัวดูดกลืนคลื่นไฟฟ้าจึงมีความเหมาะสม ถึงแม้ว่าราคาของอุปกรณ์จะสูง แต่ก็ไม่สูงมากเท่ากับการมอดูเลตแบบภายนอก ขนาดกะทัดรัด อีกทั้งกินพลังงานไม่สูง ไม่มีปัญหาเรื่องโพลาไรซ์ และ Chirp อีกด้วย เมื่อคำนึงถึงประโยชน์ที่จะได้รับแล้ว การมอดูเลตชนิดนี้จึงมีความเหมาะสมสำหรับระบบ WDM มากที่สุด ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกใช้การมอดูเลตชนิดดูดกลืนคลื่นไฟฟ้าเป็นวิธีในการมอดูเลตสัญญาณทางแสง

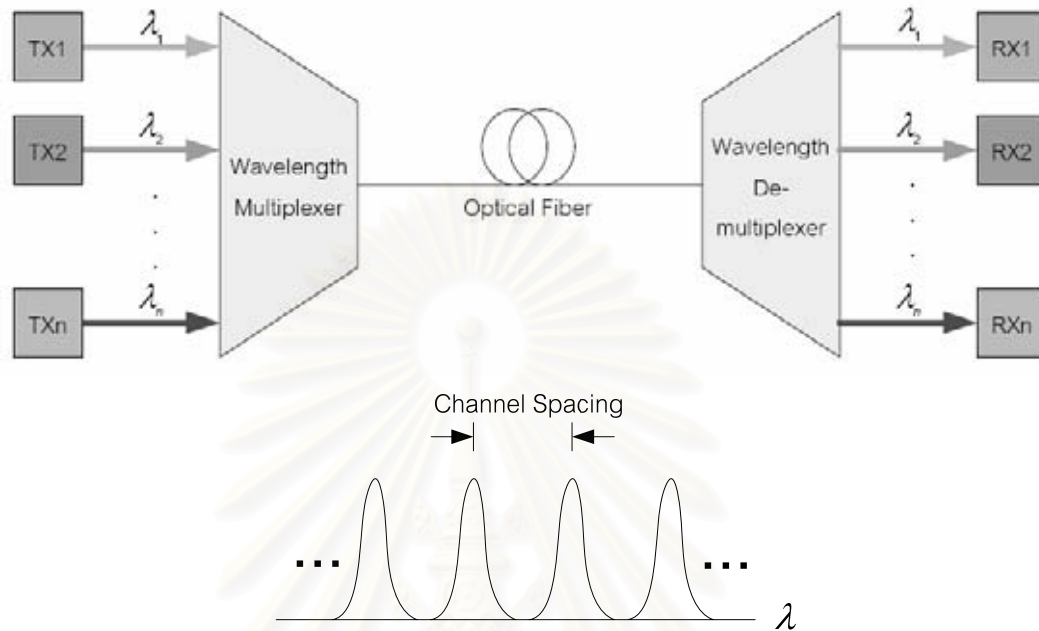
## 2.3 การรับส่งสัญญาณแสงหลายความยาวคลื่น

เนื่องจากเส้นใยนำแสงมีแบนด์วิดท์ในการใช้งานที่กว้างมากตามที่ได้กล่าวมาแล้ว ทำให้มีแนวความคิดที่จะส่งสัญญาณแสงหลายความยาวคลื่นสำหรับแต่ละช่องสัญญาณไปพร้อมกันบนเส้นใยนำแสง โดยจะใช้แสง 1 ความยาวคลื่นต่อ 1 ช่องสัญญาณ ในช่วงแรกเทคโนโลยี WDM นี้ถูกเรียกกันว่า Wideband WDM เนื่องจากสัญญาณข้อมูลแต่ละช่องสัญญาณจะอยู่ห่างกันมาก ต่อมาจึงได้มีการพัฒนาให้ช่องว่างระหว่างความยาวคลื่นนี้แคบลงเรียกว่า Narrowband WDM เพื่อรองรับปริมาณช่องสัญญาณได้มากขึ้นกว่าเดิม และในปัจจุบันเทคโนโลยีการรับส่งสัญญาณแสงหลายความยาวคลื่นแบบหนาแน่น (Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM) ก็ได้พัฒนาขึ้น ซึ่งจะสามารถส่งสัญญาณออกไปได้พร้อมกัน 16-160 ช่องสัญญาณ โดยมีช่องว่างสัญญาณอยู่ที่ 200 GHz, 100 GHz, 50 GHz, 25 GHz และ 12.5 GHz ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1 [15]

### 2.3.1 องค์ประกอบของระบบการรับส่งสัญญาณแสงหลายความยาวคลื่น

องค์ประกอบของระบบ WDM ประกอบด้วย (1) ตัวส่งสัญญาณทางแสง (Optical Transmitters, Txn) หลายช่องสัญญาณ ที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกัน (2) ตัวมัลติเพลกซ์ความยาวคลื่น (Wavelength Multiplexer) (3) เส้นใยนำแสง (Optical Fiber) (4) ตัวดีมัลติเพลกซ์

ความยาวคลื่น (Wavelength De-multiplexer) และ (5) ตัวรับสัญญาณทางแสง (Optical Receivers, RXn) เพื่อตรวจรับข้อมูลในแต่ละช่องสัญญาณ



รูปที่ 2.10 การรับส่งสัญญาณแสงหลายความยาวคลื่นบนเส้นใยนำแสง

จากรูปที่ 2.10 ตัวส่งสัญญาณทางแสงแต่ละช่องสัญญาณสร้างสัญญาณทางแสงความยาวคลื่นแตกต่างกัน ข้อมูลทางแสงของแต่ละช่องสัญญาณนี้จะมารวมกันด้วยตัวมัลติเพลกซ์ทางความยาวคลื่น (Wavelength Multiplexer) ทำให้ปริมาณข้อมูลสูงมากขึ้น ส่งผ่านเส้นใยนำแสงเพียงเส้นเดียวด้วยอัตราข้อมูลสูง เมื่อถึงปลายทางแยกสัญญาณด้วยตัวดีมัลติเพลกซ์ความยาวคลื่น (Wavelength De-multiplexer) ก่อนออกสู่ตัวรับของแต่ละช่องสัญญาณ การรับส่งสัญญาณแบบ WDM นี้ ยังมีระยะระหว่างช่องสัญญาณ (Channel spacing) แคบมากเท่าไร ก็จะทำให้สามารถส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสงได้หลายช่องสัญญาณมากขึ้นเท่านั้น ซึ่งเรียกได้ว่าเป็นการเพิ่มปริมาณการส่งข้อมูลมากยิ่งขึ้น แต่ก็จะมีปัญหาสำคัญคือการรบกวนกันระหว่างช่องสัญญาณด้านข้างก็จะมากขึ้นด้วย

WDM และ DWDM ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานเชื่อมโยงโครงข่ายต่างๆ ในปัจจุบันมากยิ่งขึ้น เนื่องจากปริมาณข้อมูลที่เพิ่มสูงมาก ซึ่งในประเทศไทยนั้นได้มีการนำมาใช้ในเครือข่าย Backbone สำหรับเชื่อมต่อระหว่างเครือข่ายไร้สายของผู้ให้บริการมือถือรายต่างๆ หรือโครงข่ายหลักภายในองค์กรใหญ่ๆ เช่น กสท, TOT, สยามบิณสูวรรณภูมิ เป็นต้น

จากข้อดีในการรับส่งสัญญาณแบบหลายความยาวคลื่นจะทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพและปริมาณการรับส่งสัญญาณข้อมูล งานวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ค้นคว้าและทดลองการสื่อสารด้วยเทคโนโลยี WDM โดยมีระยะระหว่างความยาวคลื่นเท่ากับ 100 GHz (ประมาณ 0.8 nm) สอดคล้องกับมาตรฐาน ITU-T G.694.1 [15] มีความถี่อ้างอิงที่ 193.1 THz หรือที่ความยาวคลื่น 1552.524 nm โดยให้มีคุณลักษณะสัญญาณแสงขาออกเป็นไปสอดคล้องกับมาตรฐานระบบการรับส่งสัญญาณช่องสัญญาณเดี่ยว (Single-channel system) ITU-T G.691 [16] และระบบการรับส่งสัญญาณหลายช่องสัญญาณ (Multichannel system) ITU-T G.692 [5]

## 2.4 การควบคุมอุณหภูมิของเลเซอร์

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในอุปกรณ์แหล่งกำเนิดแสงและตัวรับแสงส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะสมบัติในช่วงการทำงานของอุปกรณ์ ซึ่งทำให้เสถียรภาพของระบบลดลง ในอุปกรณ์เลเซอร์ไดโอดนั้น คุณลักษณะที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิก็คือ ความยาวคลื่นที่เปล่งแสง กระแสค่าขีดเริ่มเปลี่ยน และช่วงเวลาชีวิตที่ทำงาน โดยจะเป็นฟังก์ชันขึ้นกับอุณหภูมิในขณะนั้น สำหรับเลเซอร์ชนิด DFB ที่ใช้ในการสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงนั้น ทำงานในช่วงความยาวคลื่น 1550 nm ด้วยกำลัง 20 mW ความยาวคลื่นจะเลื่อน  $0.11 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$  และกระแสขีดเริ่มเปลี่ยนจะเลื่อนเฉลี่ย  $0.2 \text{ mA}/^{\circ}\text{C}$  นอกจากนี้ช่วงชีวิตการทำงานจะถูกลดลงสองเท่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการทำงานทุกๆ  $25^{\circ}\text{C}$  [17]

เมื่อนำเลเซอร์ไปใช้ในการรับส่งสัญญาณทางแสงในระบบ WDM ผลของอุณหภูมิที่ทำให้ความยาวคลื่นแสงของเลเซอร์เปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ไม่สามารถส่งสัญญาณหลายความยาวคลื่นแสงบนเส้นใยนำแสงเดียวกันได้ เพราะสัญญาณข้อมูลทางแสงในแต่ละความยาวคลื่นจะแกว่งและรบกวนกัน

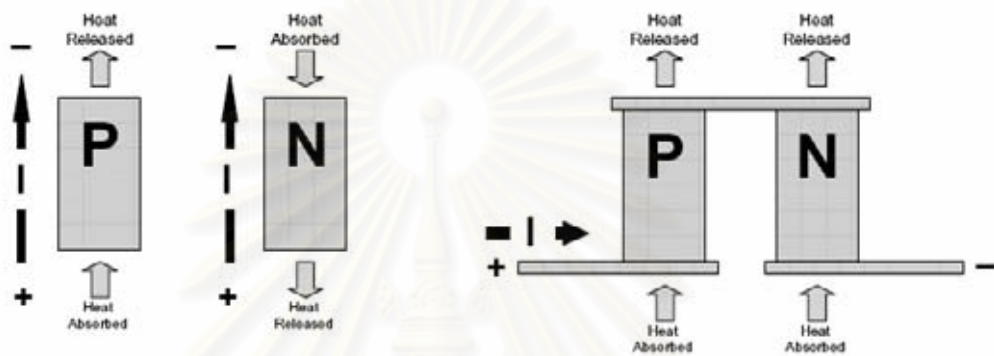
### 2.4.1 อุปกรณ์ที่ช่วยในการควบคุมอุณหภูมิเลเซอร์

อุปกรณ์ที่นำมาช่วยในการควบคุมอุณหภูมิของเลเซอร์นั้นมี 2 ชนิดด้วยกันคือ (1) Thermoelectric และ (2) Thermistor โดยส่วนใหญ่แล้ว จะประกอบอุปกรณ์ทั้งสองชนิดนี้ลงในแพ็คเกจเดียวกันกับเลเซอร์

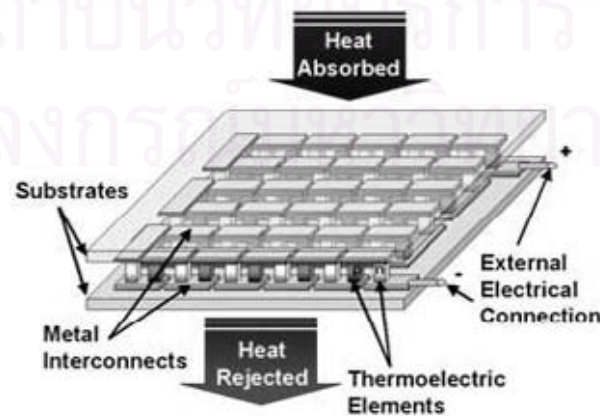
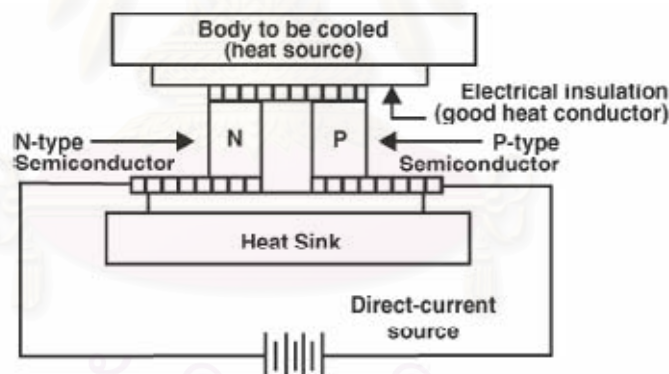
1) Thermoelectric Cooler (TEC) โดยที่ Thermoelectric หรือ Peltier เป็นอุปกรณ์ที่เข้ามาช่วยแก้ปัญหาความถูกต้องของอุณหภูมิโดยจะนำมาประยุกต์เข้ากับอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เช่น เลเซอร์ โดย Thermoelectric นี้เป็น solid-state ที่สามารถทำให้ไหลขนาดเล็กร้อนขึ้นหรือเย็นลงได้มากกว่า  $60^{\circ}\text{C}$  จากอุณหภูมิโดยรอบ โดยจะมีความเสถียรดีกว่า

0.001 °C เพราะคุณสมบัติของอุปกรณ์ชนิดนี้จึงทำให้ตัว TEC ถูกนำมาประกอบเข้ากับ เลเซอร์ไดโอดมาตรฐานโดยทั่วไป ทำให้สามารถควบคุมความยาวคลื่นแสงให้เป็นไปตามที่ ต้องการได้

ในปี 1834 Jean C. Peltier ได้ใช้กระแสไฟฟ้าผ่านรอยต่อระหว่างโลหะที่แตกต่างกันสอง ชนิดหรือสารกึ่งตัวนำ (ชนิด P กับ N) แล้วพบว่า สามารถดูดหรือคายความร้อนที่บริเวณรอยต่อได้ ขึ้นอยู่กับทิศทางของกระแสที่ไหล ดังรูปที่ 2.11 เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Peltier Effect ซึ่งเป็น ปรากฏการณ์พื้นฐานของอุปกรณ์ Thermoelectric [18]



รูปที่ 2.11 คู่ต่อสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการดูดหรือคายความร้อน



รูปที่ 2.12 คู่ต่อ TEC [19]

ปัจจุบันคู่ต่อ TEC นิยมทำจากสารกึ่งตัวนำที่โด๊ปเข้มข้น (ส่วนใหญ่ใช้ Bismuth Telluride) ซึ่งต่ออนุกรมกันทางไฟฟ้าและต่อขนานกันทางอุณหภูมิจากรูปที่ 2.12 ความร้อนจะถูกดูดจากด้านบนที่ต้องการให้เย็นลงส่งผ่านไปยังด้านล่างที่มีตัวระบายความร้อนด้วยอัตราที่เป็นสัดส่วนกันกับกระแสที่ผ่านคู่ต่อนั้น ซึ่งปรากฏการณ์นี้สามารถคูณเพิ่มได้ด้วยการเพิ่มจำนวนคู่ต่อที่ใช้ในโมดูลได้

โมดูลของ TEC ที่นิยมใช้นั้นประกอบด้วย 12 คู่ต่อ โดยมีอัตราการส่งผ่านความร้อนจากผิวด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนคู่ต่อ กระแสที่ผ่านรอยต่อ อุณหภูมิเฉลี่ยของโมดูล และอุณหภูมิที่แตกต่างกัน บางครั้ง TEC อาจสามารถรับความแตกต่างของอุณหภูมิได้มากถึง  $60^{\circ}\text{C}$  ด้วย อย่างไรก็ตามควรคำนึงถึงปัจจัยภายในและภายนอกที่เป็นขีดจำกัดของ TEC ด้วย เช่นความแตกต่างของอุณหภูมิก็นส่งผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทพลังงานความร้อน ดังรูปที่ 2.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความร้อนที่ปั๊มกับกระแสขับ โดยพลังงานความร้อนที่ปั๊มจะลดลงเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิสูงขึ้น

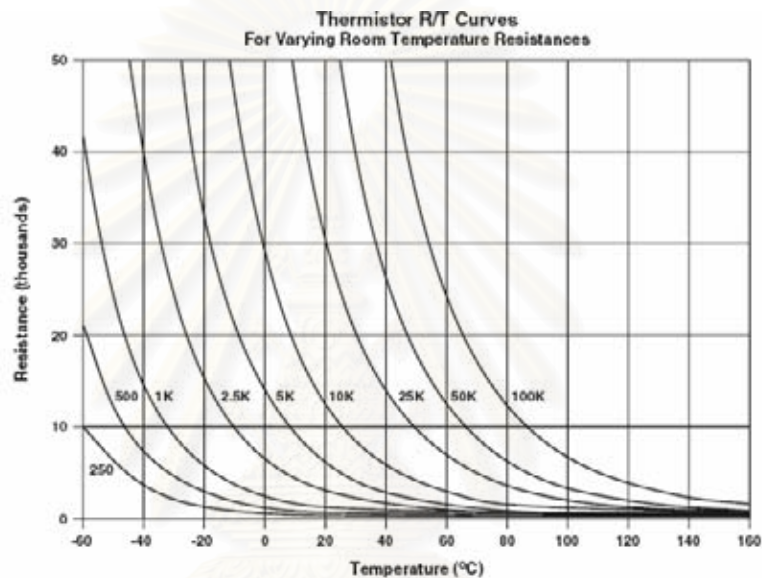


รูปที่ 2.13 ประสิทธิภาพในการปั๊มพลังงานความร้อนต่อกระแสขับ

ส่วนประกอบในการควบคุมอุณหภูมิประกอบด้วยสามส่วนหลักด้วยกันคือ Heat Sink ซึ่งเป็นส่วนที่พยายามทำให้พื้นผิวของตัวมันเองมีอุณหภูมิต่ำที่เท่ากับอุณหภูมิห้องอยู่ตลอดเวลา ส่วนต่อมาคือ TEC ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวปั๊มความร้อนโดยขึ้นอยู่กับกระแสที่ขับ และส่วนสุดท้ายคือ Thermal Load ซึ่งก็คือส่วนที่สร้างความร้อนในที่นี้คือเลเซอร์ไดโอดนั่นเอง

2) Thermistor ใช้เป็นตัวตรวจจับอุณหภูมิของเลเซอร์ ซึ่งโดยส่วนมากแล้วตัวตรวจจับอุณหภูมิที่ใช้ในเลเซอร์ไดโอดจะใช้ตัวต้านทานที่แปรผันตามค่าความต้านทานอุณหภูมิมี่ชื่อเรียกกันว่า Thermistor ซึ่งจะประกอบรวมอยู่ในแพ็คเกจเดียวกันกับเลเซอร์ Thermistor มีข้อดีคือ

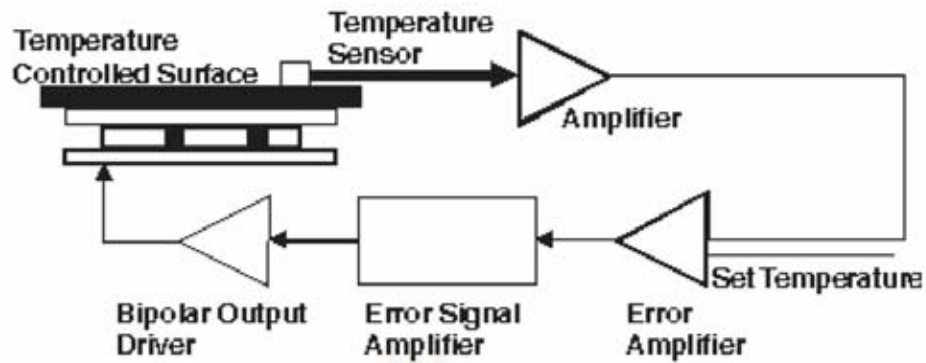
ราคาถูกหาซื้อได้ง่าย แม่นยำ ตอบสนองรวดเร็ว ง่ายต่อการใช้งาน แต่มีข้อเสียคือความต้านทานของตัว Thermistor จะแปรผันตามอุณหภูมิแบบไม่เป็นเส้นตรง (Nonlinear) อย่างไรก็ตามเนื่องจากการทำงานจะควบคุมให้อุณหภูมิคงที่ที่จุดๆหนึ่ง ปัญหานี้จึงไม่ส่งผลกระทบต่อระบบที่ใช้ Thermistor จึงเป็นที่นิยมใช้เป็นตัวตรวจวัดอุณหภูมิเลเซอร์ไดโอด โดยคุณลักษณะความต้านทานของ Thermistor ต่ออุณหภูมิจะเป็นดังรูปที่ 2.14 ยกตัวอย่างเช่น Thermistor ขนาด 10 kohms ที่ความร้อนมากกว่า 25 องศา ความต้านทานจะมีค่าต่ำกว่า 10 kohms และที่ความร้อนน้อยกว่า 25 องศา ก็จะมีค่าความต้านทานมากกว่า 10 kohms เป็นต้น [20]



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานและอุณหภูมิของ Thermistor

#### 2.4.2 วงจรป้อนกลับที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิเลเซอร์

การควบคุมอุณหภูมิด้วยตัวโมดูล TEC จำเป็นต้องใช้การควบคุมที่มีวงจรรป้อนกลับ (Feedback loop) ดังรูปที่ 2.15 องค์ประกอบในวงจะประกอบด้วย ตัวตรวจจับอุณหภูมิ (Temperature sensor) ตัวขยายสัญญาณ (Amplifier) ตัวขยายขนาดความคลาดเคลื่อน (Error Amplifier) ตัวประมวลผลสัญญาณความคลาดเคลื่อน (Error Signal Amplifier or Processor) และตัวขับสัญญาณขาออกแบบไบโพลาร์ (Bipolar Output Driver) เมื่อตัวตรวจจับอุณหภูมิวัดระดับอุณหภูมิของอุปกรณ์ อุณหภูมิที่วัดได้จะนำไปเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้เพื่อหาอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ความแตกต่างนี้ไปสร้างสัญญาณ จากนั้นก็จะถูกประมวลผลเพื่อเป็นสัญญาณไปควบคุมตัวขับสัญญาณขาออกแบบไบโพลาร์ซึ่งต่อเข้ากับตัว TEC



รูปที่ 2.15 วงจรป้อนกลับในการควบคุมอุณหภูมิของเลเซอร์

ในงานวิจัยครั้งนี้ ส่วนของ TEC และ Thermistor ได้มีประกอบเข้ากับแพ็คเกจของเลเซอร์ EML (จะกล่าวในหัวข้อ 3.4) อยู่แล้ว และในส่วนตัวขยายสัญญาณ วงจรควบคุมแบบป้อนกลับ รวมทั้งส่วนที่ใช้ในการตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการจะอยู่ที่อุปกรณ์ Temperature Controller (จะกล่าวในหัวข้อ 3.2)

เมื่อความต้านทานของ Thermistor มีค่าสูงกว่าความต้านทานที่ตั้งไว้บนอุปกรณ์ Temperature controller วงจรควบคุมแบบป้อนกลับจะส่งกระแสไฟฟ้าติดลบป้อนกลับไปยังตัว TEC เพื่อให้เลเซอร์ที่เย็นอยู่นั้นร้อนขึ้น เมื่อเลเซอร์ร้อนขึ้น ค่าความยาวคลื่นแสงขาออกจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่มีความยาวคลื่นสูงขึ้น ประมาณ  $0.1 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$  ในทางกลับกันเมื่อเลเซอร์ร้อนเกินไป ตัว Thermistor ที่วัดอุณหภูมิเลเซอร์จะมีค่าต่ำกว่าความต้านทานที่ตั้งไว้บนอุปกรณ์ Temperature controller วงจรควบคุมแบบป้อนกลับก็จะส่งกระแสไฟฟ้าค่าบวกป้อนกลับไปยังตัว TEC เพื่อให้เลเซอร์เย็นลง

## 2.5 การผิดเพี้ยนของสัญญาณเมื่อผ่านเส้นใยนำแสง

การผิดเพี้ยนของสัญญาณเมื่อผ่านเส้นใยนำแสงเกิดจากสาเหตุ 2 ประการด้วยกันคือ (1) การลดทอนและ (2) การกระจายโครมาติก ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ 2.5.1 และ 2.5.2 ตามลำดับ

### 2.5.1 การลดทอน (Attenuation)

เมื่อแสงเดินทางผ่านเส้นใยนำแสงจะเกิดปรากฏการณ์การลดทอนกำลังขึ้น กำลังแสงจะถูกลดทอนลงอย่างรวดเร็วตามระยะทางโดยแปรผันแบบเลขชี้กำลัง โดยกลไกการลดทอนในเส้นใยนำแสงมีพื้นฐานมาจาก 3 ปรากฏการณ์ คือ การดูดกลืน (Absorption) การกระเจิง (Scattering) และการสูญเสียจากการแผ่รังสี (Radiative losses) [8]



กำหนดให้  $P(0)$  เป็นกำลังแสงในเส้นใยนำแสงที่จุดเริ่มต้นที่ระยะทาง  $Z = 0$  จะได้กำลังแสงหลังจากที่แสงเดินทางไปเป็นระยะทาง  $Z$  เป็นดังสมการที่ (2.2) [8]

$$P(z) = P(0) \cdot 10^{-\frac{\alpha z}{10}} \quad (2.2)$$

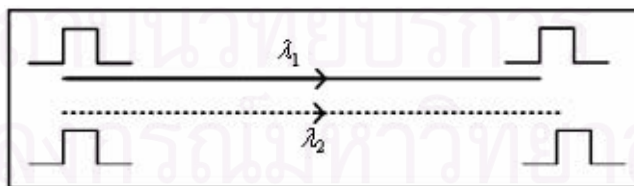
ซึ่ง  $\alpha$  คือ ค่าการลดทอนกำลังของเส้นใยนำแสงในหน่วย dB/km โดยที่ค่านี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าความยาวคลื่นแสงที่ใช้ส่งสัญญาณ

### 2.5.2 การกระจายโครมาติก (Chromatic dispersion)

การกระจายโครมาติกคือการขยายกว้างออกของพัลส์แสงตามความยาวคลื่นในขณะที่พัลส์แสงเดินทางไปตามเส้นใยนำแสง สาเหตุเกิดจากการที่แหล่งกำเนิดแสงปล่อยแสงออกมาหลายความยาวคลื่น ซึ่งแต่ละความยาวคลื่นจะมีค่าความเร็วกลุ่ม (Group Velocity) ไม่เท่ากัน จึงไปถึงปลายทางไม่พร้อมกันทำให้พัลส์แสงขยายออก ปรากฏการณ์นี้เป็นที่รู้จักกันในอีกชื่อหนึ่งคือการกระจายตามความเร็วกลุ่ม (Group Velocity Dispersion, GVD) เนื่องจากการกระจายเป็นผลของความเร็วกลุ่มซึ่งเป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น นั่นก็คือการกระจายโครมาติกขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นนั่นเอง ดังนั้นถ้าความกว้างสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงเพิ่มขึ้นการบิดเพี้ยนของสัญญาณเนื่องจากการกระจายนี้ก็เพิ่มขึ้นด้วย

สาเหตุหลักของการกระจายโครมาติกมาจาก 2 แหล่งคือ (1) วัสดุที่ใช้ผลิตเส้นใยนำแสง และ (2) รูปแบบท่อนำคลื่น

#### 1) การกระจายเชิงวัสดุ (Material Dispersion)

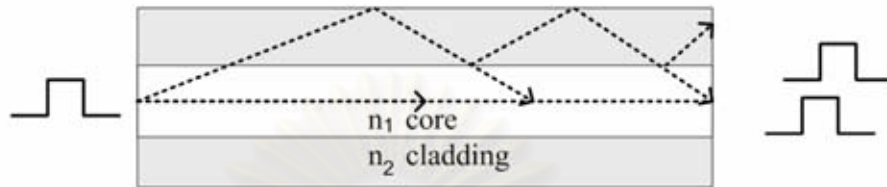


รูปที่ 2.16 การขยายกว้างออกของพัลส์แสงเนื่องจากการกระจายเชิงวัสดุ

การกระจายเชิงวัสดุเกิดขึ้นจากการที่ค่าดัชนีหักเห (Refractive Index) ของวัสดุแกนกลางมีค่าต่างกันตามฟังก์ชันของความยาวคลื่นแสงที่เดินทางผ่าน จึงทำให้ความเร็วของแสงในเส้นใยนำแสงแตกต่างกันตามความยาวคลื่น ขณะเดียวกันแสงที่มาจกแหล่งกำเนิดแสงจะมีความกว้างของสเปกตรัม ก็คือจะมีช่วงความยาวคลื่นไม่เพียงแค่ว่าความยาวคลื่นเดียว ทำให้เกิด

การกระจายของพัลส์ที่ประกอบด้วยความยาวคลื่นแตกต่างกันเดินทางบนเส้นทางที่เท่ากัน  
ลักษณะการกระจายเชิงวัสดุแสดงดังรูปที่ 2.16

## 2) การกระจายเชิงท่อนำคลื่น (Waveguide Dispersion)



รูปที่ 2.17 การขยายกว้างออกของพัลส์แสงเนื่องจากการกระจายท่อนำคลื่น

การกระจายเชิงท่อนำคลื่นเกิดขึ้นเพราะกำลังงานทางแสงถูกแบ่งปันระหว่างในแกนกลาง (Core) และในวัสดุหุ้ม (Cladding) ประมาณ 80 ต่อ 20 เปอร์เซ็นต์ การกระจายเกิดขึ้นเนื่องจากการแพร่ของแสง 20 เปอร์เซ็นต์ในวัสดุหุ้ม ซึ่งจะเดินทางได้เร็วกว่าแสงในแกนกลางอันเนื่องจากค่าดัชนีหักเหที่น้อยกว่าโดยขึ้นกับความยาวคลื่นแสงที่เลือกใช้ด้วย ระดับการแพร่กระจายเชิงท่อนำคลื่นสามารถถูกปรับเปลี่ยนให้มากขึ้นหรือน้อยลงได้ ขึ้นอยู่กับการออกแบบเส้นใยนำแสง ลักษณะการกระจายเชิงท่อนำคลื่นแสดงดังรูปที่ 2.17

ค่าการกระจายโครมาติก (D) ที่เกิดจากการกระจายเชิงวัสดุและท่อนำคลื่นที่กล่าวมาข้างต้นนี้สามารถหาได้จากสมการที่ (2.3) (มีหน่วยเป็น ps/nm/km)

$$D = \frac{1}{L} \frac{d\tau_g}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda} \left( \frac{1}{v_g} \right) = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (2.3)$$

- ซึ่ง
- L = ระยะทางทั้งหมดที่แสงเดินทาง
  - $\tau_g$  = เวลาหน่วง (Delay Time) หรือการหน่วงแบบกลุ่ม (Group Delay)
  - $\lambda$  = ค่าความยาวคลื่นของแสง
  - $v_g$  = ค่าความเร็วกลุ่ม (Group Velocity)
  - c = ค่าความเร็วแสง
  - $\beta_2 = \frac{d^2\beta}{d^2\omega}$

เมื่อจัดเรียงสมการใหม่จะได้ค่าการกระจายออกของพัลส์เนื่องจากการกระจายโครมาติก ( $t_{\text{GVD}}$ ) ดังสมการที่ (2.4)

$$t_{\text{GVD}} = DL\sigma_{\lambda} \quad (2.4)$$

ซึ่ง  $L$  = ระยะทางทั้งหมดที่แสงเดินทาง  
 $\sigma_{\lambda}$  = ความกว้างสเปกตรัม (Spectral Width)

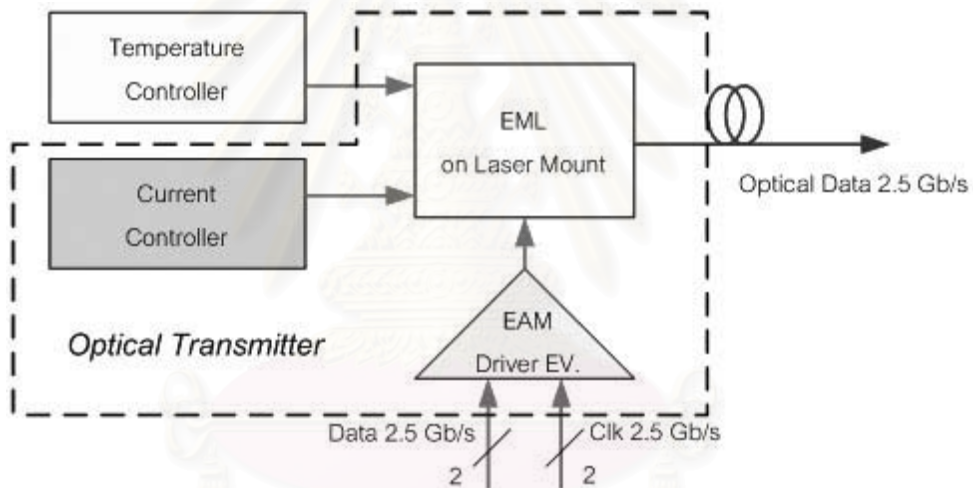
การกระจายโครมาติกนี้นำมาซึ่งขีดจำกัดของอัตราความเร็วสูงสุดที่สามารถส่งได้ในระบบ เนื่องจากการกระจายโครมาติกทำให้สัญญาณแสงที่ส่งกระจายออก โดยแปรผันตรงกับระยะทางส่งและความกว้างของสเปกตรัมแสง ส่งผลให้เกิดการเหลื่อมทับกันของบิตข้อมูลที่อยู่ติดกันจนเกิดปัญหาการรบกวนกันของสัญญาณที่ตัวรับสัญญาณทางแสงเมื่ออัตราความเร็วเพิ่มมากขึ้น วิธีแก้ไขโดยทั่วไปทำโดยการส่งสัญญาณแสงผ่านเส้นใยนำแสงแบบชดเชยดิสเพอร์ชัน (Dispersion Compensation Fiber, DCF) สลับกันกับเส้นใยนำแสงแบบปกติเป็นระยะๆ

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3

#### การออกแบบวงจร

วงจรตัวส่งสัญญาณทางแสงด้วยเลเซอร์ที่มีมอดูเลเตอร์ชนิดดูดกลืนคลื่นไฟฟ้าอยู่ภายใน ด้วยอัตราข้อมูล 2.5 Gb/s มีส่วนประกอบดังรูปที่ 3.1 อุปกรณ์ที่จะเลือกใช้ในการเชื่อมต่อเพื่อส่งสัญญาณทางแสงประกอบด้วย (1) ตัวขับมอดูเลเตอร์ชนิดดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า (Electro-Absorption Modulator, EAM) (2) ตัวควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) (3) ตัวควบคุมกระแส (Current controller) และ (4) ตัวเลเซอร์ที่มีมอดูเลเตอร์ชนิดดูดกลืนคลื่นไฟฟ้าอยู่ภายใน (EML) ตัวส่งสัญญาณทางแสงชนิดนี้จะมีความสามารถส่งสัญญาณแสงด้วยความเร็ว 2.5 Gb/s ผ่านเส้นใยนำแสงได้



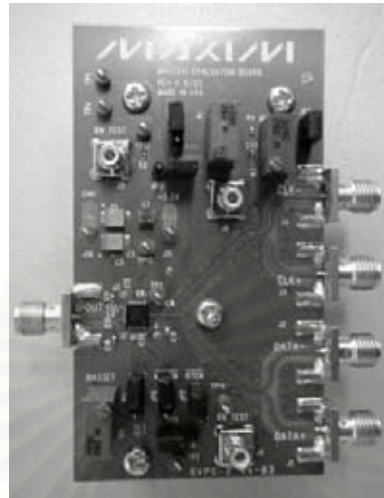
รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงส่วนประกอบตัวส่งสัญญาณทางแสง

#### 3.1 ตัวขับมอดูเลเตอร์ชนิดดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า

อุปกรณ์ที่เลือกใช้เป็นวงจรรวม (Integrated Circuit, IC) โมดูล MAX3941 ของบริษัท MAXIM โดยมีคุณสมบัติในการขยายสัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้าให้มีขนาดใหญ่เพียงพอในการขับ EAM ที่อัตราการส่งข้อมูลความเร็ว 2.5 Gb/s ในขั้นตอนแรกได้นำชุดบอร์ดประเมิน (Evaluation board) มาใช้ก่อนที่จะนำชิป MAX3941 นี้ไปประยุกต์ใช้ต่อไปเพื่อออกแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงในบทที่ 4

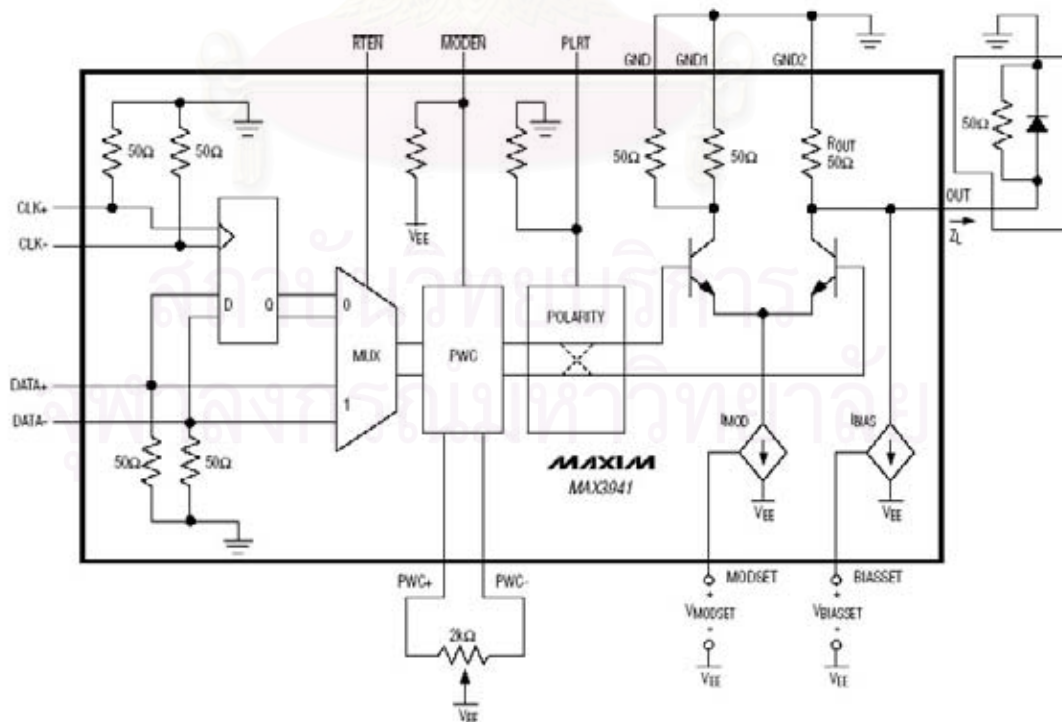
ชุดบอร์ดประเมินวงจรตัวขับ EAM นั้นจะรับสัญญาณขาเข้า 4 ช่องทาง คือ DATA  $\overline{\text{DATA}}$  CLK และ  $\overline{\text{CLK}}$  ส่วนสัญญาณขาออกมี 1 ช่องทาง ต้องการไฟเลี้ยง  $-5.2 \text{ V}$  ดังรูปที่ 3.2 ป้อน

สัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้าขนาด  $0.2\text{--}1.6\text{ V}_{p-p}$  วงจรไบแอสภายในสามารถขยายกระแสไบแอสได้  $0\text{--}50\text{ mA}$  เทียบเท่ากับแรงดันไบแอสเท่ากับ  $0\text{--}1.25\text{ V}$  ที่โหลด  $50\text{ โอห์ม}$



รูปที่ 3.2 บอร์ดวงจร EAM Driver Evaluation Board ของบริษัท MAXIM

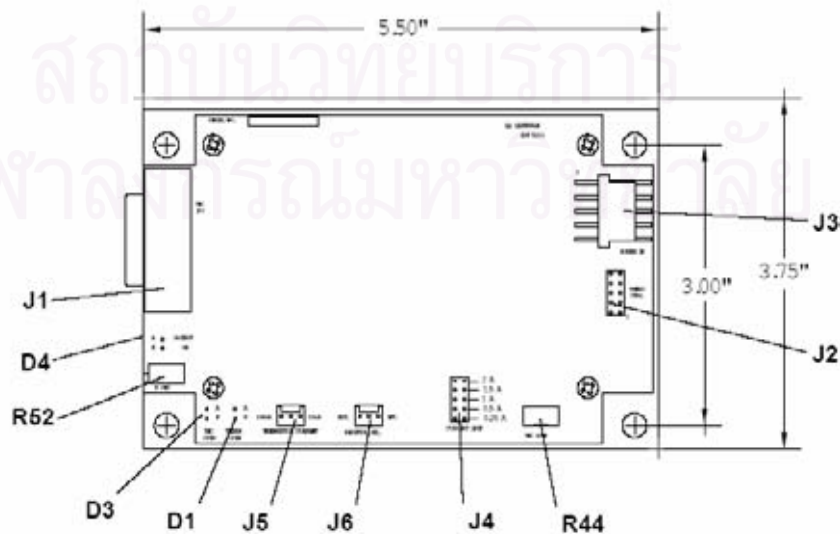
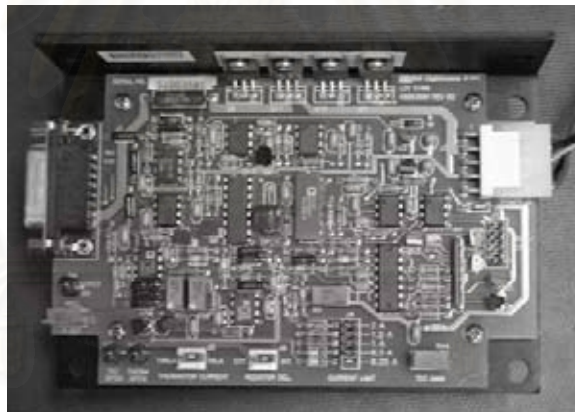
นอกจากนี้วงจรสามารถปรับกระแสหลอดได้ตั้งแต่  $40\text{ mA}_{p-p}$  ถึง  $120\text{ mA}_{p-p}$  เทียบเท่ากับแรงดันหลอดตั้งแต่  $1\text{ V}_{p-p}$  ถึง  $3\text{ V}_{p-p}$  ซึ่งด้วยค่าแรงดันหลอดดังกล่าวก็มากเพียงพอในการใช้ขับตัว EAM และมีความเร็วขอบ (Edge Speed) ที่ 20% ถึง 80% ของสัญญาณ มีค่าประมาณ  $23\text{--}32\text{ ps}$  วงจรภายในของตัวขับ EAM เป็นดังรูปที่ 3.3 [21]



รูปที่ 3.3 แผนภาพวงจรภายในของตัวขับ EAM ที่ใช้ในการทดลอง

### 3.2 ตัวควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมให้อุณหภูมิของเลเซอร์มีค่าคงที่ เพราะผลของอุณหภูมิจะทำให้คุณลักษณะของเลเซอร์เปลี่ยนไป เมื่อมีตัวควบคุมอุณหภูมิจะทำให้สามารถควบคุมความยาวคลื่นแสงของเลเซอร์ได้ ตัวควบคุมอุณหภูมิที่เลือกใช้นั้นคือโมดูล LDT-5100 มาจากบริษัท ILX Lightwave โดยมีหลักการควบคุมอุณหภูมิดังนี้ เริ่มต้นด้วยการวัดอุณหภูมิได้จาก Thermistor ที่มีอยู่แล้วภายในตัว EML (จะกล่าวในหัวข้อ 3.4) ต่อเข้ามาที่ขา Thermistor+ และ Thermistor- ของตัวควบคุมอุณหภูมิ คุณสมบัติของ Thermistor คือ จะมีค่าความต้านทานต่ำที่อุณหภูมิสูง และมีค่าความต้านทานสูงที่อุณหภูมิต่ำ จากค่าความต้านทานที่วัดได้จะถูกแปลงเป็นฟังก์ชันของกระแส เพื่อนำความต้านทานที่วัดได้ไปเทียบกับความต้านทานที่ตั้งไว้บนบอร์ดควบคุมอุณหภูมิ จากนั้นจะประมวลผลก่อนที่จะป้อนกระแสกลับไปที่ขา TEC+ และ TEC- ของ EML ในกรณีส่งกระแสบวก TE ตัว TEC จะดูดความร้อนจากเลเซอร์ลงสู่ตัวระบายความร้อน (Heat sink) เลเซอร์จะเย็นลง ส่งผลให้ความยาวคลื่นแสงขาออกจากเลเซอร์สั้นลงด้วย และในกรณีส่งกระแสลบ TE ตัว TEC จะคายความร้อนจากตัวระบายความร้อนสู่เลเซอร์ เลเซอร์จะร้อนขึ้น ส่งผลให้ความยาวคลื่นแสงขาออกจากเลเซอร์ยาวขึ้น [22]



รูปที่ 3.4 ตัวควบคุมอุณหภูมิ โมดูล LDT-5100 ของบริษัท ILX Lightwave

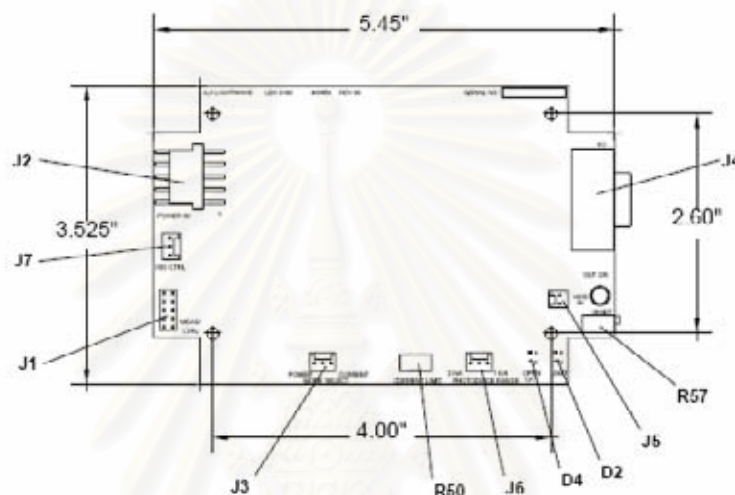
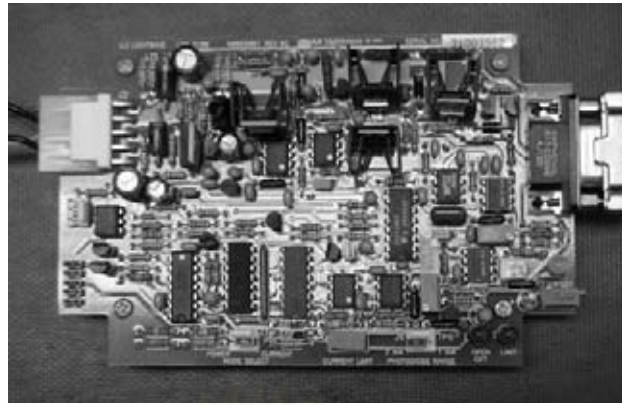
ในการทดลอง จำเป็นต้องป้อนไฟเลี้ยงให้กับตัวควบคุมอุณหภูมิ 3 ค่าดังนี้ +15V -15V และ +5.2V ตัวควบคุมอุณหภูมิจะสร้างกระแส 2 ชนิด คือกระแสเพื่อผ่าน Thermistor กับกระแส TE เพื่อผ่านตัว TEC กระแสที่ผ่านตัว Thermistor กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 100  $\mu$ A ส่วนกระแส TE ที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิของเลเซอร์นั้น ตามคุณลักษณะของ TEC นั้นสามารถที่จะป้อนกระแสลบ เพื่อให้เลเซอร์ร้อนขึ้นได้มากที่สุดคือ -0.5 A ซึ่งจะทำให้ค่าความยาวคลื่นแสงเพิ่มขึ้นด้วย ในทางตรงกันข้ามสามารถที่จะป้อนกระแสบวก เพื่อให้เลเซอร์เย็นลงได้มากที่สุด 1.3 A ซึ่งจะทำให้ค่าความยาวคลื่นแสงลดลงด้วย ดังนั้นเราสามารถที่จะปรับอุณหภูมิของตัวเลเซอร์ได้ ส่งผลให้ความยาวคลื่นของเลเซอร์มีค่าคงที่ตามที่ต้องการได้

การเชื่อมต่อระหว่างตัวควบคุมอุณหภูมิกับตัว EML โดยใช้สายเคเบิล CC-505 TEC Interconnect Cable [23] ซึ่งเป็นหัวต่อชนิด 15 pin D-sub จากนั้นปรับตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้คือ R52 ที่บอร์ดตัวควบคุมอุณหภูมิพร้อมทั้งวัดค่ากระแส TE ที่ออกจากขาออก TE+ และ TE- ด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์ ในขณะที่ปรับค่าความต้านทาน โดยจะปรับให้ช่วงของกระแส TE อยู่ระหว่าง -0.5 A ถึง 1.3 A ตามขีดความสามารถของเลเซอร์ ถ้าป้อนกระแสไฟเพิ่มมากขึ้น ความยาวคลื่นแสงที่ออกมาจาก EML จะสั้นลงตามลำดับ จากนั้นปรับอุณหภูมิให้คงที่ที่ความยาวคลื่นที่ต้องการคือ 1551.72 nm เพื่อให้สอดคล้องตาม ITU-grid ของระบบ WDM

### 3.3 ตัวควบคุมกระแส (Current Controller)

ตัวควบคุมกระแสมีไว้เพื่อควบคุมให้กำลังแสงที่ผลิตออกจากเลเซอร์มีค่าคงที่ ไม่ดูลที่เลือกใช้ คือ LDX-3100 ของบริษัท ILX Lightwave ดังรูปที่ 3.5 ตัวควบคุมกระแสนี้สามารถรับค่ากระแสได้ตั้งแต่ 0 mA ถึง 250 mA และสามารถควบคุมค่ากระแสขีดจำกัดได้ตั้งแต่ 0 ถึง 270 mA [24]

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



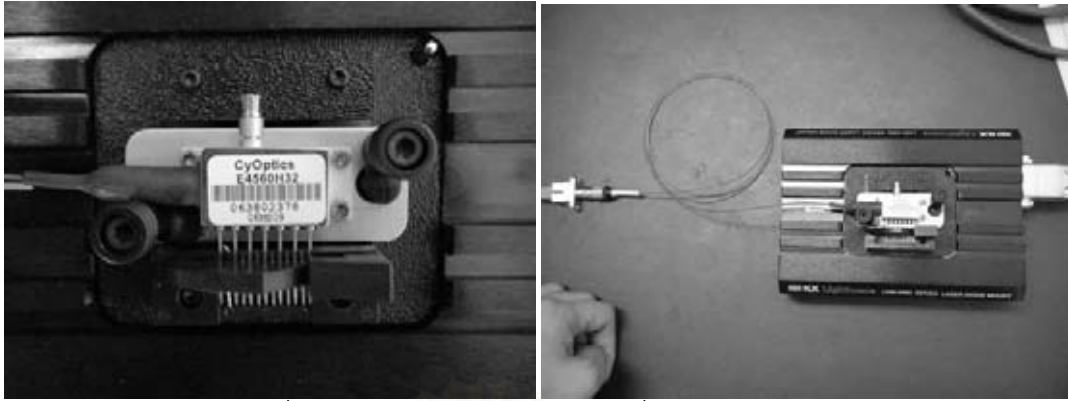
รูปที่ 3.5 ตัวควบคุมกระแส โมดูล LDX-3100 ของบริษัท ILX Lightwave

ในการทดลองจำเป็นต้องป้อนไฟเลี้ยง  $+15V$  และ  $-15V$  ให้กับตัวควบคุมกระแส ตัวควบคุมกระแสจะมีโหมดการทำงาน 2 โหมดคือ โหมดควบคุมกระแส และโหมดควบคุมกำลังไฟฟ้า ตั้งโหมดการทำงานให้อยู่ที่การควบคุมกระแสเพื่อที่จะควบคุมกระแสที่ป้อนให้กับเลเซอร์ให้มีค่าคงที่ จากนั้นปรับกระแสขีดจำกัดให้มีค่า  $100\text{ mA}$  ตามขีดจำกัดของ EML (หัวข้อ 3.4) ในการเชื่อมต่อตัวควบคุมกระแสเข้ากับ EML จะใช้สายเคเบิล CC-305S Current Source Interconnect Cable [23] ซึ่งเป็นหัวต่อชนิด 9 pin D-sub และสามารถปรับค่ากระแสขับเลเซอร์ด้วยตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ที่อยู่บนบอร์ดตัวควบคุมกระแส

### 3.4 ตัวเลเซอร์ที่มีตัวมอดูเลเตอร์ดูดกลืนคลื่นไฟฟ้าอยู่ภายใน (EML)

เป็นตัวเลเซอร์ที่มีส่วนของ DFB และ EAM ควบรวมอยู่ในชิปเดียวกัน แสงที่สร้างขึ้นมีความยาวคลื่นประมาณ  $1550\text{ nm}$  อีกทั้งมี TEC และ Thermistor ประกอบอยู่ภายใน โดยเลเซอร์ที่เลือกใช้นี้ผลิตโดยบริษัท CyOptics โมดูล E4560H32 ติดตั้งเลเซอร์อยู่บนตัวจับเลเซอร์ (Laser mount) โมดูล LDM-4980 ของบริษัท ILX Lightwave ดังรูปที่ 3.6 [25]

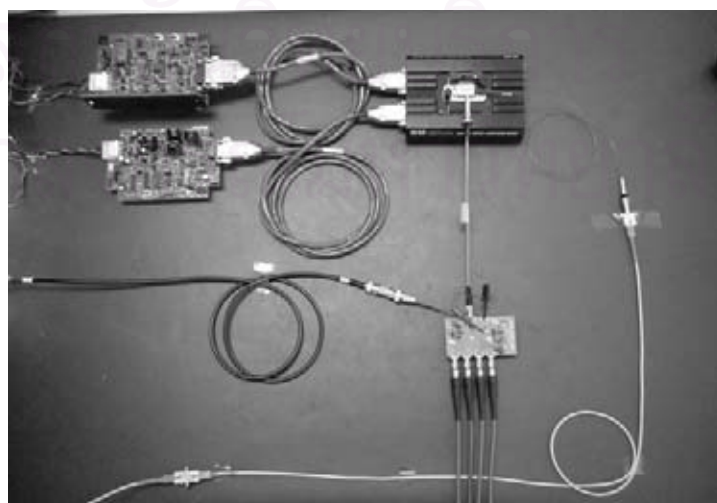




รูปที่ 3.6 EML และ Laser Mount ที่ใช้ในการทดลอง

ตัว EML นั้นจะมีขาสำหรับเชื่อมต่อทั้งหมด 8 พอร์ตด้วยกันคือ Thermister+, Thermister-, Anode+, Photodetector Anode-, Photodetector Cathode+, TEC+, TEC- และ RF port ตามลำดับ โดย RF port นั้นเป็นหัวต่อชนิด SMP ซึ่งอยู่ตรงข้ามกับขาอื่นๆ มีไว้สำหรับป้อนสัญญาณข้อมูลเพื่อมอดูเลตแบบคูดกลืนคลื่นไฟฟ้า ส่วนขา Anode+, Photodetector Anode- และ Photodetector Cathode+ เชื่อมต่อกับตัวควบคุมกระแสในหัวข้อ 3.2 ส่วน Thermiaster+, Thermister-, TEC+, TEC- เชื่อมต่อกับตัวควบคุมอุณหภูมิในหัวข้อ 3.3

การเชื่อมต่อส่วนประกอบต่างๆ ของตัวส่งสัญญาณทางแสงในหัวข้อที่ 3.1- 3.4 ดังรูปที่ 3.7 โดยต่ออุปกรณ์ควบคุมกระแสเข้ากับขา Anode ของเลเซอร์เพื่อทำหน้าที่ไบแอสกระแสแบบเดินหน้ากับเลเซอร์ เลเซอร์จะปล่อยลำแสงต่อเนื่องด้วยกำลังแสงที่แปรผันตามระดับกระแสที่ไบแอสนี้ ต่ออุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิเข้ากับขา Thermistor และ TEC ของ EML เพื่อควบคุมอุณหภูมิแบบป้อนกลับให้แก่เลเซอร์ และต่อสัญญาณขาออกของตัวขับ EAM เข้ากับพอร์ต RF ชนิด SMP ของ EML เพื่อมอดูเลตสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณแสง



รูปที่ 3.7 การเชื่อมต่ออุปกรณ์เพื่อส่งสัญญาณทางแสง 2.5 Gb/s

การเชื่อมต่อส่วนประกอบต่างๆ ของตัวส่งสัญญาณทางแสงนี้จะถูกนำไปใช้เป็นตัวส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดียวซึ่งมีแบนด์วิดท์สำหรับใช้ส่งข้อมูลได้กว้างกว่าเส้นใยนำแสงแบบหลายโหมด ที่ช่วงความยาวคลื่น 1550 nm ซึ่งมีค่าลดทอนประมาณ 0.2 dB/km สัญญาณเข้าเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าชนิด Differential Signal โดยจะรับสัญญาณระดับ CML หรือ Common Mode Logic ที่มีแรงดันตั้งแต่ -400 mV ถึง 0 mV ทดสอบด้วยสัญญาณข้อมูลชนิด PRBS (Pseudo-Random Binary Sequence)  $2^{31} - 1$  polynomial ซึ่งการใช้ข้อมูลต่อเนื่องที่ยาวมากเพื่อให้รูปแบบข้อมูลที่มีความหลากหลายนั่นเอง โดยมีอัตราเร็วของข้อมูลในการส่งตามมาตรฐาน SONET/SDH คือ OC-48/STM-16 (2.488 Gb/s) ลักษณะสัญญาณแสงขาออกของการเชื่อมต่อสัญญาณนี้จะต้องเป็นไปสอดคล้องกับมาตรฐาน ITU-T G.657 [10]



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### การออกแบบลายวงจรตัวส่งสัญญาณทางแสง

การออกแบบลายวงจรตัวส่งสัญญาณทางแสงสำหรับสัญญาณข้อมูลความเร็ว 2.5 Gb/s จำเป็นต้องใช้เทคนิคในการออกแบบลายวงจรความถี่สูง ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ 4.1 และจะอธิบายถึงลายวงจรตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ออกแบบในหัวข้อ 4.2 จากนั้นจะนำตัวส่งสัญญาณทางแสงนี้ไปประยุกต์ใช้ในระบบการรับส่งสัญญาณหลายความยาวคลื่นที่ได้ออกแบบในบทที่ 5 ต่อไป

#### 4.1 ขั้นตอนและเทคนิคในการออกแบบลายวงจรความถี่สูง

การออกแบบบอร์ดลายวงจร (Printed Circuit Board, PCB) เพื่อใช้ในระบบดิจิทัลความเร็วสูง (High-speed digital system) เส้นลายวงจรทองแดงที่ใช้เชื่อมเปรียบเสมือนเป็นสายส่งสัญญาณ (Transmission line) ซึ่งถ้าเส้นลายทองแดงมีความยาวมากจะส่งผลให้มีเวลาประวิงการแพร่กระจาย (Propagation delay) เกิดขึ้นมาก และยิ่งเมื่อใช้สำหรับการรับส่งสัญญาณที่ความถี่สูงด้วยแล้ว จำเป็นต้องคำนึงถึงเรื่องของเวลาด้วย การรับส่งสัญญาณข้อมูลความถี่สูงผ่านลายทองแดงบนแผ่นวงจร จะมีประสิทธิภาพมาก จำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1. ลดปัญหาสัญญาณรบกวน (Noise) ของระบบให้มากที่สุด
  2. ต้องต่อตัวต่อปลายสาย (Terminator) ที่ปลายเส้นสัญญาณเพื่อลดปัญหาการสะท้อนกลับของสัญญาณ
  3. ลดปัญหาสัญญาณแทรกข้ามวงจร (Crosstalk) ของเส้นลายวงจรที่วางใกล้เคียงกัน
  4. ลดปัญหาที่เกิดจากกระแสไหลผ่านกราวด์มากเกินไป (Ground bounce)
  5. ต้องให้มีค่าอิมพีแดนซ์ตรงกันตลอดลายวงจร (Matching impedance) เป็นต้น
- โดยขั้นตอนในการออกแบบคือ (1) เลือกวัสดุ (Material) สำหรับใช้เป็น substrate (2) ออกแบบสายส่ง (Transmission line) (3) การวางเส้นทาง (Routing) ควรเป็นเส้นทางที่มีปัญหาเรื่อง crosstalk น้อยที่สุด และคงรูปสัญญาณได้ดี (Maintaining signal integrity)

##### 4.1.1 เลือกวัสดุ

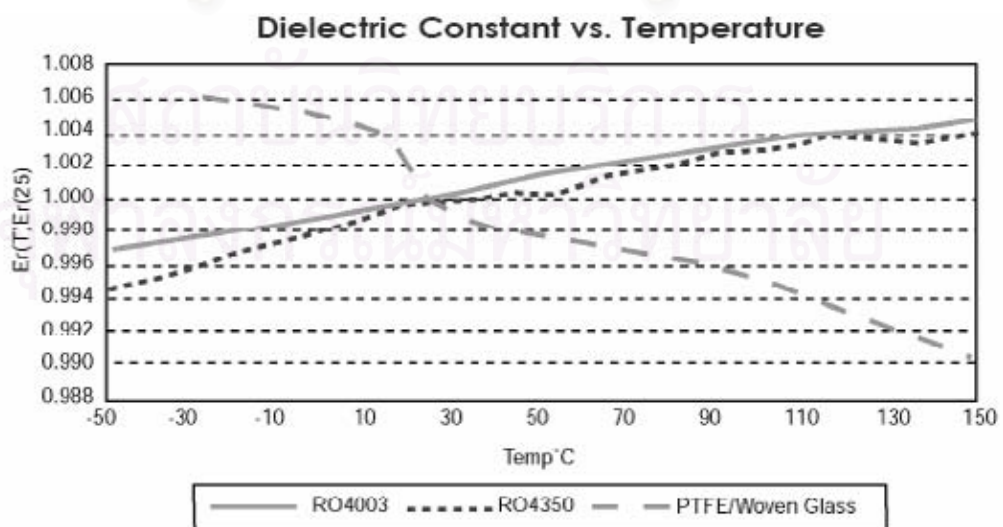
ปัญหาสัญญาณรบกวนและสัญญาณแทรกข้ามวงจรในการส่งข้อมูลความเร็วสูงเป็นผลมาจากไดอิเล็กตริกที่ใช้ทำแผ่นวงจร PCB โดยจะมีคุณลักษณะที่สำคัญคือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และค่า Loss tangent

- ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant,  $\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$ ) เป็นค่าที่ส่งผลต่อค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง สัญญาณจะสามารถเดินทางได้เร็วในวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำ
  - ค่า Loss tangent ( $\delta$ ) จะส่งผลต่อการลดทอนสัญญาณตามระยะทาง ยิ่งมีค่า loss tangent มาก ที่ความเร็วข้อมูลสูง จะส่งผลให้ไดอิเล็กตริกดูดซับสัญญาณมากขึ้น
- วัสดุไดอิเล็กตริกที่นิยมใช้ทำแผ่นวงจร PCB คือ FR-4 ซึ่งเป็นสารไฟเบอร์กลาส (Fiberglass) โดยมี epoxy resin laminate นอกจากนี้ยังมีวัสดุที่นิยมใช้อีกดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและ loss tangent ของวัสดุไดอิเล็กตริก (ที่ความถี่ 2.5 GHz และที่อุณหภูมิ 25 องศา) [26]

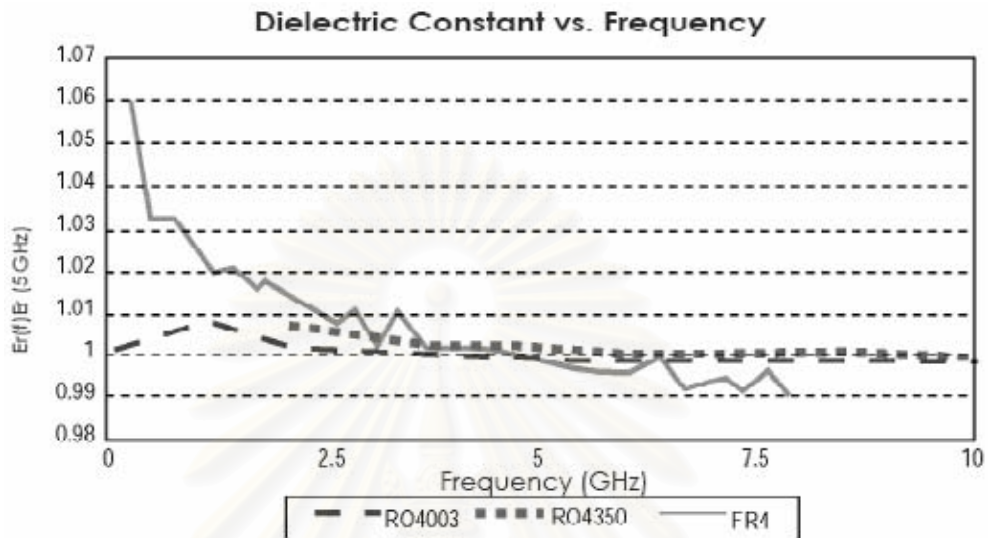
Material	Dielectric Constant ( $\epsilon_r$ )	Loss Tangent ( $\delta$ )
FR-4	4.1 – 4.5	0.015–0.019
RT/duroid® 5870 / 5880	2.33/2.20	0.0012/0.0009
RO4003C™ / RO4350B™	3.38/3.48	0.0027/0.0037
GETEK	3.6 – 4.2	0.010

นอกจากนี้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุยังขึ้นกับอุณหภูมิด้วยดังรูปที่ 4.1 สารไดอิเล็กตริกชนิด RO4003 และ RO4350 มีค่าคงที่แปรผันตามอุณหภูมิ ยิ่งอุณหภูมิสูงขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกก็จะสูงขึ้นด้วย ส่วนวัสดุ PTFE ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะแปรผกผันกับอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะลดลง [27]



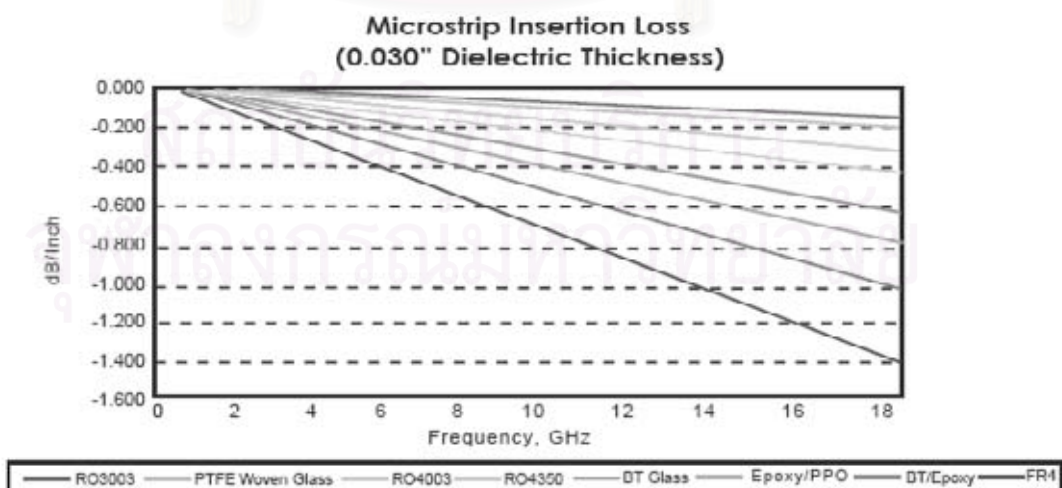
รูปที่ 4.1 ค่าไดอิเล็กตริกขึ้นกับอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.2 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ เช่น วัสดุ FR-4 จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น [27]



รูปที่ 4.2 ค่าไดอิเล็กตริกขึ้นกับความถี่

ในการเลือกใช้วัสดุที่จะนำมาออกแบบบอร์ดของตัวส่งสัญญาณทางแสงต้องคำนึงถึงค่าลดทอนของวัสดุด้วย ดังรูปที่ 4.3 จะพบว่าเมื่อความถี่สูงขึ้น การลดทอนของสัญญาณผ่านลายทองแดงบนวัสดุไดอิเล็กตริกก็จะเพิ่มมากขึ้น โดยที่ความถี่ 2.5 GHz วัสดุ FR-4 จะมีค่าลดทอนประมาณ 0.2 dB/inch [27]



รูปที่ 4.3 การลดทอนของสัญญาณในวัสดุแต่ละชนิด

#### 4.1.2 การออกแบบสายส่ง

สายส่งเป็นเส้นทางที่ทำจากตัวนำชนิดทองแดงเพื่อส่งผ่านสัญญาณไฟฟ้า โดยทองแดงมีค่าสภาพนำไฟฟ้า (Conductivity) เท่ากับ  $5.88 \times 10^7$  S/m และค่าความหนาของทองแดงจะนิยมบอกเป็นน้ำหนักของทองแดงมีหน่วยเป็นออนซ์ ซึ่งทองแดง 1 oz/ ft<sup>2</sup> จะมีความหนาเท่ากับ 1.4 mils ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าความหนาของทองแดง

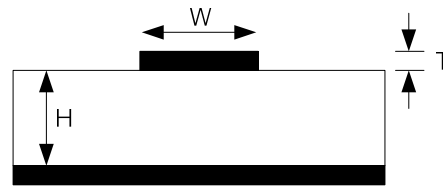
Weight (oz/ft <sup>2</sup> )	Thickness (mils)
1/4	0.35
1/2	0.70
1	1.40
2	2.80
3	4.20

สายส่งที่นิยมใช้ในการออกแบบวงจรดิจิทัลนี้มีสองชนิดด้วยกันคือ Microstrip และ Stripline สำหรับ Microstrip ใช้ทองแดงทำเป็นเส้นทางเชื่อมต่อสัญญาณอยู่ที่ชั้นบนของแผ่น PCB และมีพื้นอ้างอิงเพียงด้านเดียวอยู่ที่ชั้นล่าง ในทางตรงข้ามกับ Stripline จะแทรกเส้นทองแดงที่ใช้เชื่อมต่อสัญญาณให้อยู่ระหว่างชั้น ซึ่งจะมีพื้นอ้างอิงประกบอยู่ทั้งสองด้าน คือทั้งข้างบนและข้างล่าง สัญญาณที่เดินทางผ่านลายทองแดงจะเป็นการเดินทางของคลื่นไฟฟ้า (Electrical wave propagation) เปรียบเสมือนน้ำที่เดินทางผ่านท่อ ระดับของแรงดันเปรียบเสมือนระดับน้ำในท่อ และกระแสไฟฟ้าก็คือการไหลของน้ำ ซึ่งท่อที่น้ำไหลผ่านก็คือสายส่ง โดยคุณลักษณะของสายส่ง จะมีค่าอิมพีแดนซ์ซึ่งเปรียบเสมือนกับความกว้างของท่อ คุณลักษณะที่สำคัญอีกอย่างคือความเร็วในการเดินทาง (Propagation velocity) เป็นความเร็วของสัญญาณที่ไหลผ่านสายส่ง สัญญาณจะเดินทางผ่านสายส่งทางที่เป็น Signal path และย้อนกลับมาทาง Ground return path ที่จุดหนึ่งบน Signal path ระยะทางห่างจากจุดเริ่มต้นเท่ากับ  $z$  จะมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ  $V_i$  และบริเวณ Ground return path จะมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0 V ความแตกต่างนี้จะก่อให้เกิดสนามไฟฟ้าระหว่างสัญญาณและกราวด์ และจากกฎของแอมแปร์ เมื่อมีกระแสไหลผ่านตัวนำไฟฟ้าจะก่อให้เกิดสนามแม่เหล็ก Transverse electromagnetic mode (TEM) [28]

คุณลักษณะที่สำคัญของสายส่งคือ อิมพีแดนซ์ของเส้นทาง (Trace impedance) และเวลาประวิงการแพร่กระจาย (Propagation delay)

### 1) อิมพีแดนซ์ของเส้นทาง (Trace Impedance)

ลักษณะของสายส่งชนิด Microstrip line เป็นดังรูปที่ 4.4 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งชนิด Microstrip สามารถคำนวณได้จากสมการ 4.1



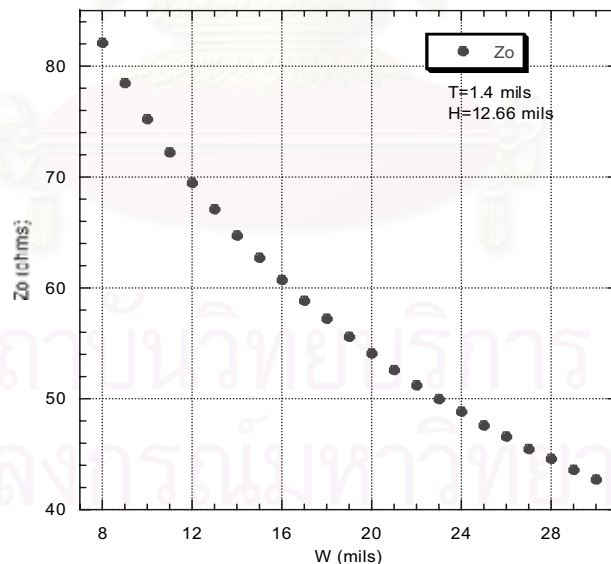
รูปที่ 4.4 คุณลักษณะการประมาณค่าอิมพีแดนซ์ของ microstrip line

$$Z_{\text{microstrip}} \approx \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1.41}} \ln \left( \frac{5.98H}{0.8W + T} \right) \quad (4.1)$$

$$0.1 < W/H < 2.0, \quad 1 < \epsilon_r < 15 \quad [28]$$

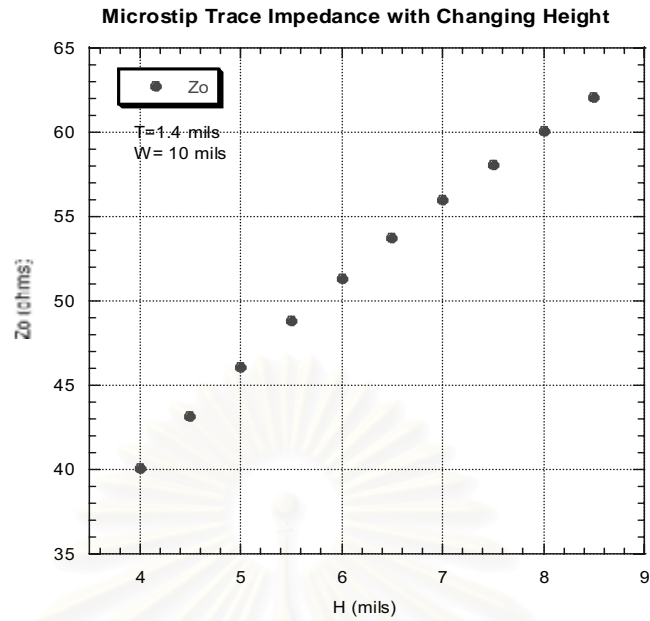
คำนวณค่าอิมพีแดนซ์โดยกำหนดค่า  $T = 1.4$  mils และ  $H = 12.66$  mils จากนั้นทดสอบปรับค่าความกว้างของสายส่งหรือ  $W$  ตั้งแต่ 8 mils จนถึง 30 mils จะได้ค่าอิมพีแดนซ์ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์จะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความกว้างของสายส่งให้สูงขึ้น และเพื่อให้ค่าอิมพีแดนซ์ตรงกับอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์อื่น ควรจะให้อิมพีแดนซ์ของสายส่งเท่ากับ 50 โอห์ม จะพบว่าความกว้างของสายส่งควรกว้างเท่ากับ 23 mils

Microstrip Trace Impedance with Changing Width

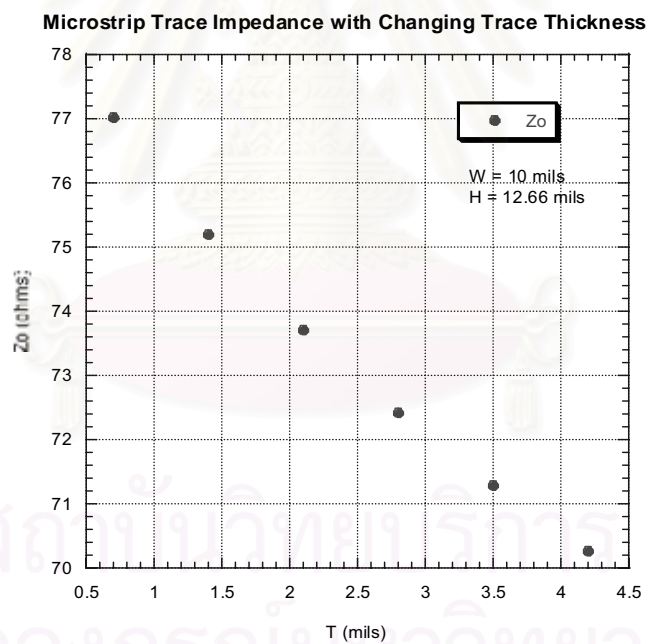


รูปที่ 4.5 ค่าอิมพีแดนซ์ของ Microstrip เมื่อมีการเปลี่ยนความกว้างของสายส่ง ( $W$ )

กำหนดค่า  $T = 1.4$  mils และ  $W = 10$  mils ให้คงที่ไว้ แล้วเปลี่ยนค่าความสูงของไดอิเล็กตริกหรือ  $H$  ตั้งแต่ 4 mils จนถึง 8.5 mils จะพบว่าค่าอิมพีแดนซ์จะเพิ่มสูงขึ้นถ้าเพิ่มความสูง  $H$  ดังรูปที่ 4.6 และได้อิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์มที่ความสูงไดอิเล็กตริก  $H$  ประมาณ 5.7 mils



รูปที่ 4.6 ค่าอิมพีแดนซ์ของ Microstrip เมื่อมีการเปลี่ยนความสูงของไดอิเล็กตริก (H)

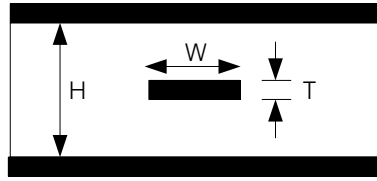


รูปที่ 4.7 ค่าอิมพีแดนซ์ของ Microstrip เมื่อมีการเปลี่ยนความหนาของทองแดง (T)

จากนั้นทดลองกำหนดค่า  $H = 12.66$  mils และ  $W = 10$  mils ให้คงที่ไว้ แล้วเปลี่ยนค่าความสูงของทองแดงหรือ T ตั้งแต่ 0.7 mils จนถึง 4.2 mils จะพบว่าค่าอิมพีแดนซ์จะลดลงถ้าเพิ่มความสูง T ดังรูปที่ 4.7

ส่วนลักษณะของสายส่งชนิด Stripline เป็นดังรูปที่ 4.8 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งชนิด Stripline สามารถคำนวณได้จากสมการ 4.2





รูปที่ 4.8 คุณลักษณะการประมาณค่าอิมพีแดนซ์ของ stripline

$$Z_{\text{stripline}} \approx \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left( \frac{4H}{0.67\pi(T+0.8W)} \right) \quad (4.2)$$

$$\frac{W}{T} < 0.35, \frac{T}{H} < 0.25 \quad [28]$$

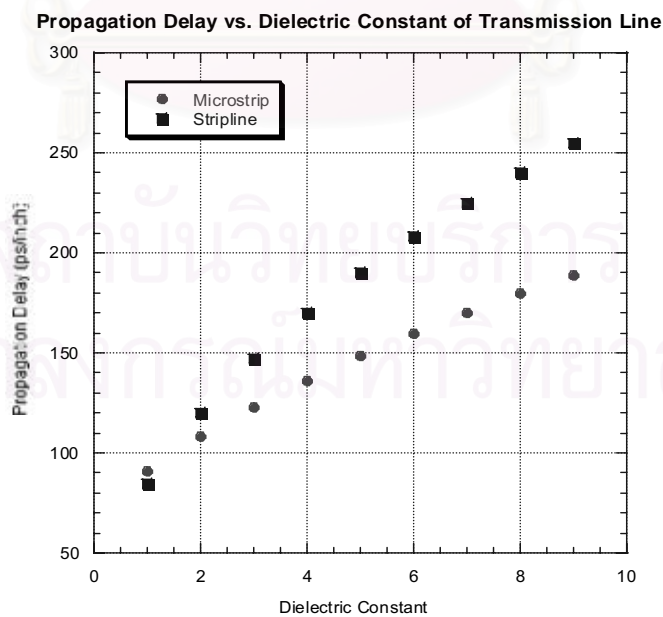
## 2) เวลาประวิงการแพร่กระจาย (Propagation delay)

เป็นเวลาที่สัญญาณใช้ในการเดินทางจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ค่า Propagation delay ของ microstrip สามารถคำนวณได้จากสมการ 4.3 [28]

$$t_{\text{PD}}(\text{microstrip}) = 85\sqrt{0.475\epsilon_r + 0.67} \quad (4.3)$$

ส่วนค่า Propagation delay ของ stripline สามารถคำนวณได้จากสมการ 4.4 [28]

$$t_{\text{PD}}(\text{stripline}) = 85\sqrt{\epsilon_r} \quad (4.4)$$



รูปที่ 4.9 Propagation delay ของสายส่งเมื่อเปลี่ยนค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

เมื่อคำนวณค่า Propagation delay ของสายส่งเทียบกับค่าคงที่ไดโอดีเล็กทริกจะได้อัตราสัมพัทธ์ดังรูปที่ 4.9 ยิ่งค่าคงที่ไดโอดีเล็กทริกสูงขึ้น ค่าความล่าช้าก็จะสูงขึ้นด้วย โดยกราฟของ Stripline จะชันมากกว่า

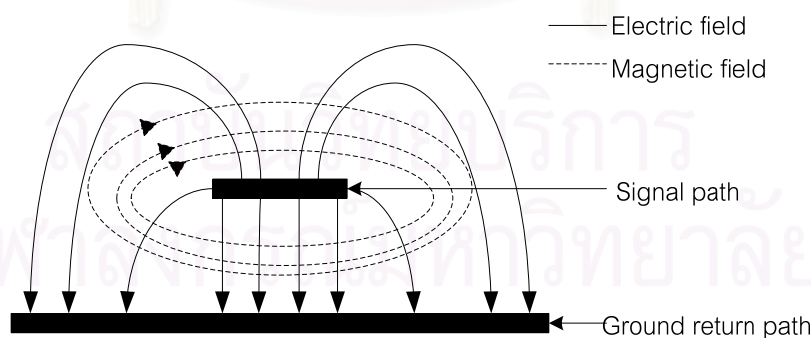
#### 4.1.3 การวางเส้นทาง (Routing)

ในการวางเส้นทางของลายวงจรที่จะคำนึงถึงการลดปัญหาเรื่อง Crosstalk ให้มากที่สุด เพื่อที่จะสามารถส่งสัญญาณให้มีการคงรูปของสัญญาณได้ดี การส่งสัญญาณผ่านสายส่งแบ่ง 2 แบบด้วยกันตามประเภทของสัญญาณคือ (1) Single-ended signal และ (2) Differential signal การออกแบบเส้นทางจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของแต่ละประเภทของสัญญาณด้วย

1) ลายวงจรความถี่สูงสำหรับสัญญาณ Single-ended signal การออกแบบอาศัยหลักการพื้นฐานในการออกแบบลายวงจรความถี่สูงดังนี้ คือ

1.1) ต้องมีระยะทางสั้น เนื่องจากสายส่งนำไฟฟ้าที่ยาวมาก ก็จะมีผลของความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุของสายส่งมากยิ่งขึ้น ทำให้สัญญาณมีค่าผิดเพี้ยนมาก มีสัญญาณรบกวนจากรอบข้างมาก อีกทั้งส่งผลให้เกิดความล่าช้า (Delay) มากขึ้นอีกด้วย

1.2) สัญญาณข้อมูลควรมีพื้นกราวนหนาอยู่ข้างล่าง เพื่อที่จะขจัดปัญหาเรื่องสัญญาณรบกวนให้มากที่สุดดังรูปที่ 4.10 ดังนั้นการออกแบบแต่ละชั้น (layer) ของแผ่น PCB 4 ชั้น ชั้นที่ถัดจากชั้นของสัญญาณจึงเป็นชั้นของกราวนที่คั่นกลางก่อนที่จะเป็นชั้นของสัญญาณไฟกระแสดตรง เพื่อป้องกันไฟฟ้ายุติธรรมรบกวนสัญญาณข้อมูล

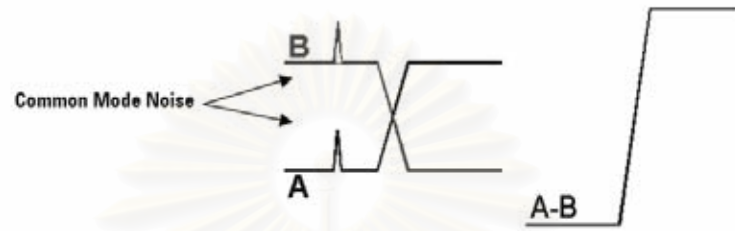


รูปที่ 4.10 ภาพตัดขวางของลายวงจร Single-ended

1.3) การคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ เพื่อให้สายส่งนั้นมีค่าอิมพีแดนซ์ตรงกับขาของชิปที่มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม สามารถคำนวณได้จากสมการ 4.1 ไม่เช่นนั้นสัญญาณจะเกิดการสะท้อนกลับกลายเป็นสัญญาณรบกวนได้

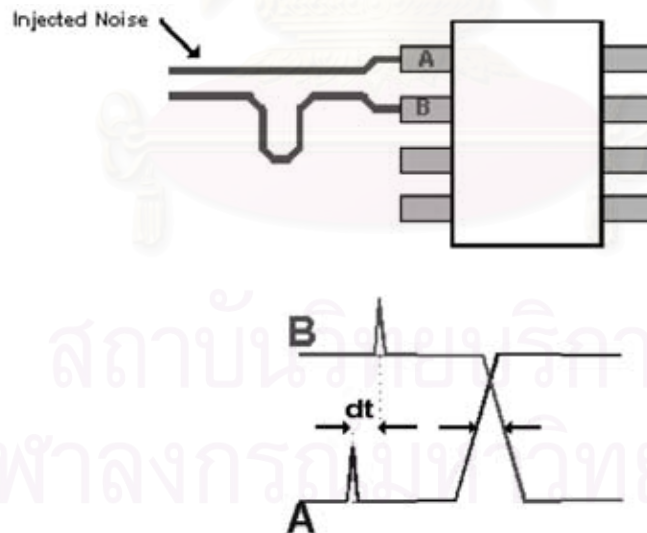
2) ลายวงจรความถี่สูงสำหรับสัญญาณ Differential signal [29] การออกแบบอาศัยหลักการพื้นฐานในการออกแบบลายวงจรความถี่สูงดังนี้ คือ

2.1) ความยาวของเส้นลายวงจรของคู่สัญญาณต้องมีความยาวเท่ากันเพื่อลดการเหลื่อมกันของช่องสัญญาณ ถึงมีสัญญาณรบกวนแบบโหมดร่วม (Common Mode Noise) ระหว่างทาง เมื่อถึงปลายทางแล้วจะนำสัญญาณมาหักลบกัน ทำให้สัญญาณรบกวนแบบนี้ถูกหักลบออกไปด้วยดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 สัญญาณ Differential

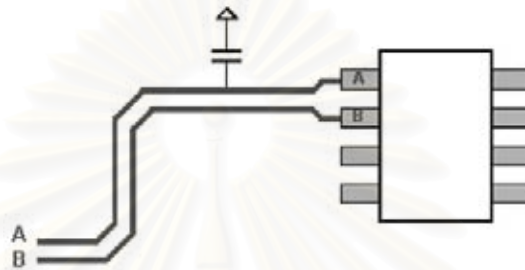
ถ้าความยาวของเส้นลายวงจรสัญญาณทั้งสองไม่เท่ากันสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นระหว่างทาง เมื่อถึงปลายทางจะไม่ถูกหักล้างเพราะสัญญาณทั้งสองไปถึงปลายทางไม่พร้อมกัน เกิดการเหลื่อมกันของช่องสัญญาณดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ความยาวของสัญญาณ Differential ไม่เท่ากัน ทำให้เกิดการเหลื่อมกันของสัญญาณ

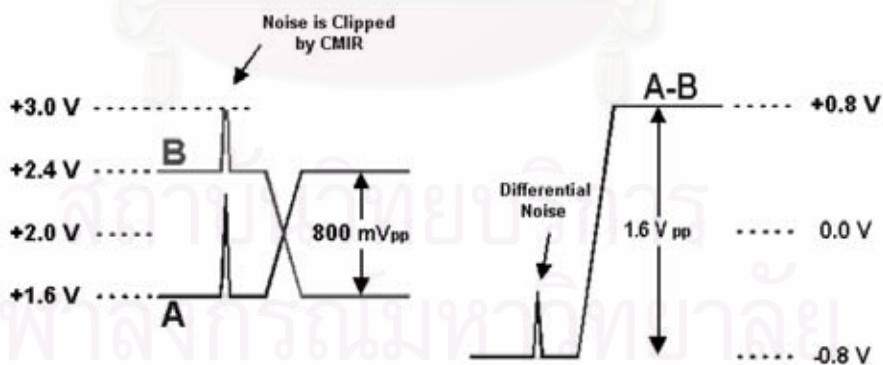
วิธีที่จะทำให้ความยาวของทั้งสองเท่ากันคือออกแบบให้ลายวงจรคู่ขนานกันไป และเมื่อเดินลายวงจรได้เรียบร้อยแล้ว ก็ควรจะให้เลี้ยวซ้ายหนึ่งครั้งด้วย ให้จำนวนการเลี้ยวซ้ายและเลี้ยวขวาเท่าๆกัน จะทำให้ทั้งสองเส้นยาวเท่ากันนั่นเอง

2.2) เมื่อมีการต่อวงจรบริเวณลายเส้นสัญญาณด้านหนึ่งทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของสัญญาณ ไม่จำเป็นต้องต่อวงจรอีกด้านหนึ่งให้เหมือนกันดังรูปที่ 4.13 มีหลายคนเข้าใจว่าควรจะทำให้มันสมดุลกัน แต่แท้จริงแล้วไม่ควรทำ เพราะจะทำให้ผลของความไม่ต่อเนื่องเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า



รูปที่ 4.13 ลายวงจรของสัญญาณ Differential ที่ไม่ต่อเนื่อง ไม่จำเป็นต้องทำให้วงจรสมดุล

2.3) Common Mode Input Range (CMIR) เป็นช่วงขีดจำกัดที่บ่งบอกว่าตัวรับสัญญาณจะสามารถรับขนาดของสัญญาณขาเข้าเท่าไร การออกแบบควรพิจารณาถึงค่า CMIR ด้วย เพราะถ้าสัญญาณรบกวนที่เข้ามามีค่าสูงกว่าขีดจำกัดระดับสัญญาณของตัวรับสัญญาณจะถูกคลิปปอก เมื่อถึงปลายทางก็จะทำให้การหักล้างกันไม่สมบูรณ์ดังรูปที่ 4.14 ซึ่งถูกจำกัดด้วยค่า CMIR ที่ 3 V



รูปที่ 4.14 ปัญหาที่เกิดจากระดับสัญญาณขาเข้าสูงเกินกว่าขีดจำกัด

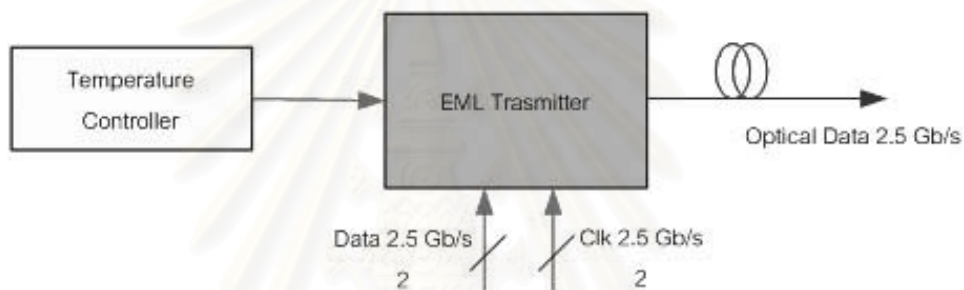
2.4) ต้องมีระยะทางสั้นเช่นเดียวกับสัญญาณ Single-ended เพื่อลดการผิดเพี้ยนของสัญญาณและลดความล่าช้า

2.6) การหาค่าอิมพีแดนซ์ เพื่อให้สายส่งนั้นมีค่าอิมพีแดนซ์ตรงกันกับขาของชิปที่มีค่า Differential impedance เท่ากับ 100 โอห์ม การออกแบบสายส่งให้ขนาดความกว้าง  $w_1$  ,  $w_2$

และระยะห่างระหว่างสายส่งทั้งสอง สามารถใช้โปรแกรม Polar Si8000 หรือ TXLine ในการคำนวณ เมื่อค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างสายส่งและอุปกรณ์มีค่าเท่ากันจะทำให้เกิดการสะท้อนกลับของสัญญาณน้อยที่สุด

#### 4.2 การออกแบบลายวงจรของตัวส่งสัญญาณทางแสง

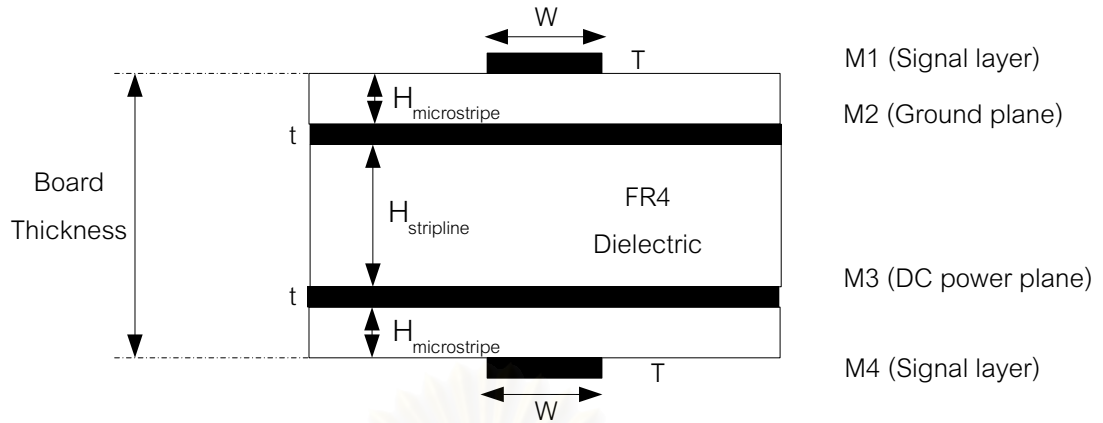
การออกแบบตัวส่งสัญญาณทางแสง จะต้องคำนึงถึงองค์ประกอบต่างๆ ของลายวงจร ซึ่งประกอบด้วย ลายวงจรสำหรับการทำงานของตัวขับมอดูเลเตอร์ชนิดดุกคลื่นไฟฟ้า ลายวงจรของเลเซอร์ EML และลายวงจรเพื่อควบคุมกระแสของเลเซอร์ วงจรเหล่านี้อยู่บนแผ่นวงจรแผ่นเดียวกัน โดยให้มีการควบคุมอุณหภูมิจากภายนอก



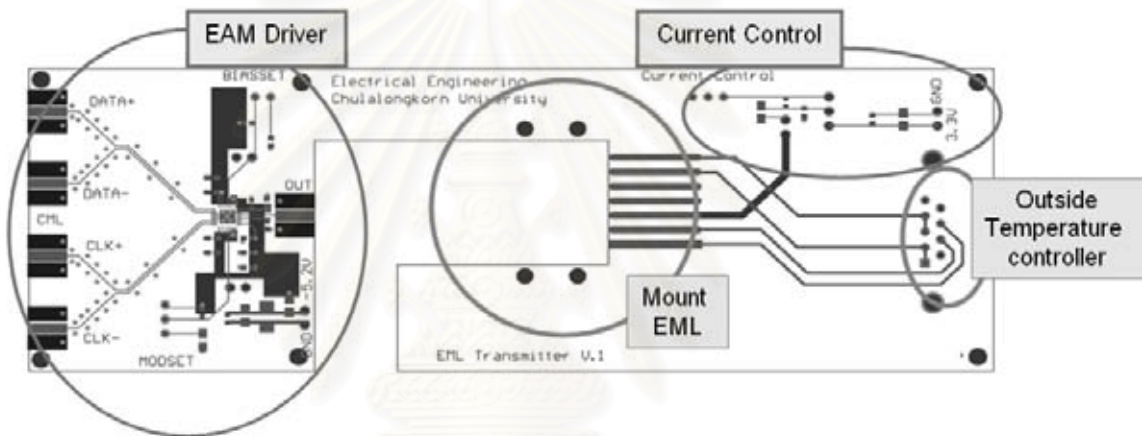
รูปที่ 4.15 การเชื่อมต่อตัวส่งสัญญาณทางแสงชนิด EML ที่ออกแบบ

จากรูปที่ 4.15 แสดงการเชื่อมต่อตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ออกแบบ ซึ่งจะมีสัญญาณขาเข้าคือสัญญาณข้อมูล (Data+ และ Data-) และสัญญาณนาฬิกา (Clk+ และ Clk-) ซึ่งเป็นสัญญาณแบบ Differential signal ที่อัตราความเร็ว 2.5 Gb/s มีการควบคุมอุณหภูมิของเลเซอร์จากบอร์ดภายนอก สัญญาณขาออกเป็นสัญญาณทางแสง 2.5 Gb/s ผ่านเส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว

แผ่นวงจรมีจำนวนชั้นทั้งหมด 4 ชั้นด้วยกัน ดังรูปที่ 4.16 คือ ชั้นของสัญญาณด้านบน (Signal layer, M1) ชั้นกราวด์ (Ground plane, M2) ชั้นกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (DC power plane, M3) และชั้นของสัญญาณด้านล่างอีกหนึ่งชั้น (Signal layer, M4)



รูปที่ 4.16 PCB stackup



รูปที่ 4.17 ลายวงจรตัวส่งสัญญาณทางแสงความเร็ว 2.5 Gb/s

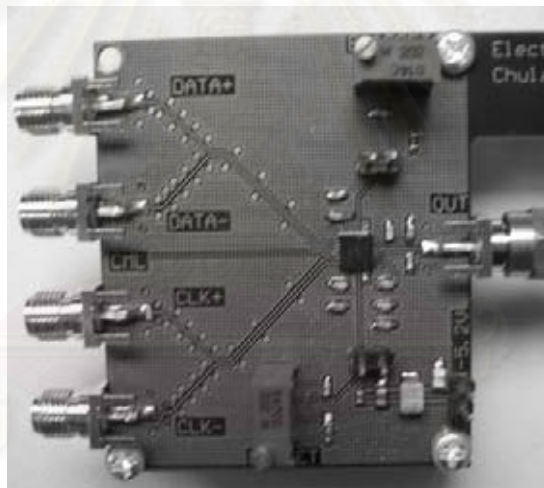
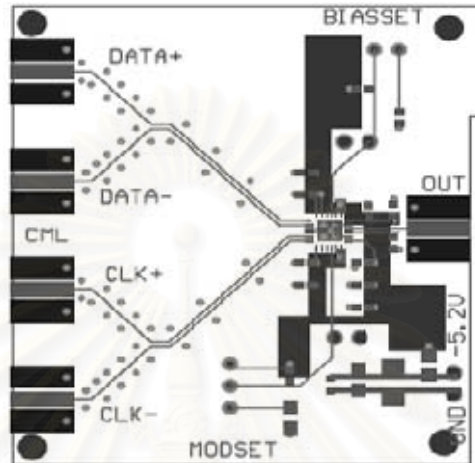
จากรูปที่ 4.17 ลายวงจรตัวส่งสัญญาณทางแสงประกอบด้วย 4 ลายวงจรด้วยกันคือ (1) ลายวงจรขับ EAM, (2) ลายวงจร EML Mount, (3) ลายวงจรควบคุมกระแส, และ (4) ลายวงจรเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ

#### 4.2.1 ลายวงจรขับ EAM

ตัวขับมอดูเลเตอร์ชนิดดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า (EAM) จะทำหน้าที่ขยายสัญญาณข้อมูลให้มีขนาดสูงขึ้นจากแรงดันมอดูเลตเท่ากับ 400 mVp-p ให้สูงขึ้นเป็นประมาณ 1-2.5 mVp-p และสามารถปรับแรงดันไบแอสได้ตั้งแต่ 0 mV ถึง 1 V ในส่วนของลายวงจรขับ EAM นี้ ได้นำชิปโมดูล MAX3941 ของบริษัท MAXIM มาประยุกต์ใช้ รูปร่างของแพ็คเกจเป็นชนิด QFN (4mm x 4mm) มีขาชิปทั้งหมด 24 pins ซึ่งลายวงจรส่วนนี้จัดว่าเป็นส่วนที่ใช้สำหรับสัญญาณข้อมูลความถี่สูง จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงค่าอิมพีแดนซ์ ระยะทาง และ Crosstalk ของสายส่งด้วย (Schematic ของ

วงจรอยู่ในภาคผนวก ข) สัญญาณขาเข้าและขาออกถูกออกแบบให้เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ชนิดอื่นด้วยหัวต่อชนิด SMA ซึ่งมีแบนด์วิดท์ตั้งแต่ DC ถึง 18 GHz

ในการออกแบบลายวงจรสำหรับสัญญาณ Single-ended signal และ Differential Signal ของลายวงจรขับ EAM มีดังนี้



รูปที่ 4.18 ลายวงจรตัวขับ EAM

1) ลายวงจรความถี่สูงที่ใช้สัญญาณชนิด Single-ended คือบริเวณสัญญาณขาออก OUT และบริเวณสัญญาณขาเข้าแต่ละเส้นลายวงจรก่อนที่จะถูกรวมกันเป็นสัญญาณชนิด Differential Signal ออกแบบดังแสดงในรูปที่ 4.18 ซึ่งในการออกแบบลายวงจรขาออกให้มีระยะทางเท่ากับ 260 mils ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุ FR-4 มีค่าเท่ากับ 4.4 คำนวณค่าความล่าช้าจากสมการ 4.3 ได้เท่ากับ 141.21 ps

นอกจากสัญญาณข้อมูลควรมีพื้นกราวนที่หนาปานกลางแล้ว ควรออกแบบให้มีกราวนหนาอยู่ข้างๆ ตลอดเส้นทางการเดินทางของสัญญาณด้วย

การหาค่าอิมพีแดนซ์ เพื่อให้สายส่งนั้นมีค่าอิมพีแดนซ์ตรงกันกับขาของชิปที่มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม จะสามารถคำนวณได้จากสมการ 4.1 การออกแบบลายวงจรมีค่าความหนาของแผ่นทองแดงที่ใช้เป็นสายส่งสัญญาณ (T) มีค่า 1 oz. หรือประมาณ 1.4 mils ส่วนค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฉนวนชนิด FR-4 มีค่าประมาณ 4.40 ที่ความถี่สูงระดับ 2.5 GHz ความหนาทั้งหมดของแผ่น PCB ที่ออกแบบมีค่าเท่ากับ 1 mm (39.37 mils) โดยให้ความหนาของทองแดง(T)ระหว่างชั้น มีค่าประมาณ 0.7 mils น้อยกว่าแบบ Microstrip เพราะลายทองแดงของ stripline อยู่ภายในไม่ต้องเจอกับสภาพแวดล้อมเหมือน Microstrip [28] ดังนั้นความสูงของ  $H_{\text{microstrip}} = 12.66 \text{ mils} \left( \frac{39.37 - 2 \times (0.7)}{3} \right)$  เมื่อคำนวณหาขนาดความกว้างของลายวงจรถ้าจากสมการ 4.1 จะได้

$$\text{จากสมการ 4.1} \quad 50 = \frac{87}{\sqrt{4.40 + 1.41}} \ln \left( \frac{5.98 \times 12.66}{0.8(W) + 1.4} \right)$$

$$W = 21.95 \text{ mils}$$

(หมายเหตุ : ทดลองใช้โปรแกรม TXLINE 2003 ซิมูเลตค่า W ได้ 22.99 mils และ ทดลองใช้โปรแกรม Polar Si8000 ซิมูเลตค่า W ได้ 22.86 mils)

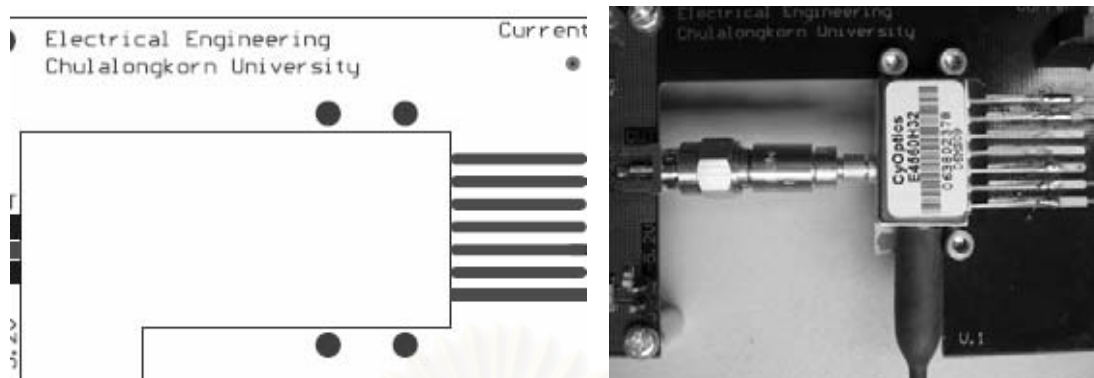
แต่เนื่องจากขาชิปมีขนาดเล็กมาก ดังนั้นสายส่งจึงจำเป็นต้องมีขนาดความกว้างเท่ากับ 10 mils จากการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งสัญญาณความกว้าง 10 mils จะได้ประมาณ 75.33 โอห์ม (หมายเหตุ : ทดลองใช้โปรแกรม TXLINE 2003 ซิมูเลตค่าอิมพีแดนซ์ได้ 75.09 โอห์ม และทดลองใช้โปรแกรม Polar Si8000 ซิมูเลตค่าอิมพีแดนซ์ได้ 74.77 โอห์ม) ซึ่งอาจก่อให้เกิดการสะท้อนกลับของสัญญาณได้

2) ลายวงจรมีความถี่สูงที่ใช้สัญญาณชนิด Differential ในรูปที่ 4.18 คือบริเวณสัญญาณขาเข้าที่สัญญาณค่าบวก (Data+) และสัญญาณค่าลบ (Data-) เดินทางนอคู่กัน เส้นทางต้องมีระยะทางสั้นเช่นเดียวกับสัญญาณ Single-ended เพื่อลดการบิดเบี้ยวของสัญญาณและลดความล่าช้า ซึ่งในการออกแบบลายวงจรถ้าเข้าให้มีระยะทางประมาณ 1240 mils ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุ FR-4 มีค่าเท่ากับ 4.4 คำนวณค่าความล่าช้าจากสมการ (4.3) ได้เท่ากับ 141.21 ps

การหาค่าอิมพีแดนซ์ เพื่อให้สายส่งนั้นมีค่าอิมพีแดนซ์ตรงกันกับขาของชิปที่มีค่า Differential impedance เท่ากับ 100 โอห์ม ออกแบบสายส่งให้ขนาดความกว้าง  $w_1$  ,  $w_2$  และระยะห่างระหว่างสายส่งทั้งสองเท่ากับ 10 mils เนื่องจากข้อจำกัดของขนาดของขาชิป จากการ ใช้โปรแกรม Polar Si8000 ซิมูเลตค่าอิมพีแดนซ์ได้ 86.02 โอห์ม ซึ่งอาจก่อให้เกิดการสะท้อนกลับของสัญญาณได้



#### 4.2.2 ลายวงจร EML Mount

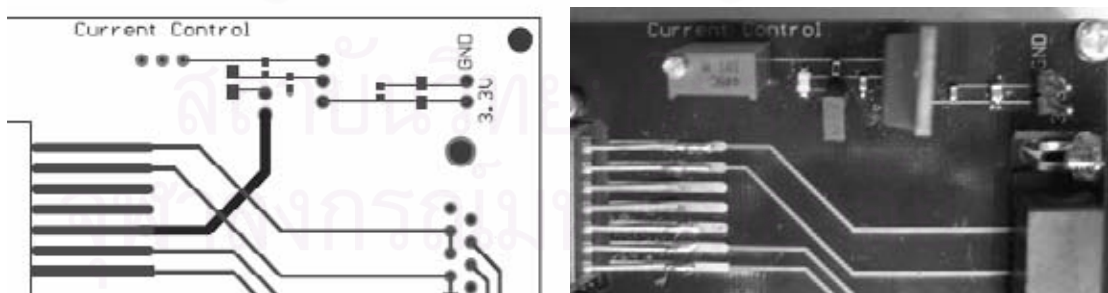


รูปที่ 4.19 ลายวงจร EML Mount

ส่วนของ EML Mount ดังรูปที่ 4.19 เป็นส่วนที่ทำหน้าที่จับตัวเลเซอร์ EML ให้มั่นคง ซึ่งตัว EML จะประกอบด้วยขาเข้า 1 ขาเพื่อรับสัญญาณข้อมูล RF โดยหัวต่อเป็นชนิด SMP (แบนด์วิธตั้งแต่ DC ถึง 40 GHz) ดังนั้นจำเป็นต้องใช้ Adaptor เปลี่ยนจากหัวต่อ SMP ให้เป็น SMA เพื่อต่อเข้ากับส่วนตัวขยายสัญญาณที่มีหัวต่อเป็นชนิด SMA

ทางด้านขาออกของ EML มีขาทั้งหมด 7 ขา ออกแบบลายวงจรรองรับขาทั้ง 7 ขานี้ ซึ่งประกอบด้วยขา TEC-, TEC+, Monitor Cathode+, Monitor Cathode-, Thermistor+ และ Thermistor- ซึ่ง pads ที่ออกแบบจะถูกนำไปเชื่อมต่อกับลายวงจรส่วนอื่นต่อไป โดยวงจรนี้เป็นวงจรไฟฟ้ากระแสตรง ไม่เหมือนกับวงจรของสัญญาณข้อมูลที่เป็นสัญญาณความถี่สูง จึงไม่ยากซับซ้อนเท่ากับวงจรขยายสัญญาณข้อมูล

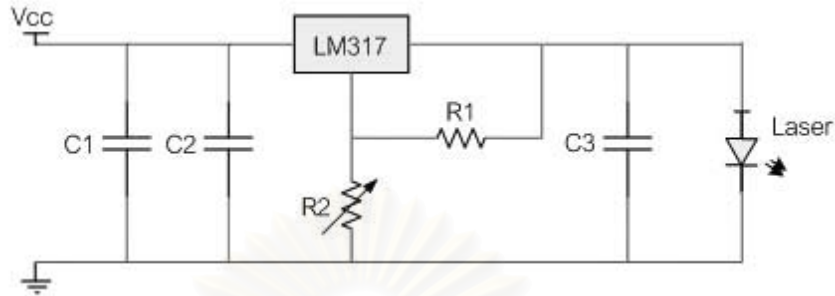
#### 4.2.3 ลายวงจรควบคุมกระแส



รูปที่ 4.20 ลายวงจรควบคุมกระแส

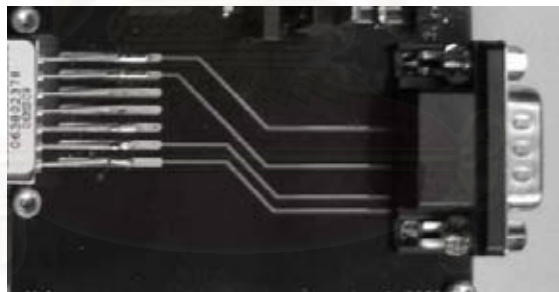
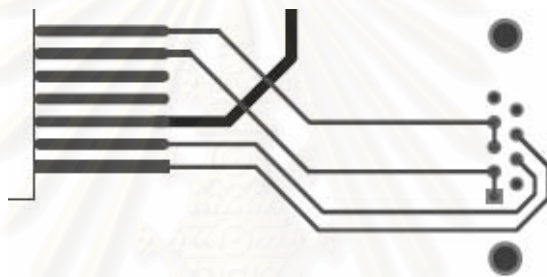
ในส่วนของลายวงจรควบคุมกระแส นั้น อาศัยหลักการทำงานของตัว Regulator โมดูล LM317 เพื่อควบคุมกระแสป้อนเข้าสู่ขา Anode+ ของ EML (pin 3) สามารถควบคุมกระแสขับ

เลเซอร์ตั้งแต่ช่วง 50–100 mA โดยมีวงจรดังรูปที่ 4.21 ระดับแรงดันขาออกจะสามารถปรับได้จากความต้านทาน R2 ทำให้สามารถปรับกระแสเพื่อให้ไบแอสเลเซอร์ได้ ( $C1 = 10 \mu\text{F}$ ,  $C2 = 1 \mu\text{F}$ ,  $C3 = 1 \mu\text{F}$ ,  $R1 = 100 \text{ โอห์ม}$ ,  $R2 = 200 \text{ โอห์ม}$  ปรับค่าได้)



รูปที่ 4.21 วงจรควบคุมกำลังแสงของเลเซอร์

#### 4.2.4 ลายวงจรเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ



รูปที่ 4.22 ลายวงจรเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ

ลายวงจรส่วนนี้ทำหน้าที่เชื่อมต่อ Thermistor ที่อยู่ภายใน EML เข้ากับบอร์ดควบคุมอุณหภูมิ เพื่อส่งสัญญาณบอกระดับอุณหภูมิของเลเซอร์ และเชื่อมต่อบอร์ดควบคุมอุณหภูมินี้กับตัว TEC ที่อยู่ภายในตัว EML เพื่อส่งสัญญาณย้อนกลับไปควบคุมอุณหภูมิของเลเซอร์ โดยบอร์ดควบคุมอุณหภูมิที่เลือกใช้มาจากบริษัท Lighthwave Technologies โมดูล LDX-5100 (จากในหัวข้อ 3.2) ซึ่งบนบอร์ดจะใช้ตัว 9 pin DSub เป็นหัวต่อในการเชื่อมต่อสายเคเบิลเข้ากับ LDX-5100

## บทที่ 5

### ระบบการรับส่งสัญญาณหลายความยาวคลื่นแสง

บทนี้จะอธิบายถึงการจำลองระบบการรับส่งสัญญาณหลายความยาวคลื่นแสงหรือ WDM ที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ (Channel spacing) 100 GHz โดยจะประกอบไปด้วยภาคส่งสัญญาณ ตัวกลางในการรับส่งสัญญาณ และภาครับสัญญาณของระบบ สำหรับภาคส่งสัญญาณ จะสร้างสัญญาณข้อมูลแสง 3 ความยาวคลื่นที่มียอดของความยาวคลื่นห่างจากกันเท่ากับ 0.8 nm จากนั้นนำสัญญาณแต่ละช่องสัญญาณมารวมกันด้วยตัวมัลติเพลกซ์ทางแสงเพื่อส่งผ่านเส้นใยนำแสงเส้นเดียวกัน รายละเอียดของภาคส่งสัญญาณแสงและตัวกลางในการรับส่งสัญญาณจะกล่าวในหัวข้อ 5.1 และ 5.2 ตามลำดับ ทางภาครับสัญญาณแสงจะแยกสัญญาณเฉพาะความยาวคลื่นตรงกลางออก แล้วส่งต่อไปยังตัวรับสัญญาณทางแสงก่อนที่จะแปลงสัญญาณจากสัญญาณทางแสงกลับสู่สัญญาณทางไฟฟ้าต่อไป ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อ 5.3

#### 5.1 ภาคส่งสัญญาณ

การจำลองภาคส่งสัญญาณของระบบ WDM จะแยกออกเป็นสองกรณี คือกรณีภาคส่งสัญญาณที่สร้างสัญญาณทั้งหมด 3 สัญญาณที่ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 100 GHz ในหัวข้อ 5.1.1 และกรณีสร้างสัญญาณทั้งหมด 2 สัญญาณเพื่อศึกษาการปรับระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณให้แคบลงจาก 100 GHz เป็น 50 GHz ในหัวข้อ 5.1.2

##### 5.1.1 ระบบ WDM 3 ช่องสัญญาณที่ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 100 GHz

นำตัวส่งสัญญาณทางแสงในบทที่ 4 สร้างสัญญาณความยาวคลื่น 1551.72 nm ซึ่งเป็นความยาวคลื่นหลักที่สนใจ กำหนดให้เป็นความยาวคลื่นที่ 2 จากนั้นสร้างสัญญาณแสงด้านข้างทั้งสองข้างคือ ความยาวคลื่นที่ 1 (1550.92 nm) และที่ 3 (1552.52 nm) ซึ่งเป็นความยาวคลื่นด้านซ้ายและขวาของความยาวคลื่นที่ 2 โดยที่ทั้งสามค่าความยาวคลื่นห่างกัน 100 GHz สอดคล้องกับมาตรฐาน ITU-Grid G.694.1

การทดลองนี้ใช้ตัวคู่ต่อสัญญาณทางแสง (Fiber optic coupler) สำหรับมัลติเพลกซ์สัญญาณแสง เมื่อพิจารณาพอร์ตของ coupler สามารถแบ่ง coupler ออกเป็น 2 ชนิด ถ้ามีพอร์ตขาเข้า 1 พอร์ตและขาออก N พอร์ต เรียกว่า Tee coupler (1\*N) ถ้าพอร์ตขาเข้า N พอร์ต และ

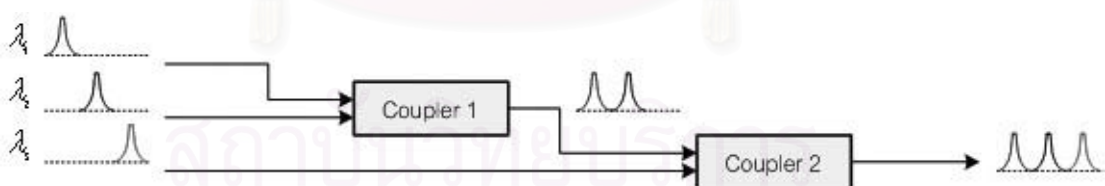
พอร์ตขาออก N พอร์ต จะเรียกว่า Star coupler ( $N \times N$ ) ตัว Coupler แบบ  $1 \times 2$  ที่ใช้ในระบบนี้จะมีลักษณะการทำงานดังในรูปที่ 5.1



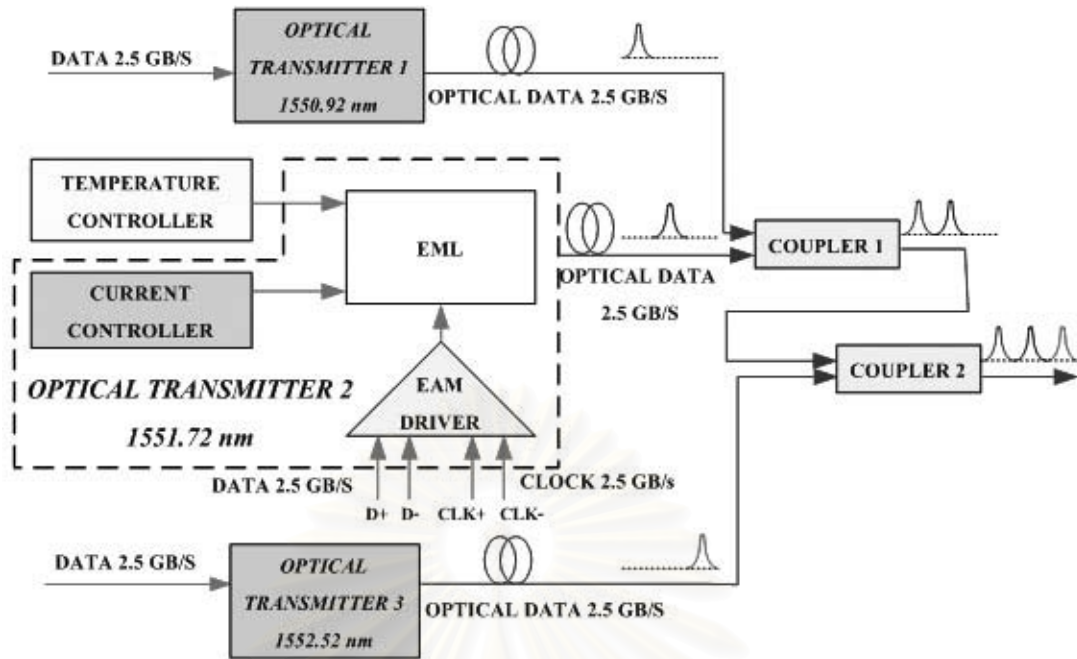
รูปที่ 5.1 ลักษณะของตัวคู่ต่อสัญญาณทางแสง

Coupler ที่ใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 2 ตัว เป็นตัวคู่ต่อสัญญาณทางแสงชนิด Dual Wavelength Coupler ทำงานที่ความยาวคลื่น 1310 และ 1550 nm มีพอร์ตเป็นชนิด  $1 \times 2$  Tee coupler ซึ่งมีลักษณะยอมให้แสงเดินทางได้ทั้งไปและกลับ (bi-directional) คุณสมบัติของ coupler ตัวนี้เมื่อป้อนแสงที่พอร์ตขาเข้า สัญญาณขาออกจะแบ่งออกพอร์ต Out 1 และพอร์ต Out 2 ประมาณข้างละ 50% จึงมีชื่ออีกอย่างว่า 3 dB optical coupler

ในการทดลองจะใช้คุณสมบัติ Bi-directional ของ Coupler เพื่อรวมแสงสองความยาวคลื่นเข้าด้วยกัน โดยนำสัญญาณข้อมูลแสงที่มีความยาวคลื่นที่แตกต่างกันนี้ป้อนเข้าพอร์ต Out1 และ Out2 ของตัวคู่ต่อสัญญาณตามลำดับ ข้อมูลจะถูกรวมเข้าด้วยกันออกที่พอร์ต Input ของตัวคู่ต่อสัญญาณตัวที่ 1 จากนั้นนำสัญญาณนี้และสัญญาณข้อมูลความยาวคลื่นที่ 3 มารวมกันด้วยตัวคู่ต่อสัญญาณตัวที่ 2 ในท้ายที่สุดสัญญาณข้อมูลขาออกที่ได้จะเป็นสัญญาณข้อมูลที่มี 3 ความยาวคลื่นรวมไว้ด้วยกันภายในเส้นใยนำแสงเส้นเดียว ดังแสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 การรวมสัญญาณแสงสามความยาวคลื่นด้วยตัวคู่ต่อสัญญาณสองตัว



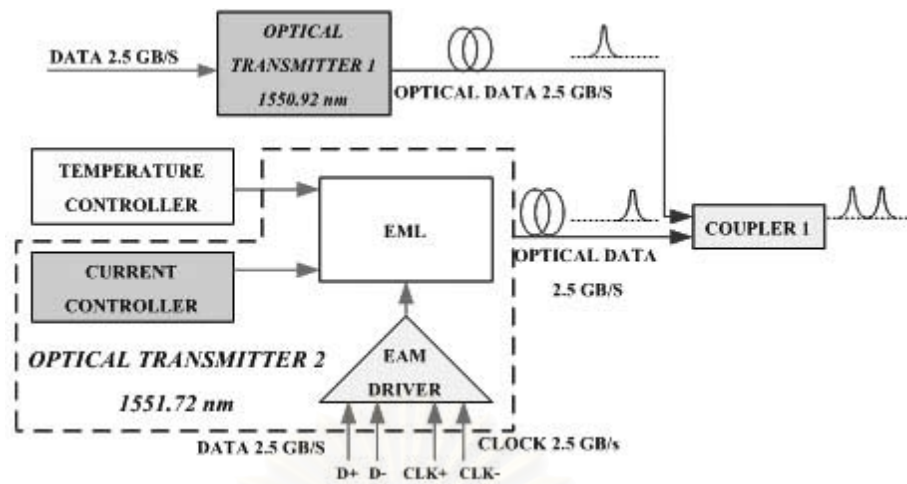
รูปที่ 5.3 การเชื่อมต่อภาคส่งสัญญาณเพื่อทดลองระบบ WDM

จากรูปที่ 5.3 เป็นการนำเอาสัญญาณข้อมูลทางแสงความยาวคลื่นที่ 1 (1550.92 nm), 2 (1551.72 nm) และ 3 (1552.52 nm) มารวมกันเพื่อส่งสัญญาณทั้งหมดผ่านเส้นใยนำแสงเพียงเส้นเดียว ซึ่งเป็นการจำลองการส่งสัญญาณแบบ WDM โดยระยะห่างระหว่างแต่ละความยาวคลื่นคือ 100 GHz หรือ 0.8 nm

### 5.1.2 ระบบ WDM 2 ช่องสัญญาณเพื่อปรับระยะระหว่างช่องสัญญาณ

ทดลองส่งสัญญาณข้อมูลแสงผ่านระบบ WDM เพียง 2 ช่องสัญญาณ เพื่อทดสอบการปรับความยาวคลื่นให้มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากับ 50 GHz (0.4 nm) เนื่องด้วยตัวส่งสัญญาณที่สามารถปรับจูนได้มีเพียงสองตัวเท่านั้น จึงจำเป็นต้องใช้เพียง 2 ช่องสัญญาณ

ขั้นแรกทดสอบระบบ WDM 100 GHz ก่อน โดยนำตัวส่งสัญญาณที่ออกแบบไว้ในบทที่ 4 มาประยุกต์ใช้ในระบบ WDM โดยกำหนดให้เป็นความยาวคลื่นที่ 2 ซึ่งมีค่ายอดของสเปกตรัมอยู่ที่ 1551.72 nm ส่วนสัญญาณความยาวคลื่นที่ 1 สร้างโดยตัวส่งสัญญาณอีกตัวซึ่งมีค่ายอดของสเปกตรัมอยู่ที่ 1550.92 nm ดังนั้นทั้งสองช่องสัญญาณจะอยู่ห่างกัน 0.8 nm โดยการมัลติเพล็กซ์สัญญาณทางแสงจะใช้อุปกรณ์ Optical Coupler ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 การเชื่อมต่อระบบ WDM 2 ช่องสัญญาณ

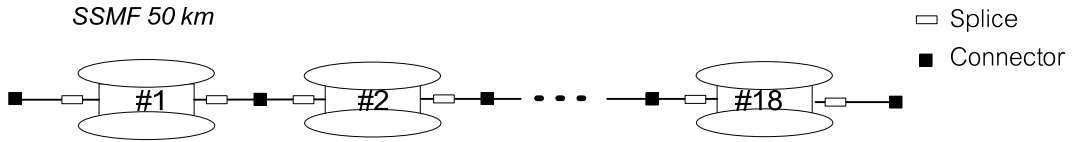
จากนั้นปรับความยาวคลื่นด้วยตัวควบคุมอุณหภูมิ โดยปรับให้ความยาวคลื่นของตัวส่งสัญญาณที่หนึ่งมีความยาวคลื่นเท่ากับ 1551.12 nm และตัวส่งสัญญาณตัวที่ 2 ให้ความยาวคลื่นเท่ากับ 1551.52 nm ซึ่งจะทำให้ระยะห่างระหว่างสองช่องสัญญาณมีค่าเท่ากับ 0.4 nm หรือ 50 GHz สอดคล้องกับมาตรฐาน ITU-T Grid G.694.1

## 5.2 ตัวกลางในการรับส่งสัญญาณ

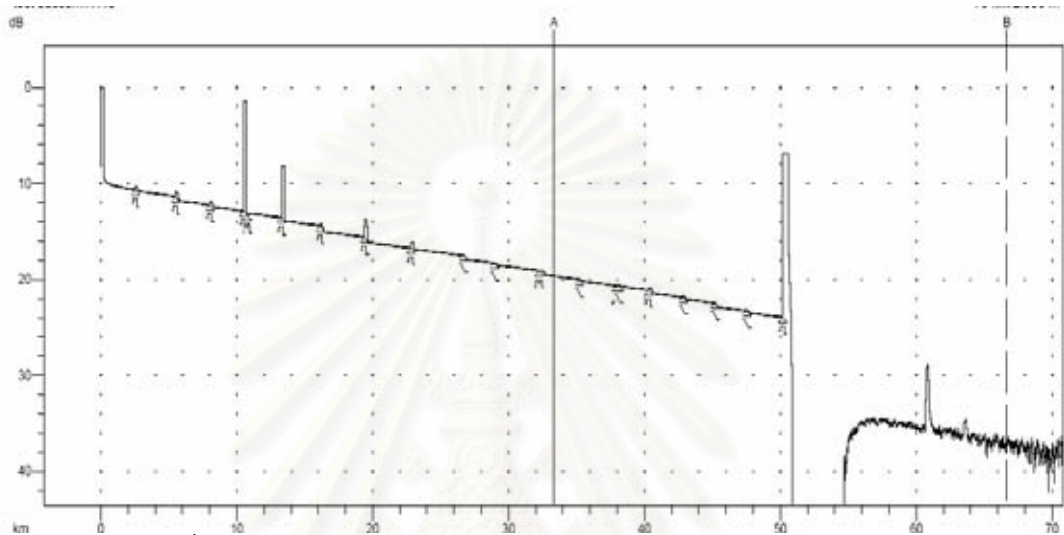
ตัวกลางในการรับส่งสัญญาณคือเส้นใยนำแสง ในปัจจุบันมีเส้นใยนำแสงหลายชนิด เช่น เส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว (Standard Single Mode Fiber, SSMF), เส้นใยนำแสงชนิดหลายโหมด (MultiMode Fiber, MMF), เส้นใยนำแสงชนิดเลื่อนดิสเพอร์ชันแบบมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ (Non-zero Dispersion Shifted Fiber, NZDF) เป็นต้น สำหรับในการทดลองจะทดสอบกับเส้นใยนำแสงสองชนิดคือ (1) SSMF และ (2) Truewave-RS ซึ่งแต่ละชนิดมีระยะทางเท่ากับ 50 km เหมาะสำหรับการใช้งานประเภท Short-haul หรือ Intermediate range

### 5.2.1 เส้นใยนำแสงชนิด SSMF 50 km

เส้นใยนำแสงชนิด SSMF ตามมาตรฐาน ITU-T G.652 [30] มีค่าลดทอน (attenuation) ประมาณ 0.2–0.3 dB/km และค่าดิสเพอร์ชัน (dispersion) ประมาณ 18 dB/km/nm ที่ค่าความยาวคลื่นแสงประมาณ 1550 nm ในการทดลองนำสัญญาณส่งผ่านเส้นใยนำแสงชนิด SSMF เป็นระยะทางประมาณ 50 km ซึ่งประกอบด้วยม้วนเส้นใยนำแสงทั้งหมด 18 ม้วนดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 การเชื่อมต่อเส้นใยนำแสงชนิด SSMF ระยะทาง 50 km



รูปที่ 5.6 ผลการทดสอบเส้นใยนำแสงชนิด SSMF 50 km ด้วย OTDR

จากการทดสอบเส้นใยนำแสงด้วยเครื่องมือวัด Optical Time Domain Reflectometer (OTDR) จะได้เส้นกราฟดังรูปที่ 5.6 ซึ่งมีระยะทางโดยรวมเท่ากับ 50.166 km และค่าสูญเสียกำลังทั้งหมด (total loss) เท่ากับ 13.95 dB

ส่วนค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยนำแสงชนิด SSMF นี้มีค่าเท่ากับ 18 ps/km/nm ดังนั้นการคำนวณค่า Group Velocity Delay ( $\tau_{GVD}$ ) จะได้ค่าประมาณ ดังนี้

$$\tau_{GVD} = D \times L \times \sigma$$

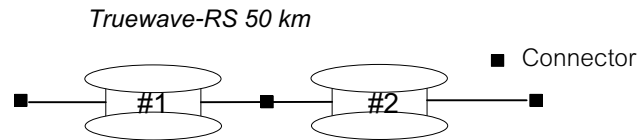
$$\tau_{GVD} = 18 \text{ ps/km/nm} \times 50.166 \text{ km} \times 0.064 \text{ nm} = 57.79 \text{ ps}$$

ซึ่งค่า  $\tau_{GVD}$  นี้จะเป็นการประมาณการถ่วงออกของพัลส์แสงว่าอย่างน้อยเพียงใดเมื่อเทียบกับคาบบิตข้อมูล

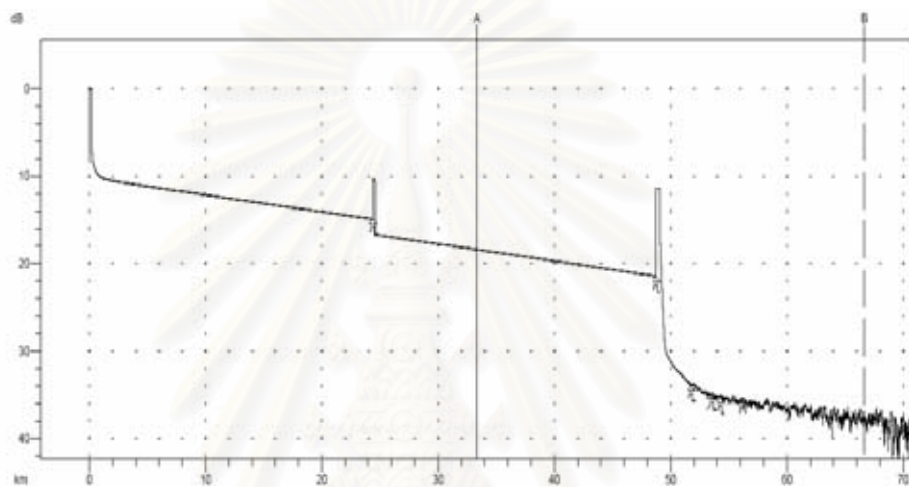
### 5.2.2 เส้นใยนำแสงชนิด Truewave-RS 50 km

นำเส้นใยนำแสงอีกชนิดหนึ่ง คือชนิด Truewave-Reduce Slope (Truewave-RS) [31] เป็นเส้นใยนำแสงที่พัฒนามาจาก NZDF (ITU-T G.655) ซึ่งมีการเลื่อนค่าดิสเพอร์ชันทำให้มีค่าลดลงมากกว่าของ SSMF โดย Truewave-RS ถูกพัฒนาให้มีค่าความชันของกราฟดิสเพอร์ชันให้

ชั้นน้อยกว่า NZDF ที่ช่วงการทำงาน 1550 nm เส้นใยนำแสงชนิดนี้มีค่าดิสเพอร์ชันประมาณ 4 dB/km/nm ส่วนค่าการลดทอนประมาณ 0.2 dB/km ระยะทางที่ใช้ทดสอบมีค่าประมาณ 50 km ซึ่งประกอบด้วยม้วนเส้นใยนำแสงทั้งหมด 2 ม้วนด้วยกันดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 การเชื่อมต่อเส้นใยนำแสงชนิด Truewave-RS ระยะทาง 50 km



รูปที่ 5.8 ผลการทดสอบเส้นใยนำแสงชนิด Truewave-RS 50 km ด้วย OTDR

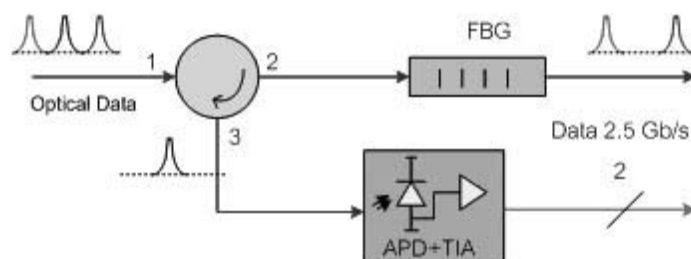
เมื่อทดสอบเส้นใยนำแสงด้วยเครื่องมือวัด OTDR จะได้เส้นกราฟดังรูปที่ 5.8 ซึ่งระยะทางโดยรวมเท่ากับ 48.765 km และค่าสูญเสียกำลังทั้งหมดเท่ากับ 11.37 dB

ส่วนค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยนำแสงชนิด SSMF นี้มีค่าเท่ากับ 4 ps/km/nm ดังนั้นการคำนวณค่า Group Velocity Delay ( $\tau_{\text{gvd}}$ ) จะได้ค่าประมาณ ดังนี้

$$\tau_{\text{gvd}} = D \times L \times \sigma$$

$$\tau_{\text{gvd}} = 4 \text{ ps/km/nm} \times 48.765 \text{ km} \times 0.064 \text{ nm} = 12.48 \text{ ps}$$

### 5.3 ภาครับสัญญาณแสง



รูปที่ 5.9 การเชื่อมต่อภาครับสัญญาณเพื่อทดลองระบบ WDM

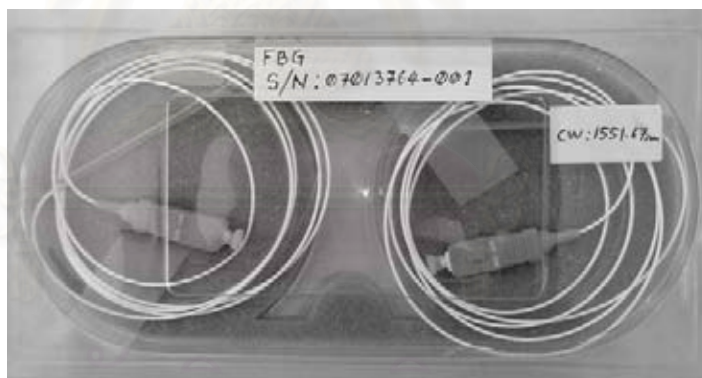


ในการทดลองภาครับสัญญาณจะประกอบด้วยอุปกรณ์ (1) Fiber Bragg Grating และ (2) Optical Circulator เป็นตัวดีมีผลติเพลกซ์ทางแสง จากนั้นใช้ (3) ตัวรับสัญญาณทางแสงชนิด Avalanche (Avalanche Photo Diode, APD) เพื่อเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า การเชื่อมต่อภาครับสัญญาณเป็นดังรูปที่ 5.9

### 5.3.1 Fiber Bragg Grating (FBG)

FBG เป็นเส้นใยนำแสงที่ผ่านกรรมวิธีการฉายแสง Ultraviolet เพื่อให้ดัชนีหักเหของเส้นใยนำแสงมีค่าเปลี่ยนไป ทำให้แสงบางความยาวคลื่นที่วิ่งผ่านเส้นใยนำแสงเกิดการสะท้อนกลับไปในทิศทางเดิม ส่วนแสงที่มีความยาวคลื่นอื่นที่ไม่สัมพันธ์กับค่าดัชนีหักเหของบริเวณที่ฉายแสงก็จะสามารถเดินทางผ่านออกไปได้ เปรียบเสมือนว่าตัว FBG นั้นเป็นตัวกรองสัญญาณบางความยาวคลื่นออกนั่นเอง

FBG ที่เลือกใช้ในการทดลองมาจากบริษัท Photonixm สามารถกรองสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่นกลาง 1551.67 nm โดยมีความกว้างของช่วงการกรองสัญญาณประมาณ 0.5 nm FBG ที่ใช้งานมีลักษณะดังรูปที่ 5.10



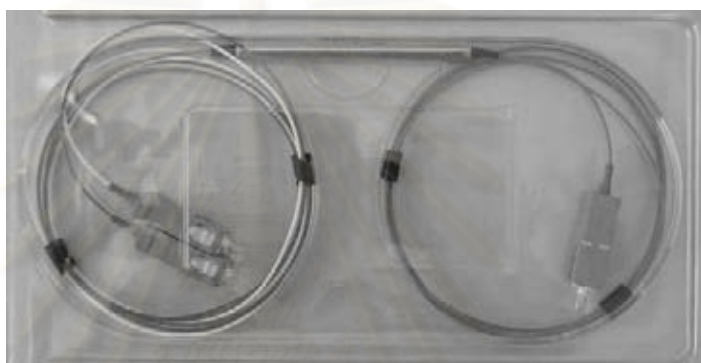
รูปที่ 5.10 Fiber Bragg Grating ที่ใช้ในการทดลองระบบ WDM

### 5.3.2 Optical Circulator

เป็นอุปกรณ์เสริมไว้ทำงานร่วมกับ FBG ในการกรองสัญญาณแสง แสงที่มีความยาวคลื่นตรงกับ FBG จะเกิดการสะท้อนกลับและวิ่งสวนทาง แสงสะท้อนกลับนี้จะไม่มีการออก จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ Circulator เข้าช่วย หลักการทำงานของตัว Circulator จะใช้การส่งผ่านสัญญาณแสงไปยังพอร์ตถัดไป โดยตัว Circulator จะประกอบด้วยพอร์ต 3 – 4 พอร์ตเป็นส่วนใหญ่ ยกตัวอย่างกรณีที่ Circulator มีพอร์ตทั้งหมด 3 พอร์ตนั้น แสงที่เข้ามาพอร์ต 1 จะส่งผ่านไป

ออกที่พอร์ต 2 ส่วนแสงที่เข้ามาพอร์ต 2 ก็จะส่งผ่านออกไปยังพอร์ต 3 นั้นเอง จากนั้นเชื่อมต่อพอร์ต 2 เข้ากับ FBG เมื่อมีแสงขาเข้าที่พอร์ต 1 ของ Circulator จะไปออกที่พอร์ต 2 ผ่านไปยัง FBG แสงที่ไม่ตรงกับความยาวคลื่นของ FBG ก็จะส่งผ่านออกจาก FBG ออกไป ส่วนแสงที่มีความยาวคลื่นตรงกับ FBG จะสะท้อนกลับเข้าพอร์ตที่ 2 ของตัว Circulator ซึ่งจะส่งผ่านสัญญาณแสงต่อออกไปที่พอร์ต 3 เพื่อเชื่อมต่อเข้ากับตัวรับสัญญาณทางแสงต่อไป

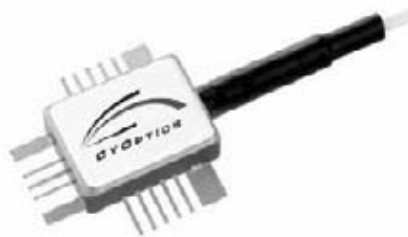
อุปกรณ์ Optical Circulator ที่ใช้ในการทดลอง ผลิตโดยบริษัท Agiltron Inc. ดังรูปที่ 5.11 ทำงานที่ความยาวคลื่นประมาณ 1550 nm มีค่าสูญเสียกำลังแบบแทรก (Insertion Loss) จากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2 เท่ากับ 1 dB และจากพอร์ต 2 ไปพอร์ต 3 เท่ากับ 0.5 dB



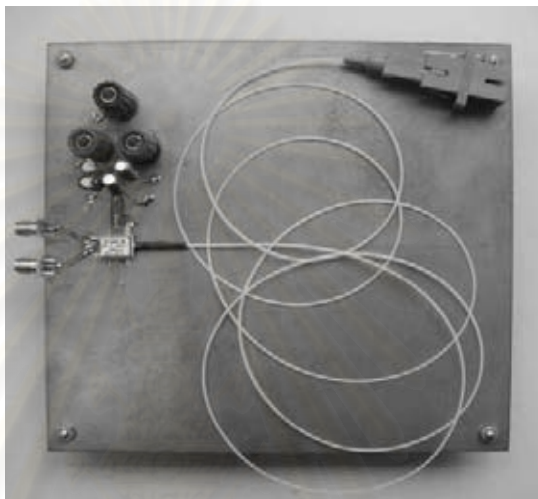
รูปที่ 5.11 Optical Circulator ที่ใช้ในการทดลองระบบ WDM

### 5.3.3 ตัวรับสัญญาณทางแสงชนิด Avalanche (Avalanche Photo Diode, APD)

ตัวรับสัญญาณทางแสงที่เลือกใช้ในการตรวจรับสัญญาณข้อมูลปลายทางคือชนิด APD โมดูล R195A ของบริษัท Cyopics ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 5.12 ภายในตัวอุปกรณ์นี้จะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นตัวรับแสงและตัวขยายสัญญาณ (Transimpedance Amplifier, TIA) อยู่ภายในโมดูลเดียวกัน โดย APD นี้จะมีค่า Sensitivity เท่ากับ  $-26$  dBm ใช้ไฟเลี้ยงป้อนเท่ากับ 27 V และส่วนของ TIA ใช้ไฟเลี้ยงป้อน  $-5.2$  V สัญญาณข้อมูลทางแสงขาเข้าจะถูกแปลงให้เป็นสัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้าขาออกแบบผลต่าง (Differential signal) ซึ่งจะมีพอร์ตขาออกเป็น DATA+ และ DATA- พร้อมทั้งมีการขยายสัญญาณไฟฟ้านี้ก่อนออกสู่ภายนอกให้มีขนาดประมาณ 700–1000 mVp-p นำอุปกรณ์ APD โมดูล R195A มาใช้งานโดยบัดกรี APD ลงบนบอร์ดทองแดงดังรูปที่ 5.13 [32]



รูปที่ 5.12 APD โมดูล R195A ที่ใช้ในการรับสัญญาณข้อมูลทางแสง (บริษัทCyoptics)



รูปที่ 5.13 บอร์ดตัวรับสัญญาณข้อมูลทางแสง

สัญญาณแสงปลายทางจะถูกตรวจจับด้วยตัว APD+TIA นี้ โดยต่อสัญญาณแสงปลายทางที่ต้องการตรวจจับเข้ากับ APD+TIA จากนั้นตัว APD จะแปลงจากสัญญาณทางแสงกลับเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า และ TIA จะขยายสัญญาณขึ้นพร้อมทั้งส่งออกเป็นสัญญาณชนิด Differential Signal

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 6

### ผลการวัดประสิทธิภาพของตัวส่งสัญญาณทางแสงผ่านระบบการรับส่ง

#### สัญญาณหลายความยาวคลื่น

ในการวัดประสิทธิภาพของตัวส่งสัญญาณทางแสงผ่านระบบการรับส่งสัญญาณหลายความยาวคลื่น จะทดลองทั้งหมด 5 ส่วน คือ (1) ทดลองคุณลักษณะของ EML (2) ทดลองการเชื่อมต่อบอร์ดประเมิน (Evaluation board) ของชิ้นส่วนต่างๆ ของตัวส่งสัญญาณทางแสง (3) ทดลองวัดประสิทธิภาพของตัวส่งสัญญาณทางแสงต้นแบบ (4) ทดสอบการรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสงชนิดต่างๆ (5) ทดลองระบบการรับส่งสัญญาณหลายความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing, WDM) (6) ทดลองการปรับเปลี่ยนระยะระหว่างช่องสัญญาณ (Channel spacing) โดยผลการทดลองจะนำเสนอในหัวข้อ 6.1 ถึง 6.6 ตามลำดับ

#### 6.1 คุณลักษณะของ EML

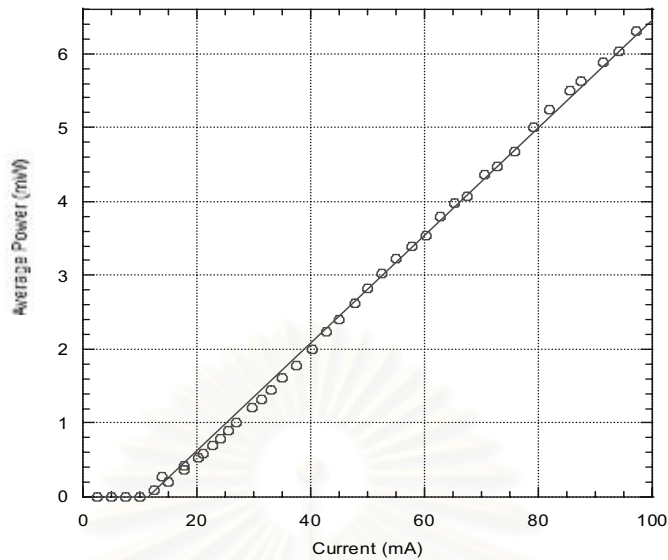
ผลการทดลองการวัดคุณลักษณะของ EML แบ่งออกเป็น การวัดคุณลักษณะของแสงขาออก (1) กรณีแสงต่อเนื่อง และ (2) กรณีที่แสงมีการมอดูเลตด้วยวิธีคูดกลืนคลื่นไฟฟ้า

##### 6.1.1 คุณลักษณะแสงต่อเนื่องของ EML

ตัว EML นั้นถ้าไม่มีสัญญาณข้อมูลเข้ามาที่ RF port จะมีลักษณะการทำงานเหมือน DFB ทุกประการ โดยจะผลิตแสงออกมาอย่างต่อเนื่อง เมื่อวัดค่ากำลังแสงขาออกด้วยตัววัดกำลังทางแสง (Optical power monitor) และวัดค่ากระแสป้อนเข้าด้วยตัวดิจิทัลมัลติมิเตอร์ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงขาออกและกระแสขั้วเลเซอร์แสดงดังรูปที่ 6.1

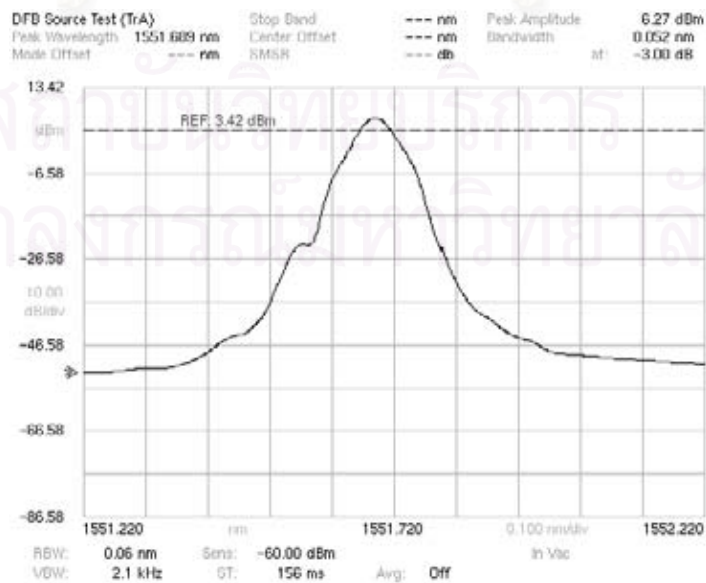
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Continuous Wavelength Characteristic of EML Module E4560



รูปที่ 6.1 คุณลักษณะของ DFB ภายใน EML ระหว่างกำลังแสงขาออกกับกระแสขับเลเซอร์

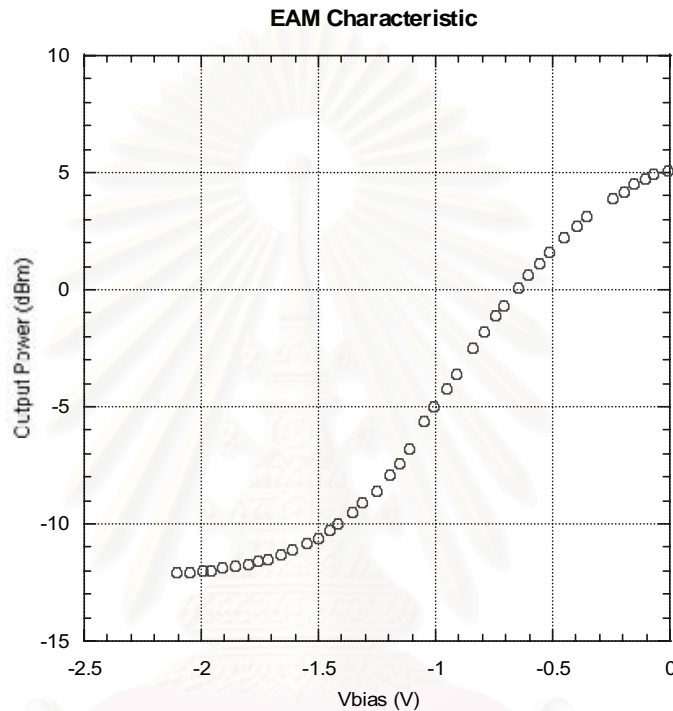
จากรูปที่ 6.1 จะพบว่ามีลักษณะของเส้นกราฟเป็นเส้นตรงสองช่วง แบ่งที่จุดกระแสขีดเริ่มเปลี่ยนตามทฤษฎีการทำงานของเลเซอร์ ซึ่งค่ากระแสขีดเริ่มเปลี่ยนของเลเซอร์ตัวนี้อยู่ที่ 11.16 mA ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 5–15 mA สอดคล้องกับ datasheet ของอุปกรณ์ [25] เมื่อป้อนกระแสขับเลเซอร์เท่ากับ 71 mA ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงการทำงานของเลเซอร์คือ 50–100 mA จะได้กำลังแสงขาออกมีค่า 4.4 mW ตรงตามเส้นกราฟ ซึ่งเท่ากับ 6.4 dBm คลื่นแสงต่อเนื่องที่ผลิตจากเลเซอร์นั้นมีเยียดความยาวคลื่นอยู่ที่ 1551.689 nm ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า 1552.72 nm ที่ต้องการและมีค่าแถบความกว้างสเปกตรัมเท่ากับ 0.052 nm ดังค่าแสดงในรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 สเปกตรัมของแสงขาออกของตัวเลเซอร์

### 6.1.2 คุณลักษณะของ EML กรณีที่มีการมอดูเลตด้วยวิธีดุดกลืนคลื่นไฟฟ้า

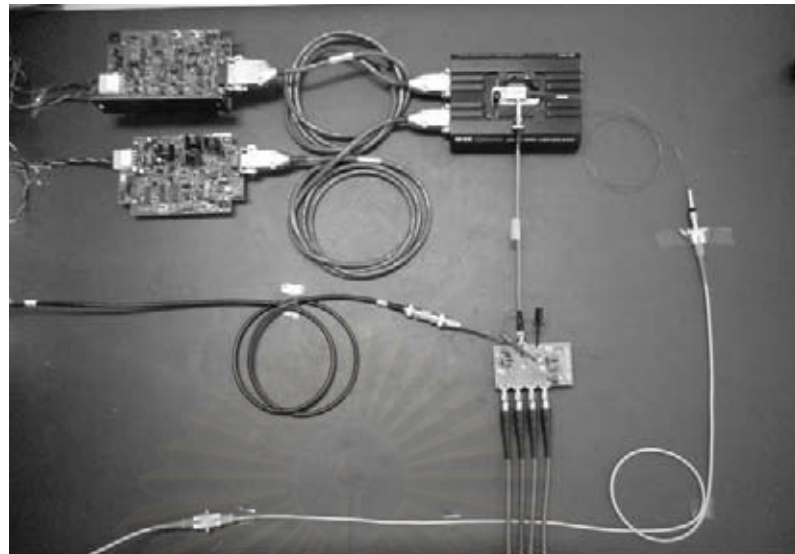
เมื่อทดลองป้อนแรงดันไบแอสติดลบที่ฝั่งตัวมอดูเลเตอร์ EAM ของเลเซอร์ซึ่งหัวต่อเป็นชนิด SMP แรงดันที่ป้อนจะทำให้แสงที่มาจากตัวเลเซอร์ถูกดุดกลืนเป็นสัดส่วนกับแรงดันที่ป้อน โดยแสงที่เหลือผ่านจากตัว EAM จะเป็นแสงขาออกจากฝั่งตัวส่งสัญญาณทางแสง ซึ่งจะมีกำลังแสงขาออกวัดได้เป็นสัดส่วนกับแรงดันไบแอสดังรูปที่ 6.3



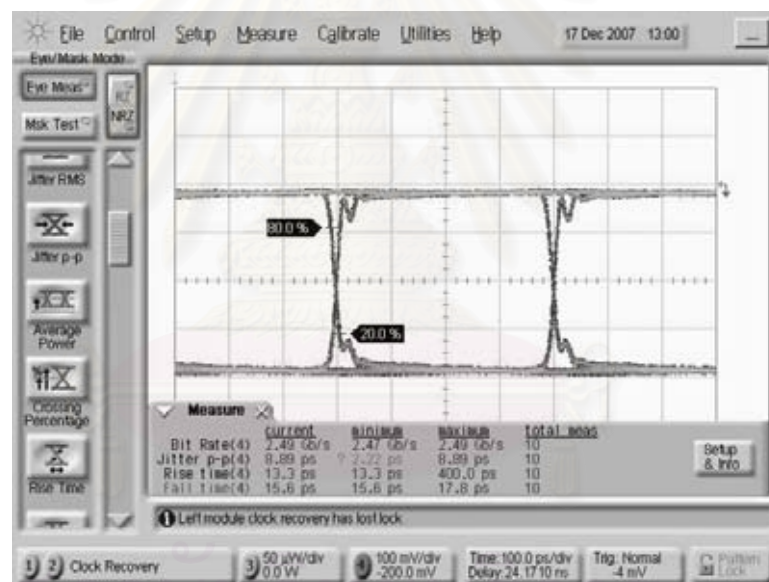
รูปที่ 6.3 คุณลักษณะของ EAM ระหว่างกำลังแสงขาออกกับแรงดันไบแอสที่พอร์ต RF

จากรูปที่ 6.3 เมื่อมีแรงดันติดลบมากเข้ามาขับตัวมอดูเลเตอร์ EAM จะทำให้แสงถูกดุดกลืนมาก แสงที่เหลือออกมาข้างภายนอกเลเซอร์จึงมีกำลังแสงน้อย ในทางกลับกัน ถ้ามีแรงดันติดลบน้อยเข้ามาขับตัวมอดูเลเตอร์ แสงก็จะถูกดุดกลืนเพียงเล็กน้อย แสงที่เหลือออกมาข้างภายนอกจึงมีกำลังแสงมาก ผลการทดลองคุณลักษณะของ EAM สอดคล้องกับผลทางทฤษฎีจากรูปที่ 2.8

## 6.2 การเชื่อมต่อบอร์ดประเมินเพื่อทดลองส่งสัญญาณทางแสง



รูปที่ 6.4 การเชื่อมต่อบอร์ดประเมินของชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่างๆ ของตัวส่งสัญญาณทางแสง

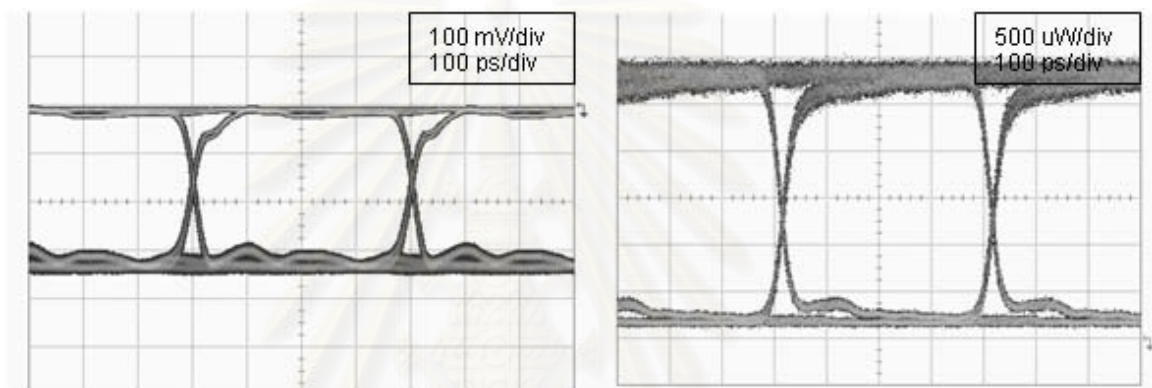


รูปที่ 6.5 สัญญาณข้อมูลขาเข้า ระดับสัญญาณ CML

เชื่อมต่อบอร์ดประเมินของชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกันดังรูปที่ 6.4 ทดลองป้อนสัญญาณข้อมูล Common Mode Logic (CML) ที่มีสัญญาณบิต '0' อยู่ที่ระดับแรงดัน  $-400$  mV และสัญญาณบิต '1' อยู่ที่ระดับ  $0$  V ด้วยอัตราข้อมูลความเร็ว  $2.488$  Gb/s ซึ่งเป็นอัตราความเร็วมาตรฐาน OC-48/STM-16 โดยมีรูปแบบข้อมูลเป็น Pseudo Random Bit Sequence (PRBS)  $2^{31} - 1$  polynomial ซึ่งมีลักษณะแผนภาพรูปตา (Eye diagram) ดังรูปที่ 6.5 ป้อนเข้าตัว EAM Driver แล้วปรับค่าความต้านทานชนิดปรับค่าได้ภายในบอร์ดประเมินของ EAM Driver เพื่อให้ได้สัญญาณขาออกเป็นแรงดันไบแอสที่มีค่า  $0$  V และแรงดันมอดูเลตมีค่า  $2$  V<sub>p-p</sub> ให้เหมาะสมกับ

ช่วงการทำงานของเลเซอร์ที่มีช่วงการทำงานอยู่ที่  $-1 V_{p-p}$  ถึง  $-2.5 V_{p-p}$  ดังรูปที่ 6.6 (ก) จากรูปนั้นสัญญาณได้มีการลดทอนด้วยอุปกรณ์ลดทอนกำลัง (Power attenuator) เพื่อป้องกันแรงดันเกินขีดจำกัดของเครื่องมือวัดสัญญาณความเร็วสูง โดยค่าการลดทอนที่ใช้เท่ากับ 16 dB หรือ 6.31 เท่า

สำหรับที่ตัวควบคุมอุณหภูมิได้ตั้งค่าขีดจำกัดกระแส TE เท่ากับ 0.5 mA ตามขีดความสามารถของเลเซอร์ที่ทนได้ ส่วนตัวควบคุมกระแสก็ตั้งขีดจำกัดกระแสไว้ที่ 100 mA เพราะช่วงการทำงานของเลเซอร์อยู่ที่ 50 – 100 mA ในการทดลองครั้งนี้ได้ตั้งค่ากระแสขับเลเซอร์ที่ 65.25 mA เพื่อให้ได้กำลังแสงขาออกประมาณ 6 dBm

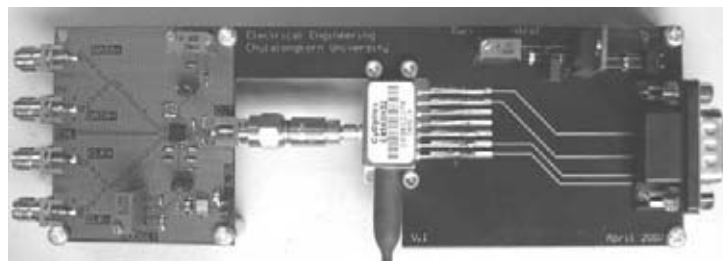


รูปที่ 6.6 (ก) สัญญาณข้อมูลไฟฟ้าขาเข้าเลเซอร์

(ข) สัญญาณข้อมูลทางแสงขาออก

จาก รูปที่ 6.6 (ข) แผนภาพรูปตาของสัญญาณทางแสงขาออกที่อัตราข้อมูล 2.488 Gb/s มีอัตราส่วนระหว่างบิต '1' ต่อบิต '0' หรือ Extinction Ratio เท่ากับ 11.44 dB ซึ่งมากกว่าค่ามาตรฐานของ ITU-T ที่กำหนดไว้ว่าควรมีค่าเกิน 8.2 dB โดยมีกำลังแสงเฉลี่ย 1.2 mW ส่วนช่วงเวลาขาขึ้นวัดได้ 42.2 ps และช่วงเวลาขาลงวัดได้ 28.9 ps ซึ่งตรงตามคุณลักษณะสมบัติของ EML ตัวนี้

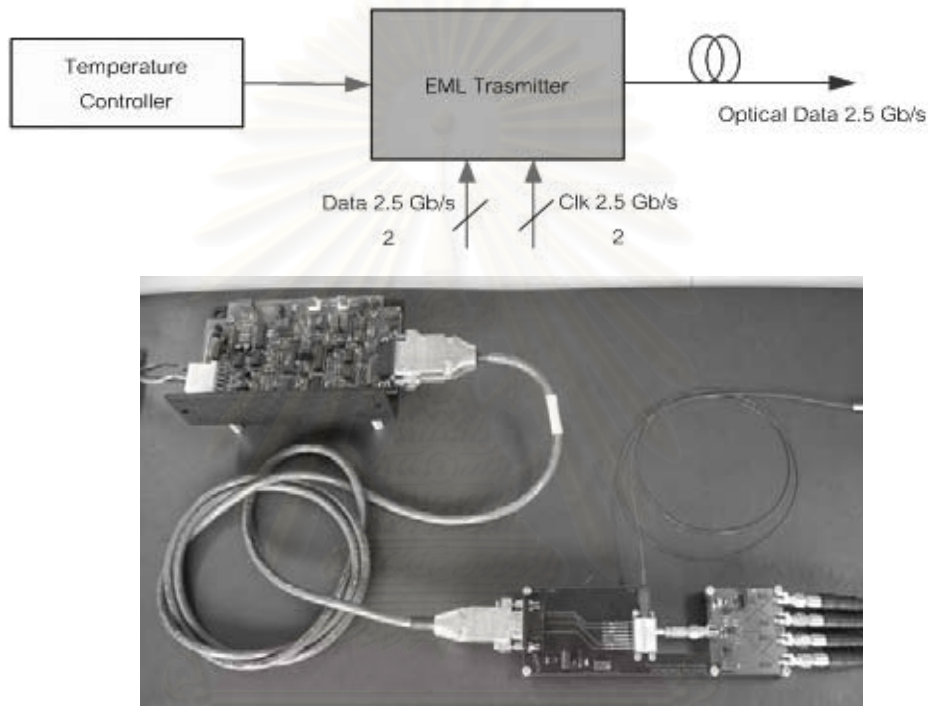
### 6.3 ประสิทธิภาพของตัวส่งสัญญาณทางแสงต้นแบบ



รูปที่ 6.7 ตัวส่งสัญญาณแสงต้นแบบ



การวัดประสิทธิภาพของตัวส่งสัญญาณแสงจะต่อตัวส่งสัญญาณทางแสงต้นแบบที่ ออกแบบไว้ในบทที่ 4 ดังรูปที่ 6.7 เข้ากับตัวควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งการเชื่อมต่อเป็นดังรูปที่ 6.8 ป้อน ไฟเลี้ยงเลเซอร์ 3.3 V และป้อนไฟเลี้ยงชิปตัวขับ EAM  $-5.2$  V จากนั้นสร้างสัญญาณข้อมูล CML ที่มีสัญญาณบิต '0' อยู่ที่ระดับแรงดัน  $-400$  mV และสัญญาณบิต '1' อยู่ที่ระดับ  $0$  V ด้วยอัตรา ข้อมูลความเร็ว 2.488 Gb/s (OC-48/STM-16) ที่มีรูปแบบข้อมูลเป็น PRBS  $2^{31} - 1$  polynomial ชนิด Differential signal ป้อนเข้าพอร์ต Input DATA+, DATA-, CLK+ และ CLK-

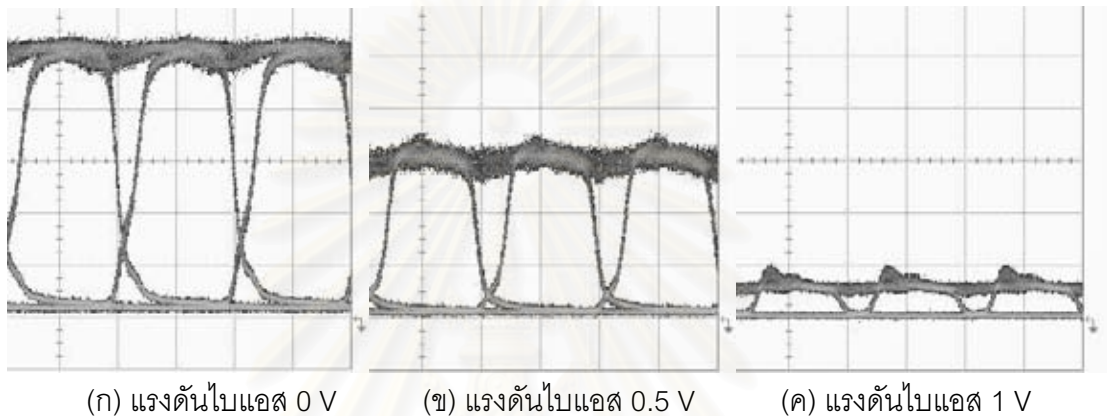


รูปที่ 6.8 การเชื่อมต่อตัวส่งสัญญาณทางแสง

ตัวส่งสัญญาณทางแสงต้นแบบสามารถปรับค่ากระแสไบแอสตัวเลเซอร์ให้มีขนาด  $50 - 100$  mA นอกจากนี้ยังสามารถปรับขนาดแรงดันไบแอสและขนาดแรงดันมอดูเลตของ สัญญาณขับ EAM ได้ โดยปรับค่าความต้านทานชนิดปรับค่าได้บนบอร์ด เพื่อให้ได้สัญญาณขา ออกเป็นแรงดันไบแอสที่มีค่าระหว่าง  $0$  V ถึง  $1$  V และแรงดันมอดูเลตมีค่า  $1 - 2.5$  V<sub>p-p</sub> โดยปรับ ให้เหมาะกับช่วงการทำงานของเลเซอร์ ซึ่งมีช่วงการทำงานของเลเซอร์อยู่ที่  $-1$  V<sub>p-p</sub> ถึง  $-2.5$  V<sub>p-p</sub>) สัญญาณแสงขาออกที่ถูกมอดูเลตทางความเข้มให้มีข้อมูลอัตราความเร็ว 2.488 Gb/s อยู่ ด้วย

### 6.3.1 แผนภาพรูปตาของแสงขาออก

ตั้งค่ากระแสไบแอสเดินหน้าเพื่อขับเลเซอร์เท่ากับ 71 mA และไม่มีการมอดูเลต ระดับกำลังแสงขาออกของสัญญาณแสงต่อเนื่องจะมีค่าเท่ากับ 6.4 dBm จากนั้นทำมอดูเลตด้วยสัญญาณข้อมูลไฟฟ้าชนิด CML เข้าตัวส่งสัญญาณทางแสงต้นแบบ โดยคงค่าแรงดันมอดูเลตไว้ และปรับค่าขนาดของแรงดันไบแอสตั้งแต่ 0 V ถึง 1 V สัญญาณแสงขาออกมีลักษณะดังแผนภาพรูปตาที่ 6.9



รูปที่ 6.9 แผนภาพรูปตาของสัญญาณแสงขาออกเมื่อคงค่าแรงดันมอดูเลตและปรับแรงดันไบแอส

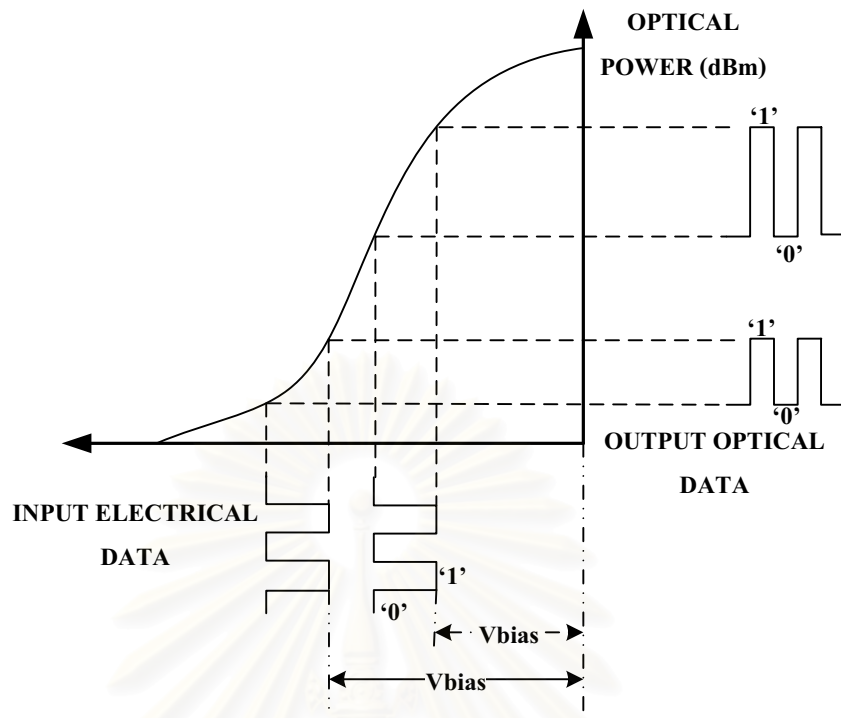
จากรูปที่ 6.9 จะเห็นได้ว่าเมื่อปรับขนาดแรงดันไบแอสมากขึ้นจะทำให้สัญญาณมีระดับกำลังทางแสงลดลง ค่าต่างๆ ที่อ่านได้ในแต่ละระดับแรงดันไบแอสเป็นดังต่อไปนี้

(ก) สัญญาณแสงเมื่อแรงดันไบแอสเท่ากับ 0 V มีกำลังแสง 2.702 mWp-p มีค่า EX เท่ากับ 12.9 dB ส่วนค่า rise time และ fall time มีค่าเท่ากับ 76 และ 44 ps ตามลำดับ

(ข) สัญญาณแสงเมื่อแรงดันไบแอสเท่ากับ 0.5 V มีกำลังแสง 1.704 mWp-p มีค่า EX เท่ากับ 12.62 dB ส่วนค่า rise time และ fall time มีค่าเท่ากับ 74 และ 36 ps ตามลำดับ

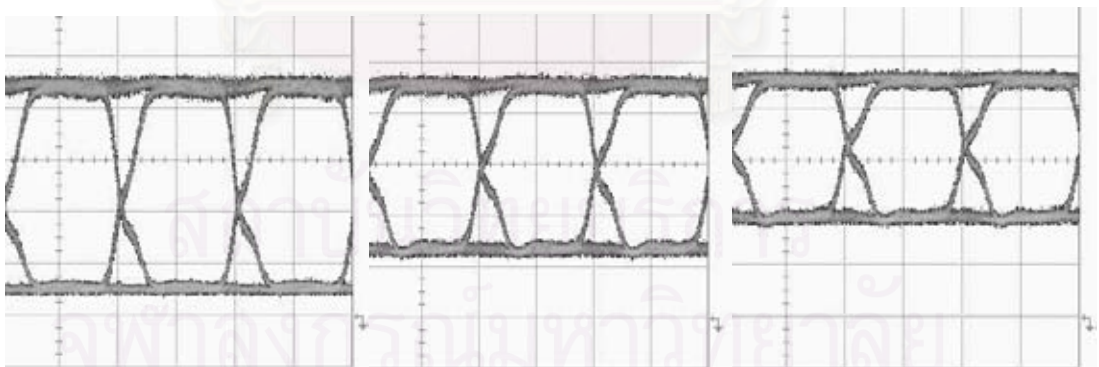
(ค) สัญญาณแสงเมื่อแรงดันไบแอสเท่ากับ 1 V มีกำลังแสง 0.485 mWp-p มีค่า EX เท่ากับ 9.59 dB ส่วนค่า rise time และ fall time มีค่าเท่ากับ 67 และ 35 ps ตามลำดับ

จากคุณลักษณะของ EML ดังรูปที่ 6.10 เมื่อคงค่าแรงดันมอดูเลตไว้ แล้วปรับระดับของแรงดันไบแอส จะพบว่า เมื่อปรับขนาดแรงดันไบแอสให้มีค่าสูงขึ้น ระดับสัญญาณแสงขาออกจากยอดถึงยอด (peak-to-peak) จะลดลง ส่งผลให้ค่า EX ลดลง ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับทางทฤษฎี



รูปที่ 6.10 ระดับสัญญาณแสงเมื่อปรับระดับแรงดันไบแอส

จากนั้นเปลี่ยนการทดลองโดยคงค่าแรงดันไบแอสที่ 0 V และปรับค่าแรงดันมอดูเลตให้ตั้งตั้งแต่ 2 Vp-p จนถึงค่าน้อยที่สุดเท่าที่ปรับได้คือ 1 Vp-p ผลการทดลองเป็นแผนภาพรูปตาดังรูปที่ 6.11



(ก) แรงดันมอดูเลต 2 Vp-p (ข) แรงดันมอดูเลต 1.5 Vp-p (ค) แรงดันมอดูเลต 1 Vp-p

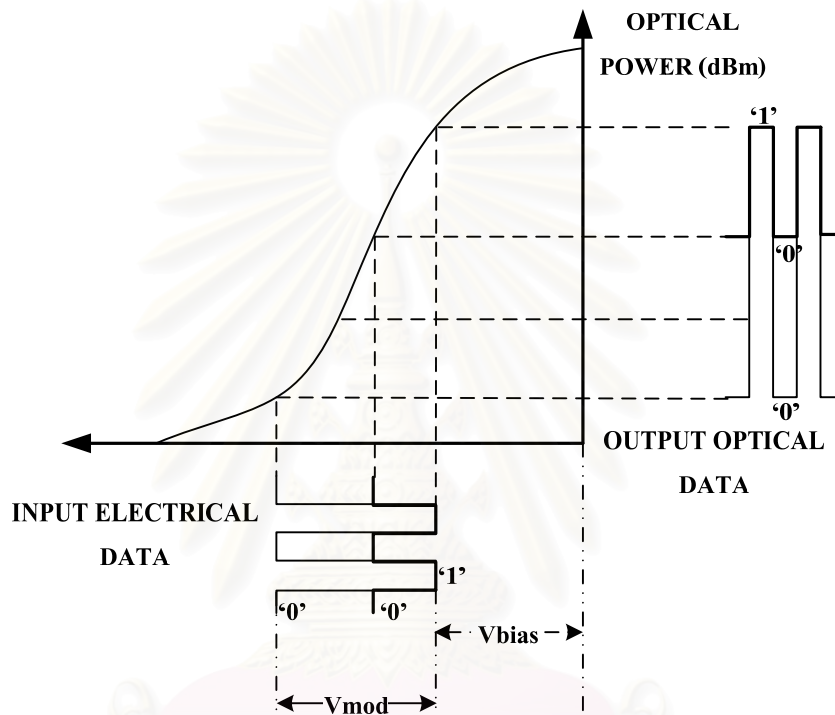
รูปที่ 6.11 แผนภาพรูปตาของสัญญาณขาออกเมื่อคงค่าแรงดันไบแอสและปรับแรงดันมอดูเลต

จากรูปที่ 6.11 จะเห็นได้ว่าเมื่อปรับขนาดแรงดันมอดูเลตลดลงจะทำให้สัญญาณมีระดับกำลังทางแสงจากยอดถึงยอดลดลงเนื่องจาก ระดับสัญญาณบิต 0 จะมีค่าสูงขึ้น ทำให้ EX มีค่าลดลง ค่าต่างๆ ที่อ่านได้ในแต่ละระดับแรงดันมอดูเลตเป็นดังต่อไปนี้

(ก) สัญญาณแสงเมื่อแรงดันมอดูเลตเท่ากับ  $2 V_{p-p}$  มีกำลังแสง  $2.116 mW_{p-p}$  มีค่า EX เท่ากับ  $8.97 dB$  ส่วนค่า rise time และ fall time มีค่าเท่ากับ  $89$  และ  $84 ps$  ตามลำดับ

(ข) สัญญาณแสงเมื่อแรงดันมอดูเลตเท่ากับ  $1.5 V_{p-p}$  มีกำลังแสง  $1.792 mW_{p-p}$  มีค่า EX เท่ากับ  $5.21 dB$  ส่วนค่า rise time และ fall time มีค่าเท่ากับ  $98$  และ  $93 ps$  ตามลำดับ

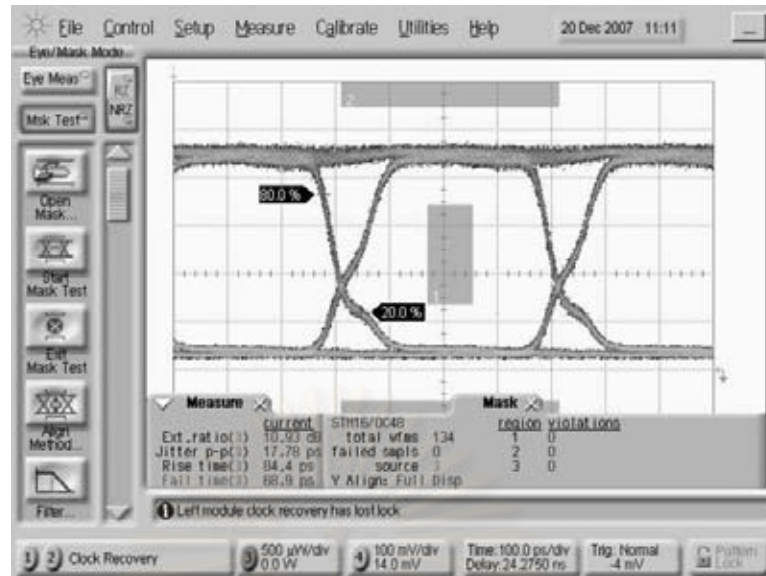
(ค) สัญญาณแสงเมื่อแรงดันมอดูเลตเท่ากับ  $1 V_{p-p}$  มีกำลังแสง  $1.489 mW_{p-p}$  มีค่า EX เท่ากับ  $3.72 dB$  ส่วนค่า rise time และ fall time มีค่าเท่ากับ  $102$  และ  $93 ps$  ตามลำดับ



รูปที่ 6.12 ระดับสัญญาณแสงเมื่อปรับระดับแรงดันมอดูเลต

จากคุณลักษณะของ EML ดังรูปที่ 6.12 เมื่อคงค่าแรงดันไบแอสไว้ แล้วปรับระดับของแรงดันมอดูเลต จะพบว่า เมื่อปรับระดับแรงดันมอดูเลตให้มีค่าต่ำลง ระดับสัญญาณแสงขาออก จากยอดถึงยอด (peak-to-peak) จะลดลงเนื่องจากระดับสัญญาณบิต 0 มีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ค่า EX ลดลง ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับทางทฤษฎี

จากนั้นตั้งค่าแรงดันไบแอสและแรงดันมอดูเลตให้ได้สัญญาณที่มีคุณลักษณะที่เหมาะสม เพื่อนำไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป โดยปรับแรงดันไบแอสประมาณ  $0 V$  และแรงดันมอดูเลตประมาณ  $2 V_{p-p}$  ดังรูปที่ 6.13

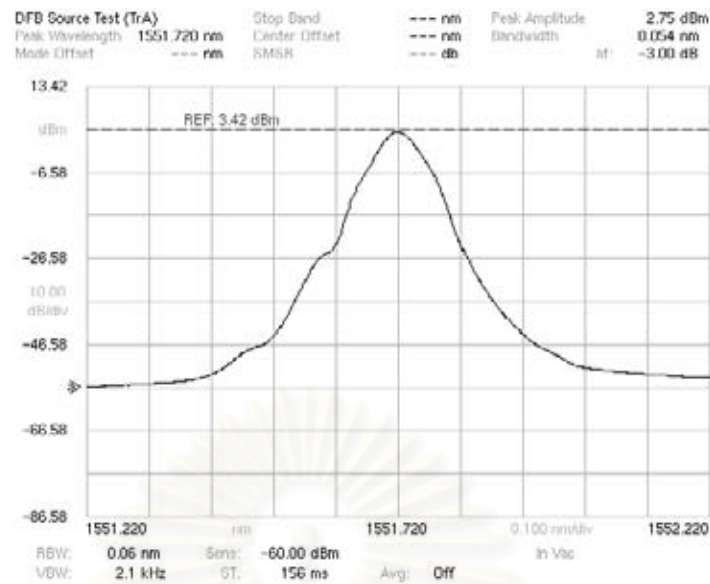


รูปที่ 6.13 แผนภาพรูปตาของสัญญาณขาออกของตัวส่งสัญญาณทางแสงต้นแบบ 2.5 Gb/s

แผนภาพรูปตาของสัญญาณทางแสงในรูปที่ 6.13 มีค่า EX เท่ากับ 10.93 dB ซึ่งมีค่ามากกว่าค่ามาตรฐานตาม ITU ซึ่งกำหนดให้มีค่าอย่างต่ำเท่ากับ 8.2 dB โดยมี Jitter peak-to-peak เท่ากับ 17.78 ps ส่วนค่า Rise time และ Fall time (มีค่า 20–80% จากระดับความสูงบนสุด) มีค่าเท่ากับ 84.4 และ 68.9 ps ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบกับคุณลักษณะของสัญญาณแสงที่มาจากบอร์ดประเมิน ในหัวข้อ 6.2 แล้ว สัญญาณแสงที่ได้มีค่า EX สูงใกล้เคียงกัน แต่ Jitter p-p และขอบสัญญาณ Rise time และ Fall time นั้นมีค่ามากกว่า ทำให้สัญญาณมีการเปิดกว้างของแผนภาพตาน้อยกว่าเล็กน้อย และบริเวณขอบขาขึ้นและขาลงของสัญญาณมีความชันไม่สม่ำเสมอ เนื่องด้วยสายเส้นวงจรที่ออกแบบมีค่าอิมพีแดนซ์ไม่เท่ากับขาของอุปกรณ์ หรือที่รู้จักกันทั่วไปในชื่อ Matching impedance ทำให้เกิดการสะท้อนกลับของสัญญาณบางส่วนบนบอร์ดที่ได้ออกแบบไว้

### 6.3.2 สเปกตรัมของแสงขาออก

นำสัญญาณแสงขาออกจากต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงในรูปที่ 6.13 ซึ่งวัดกำลังแสงเฉลี่ยด้วย Power monitor ได้เท่ากับ 3 dBm ต่อบ้อนเข้ากับเครื่องมือวัดสเปกตรัมทางแสง (Optical Spectrum Analyzer, OSA) ได้สเปกตรัมทางแสงเป็นดังรูปที่ 6.14

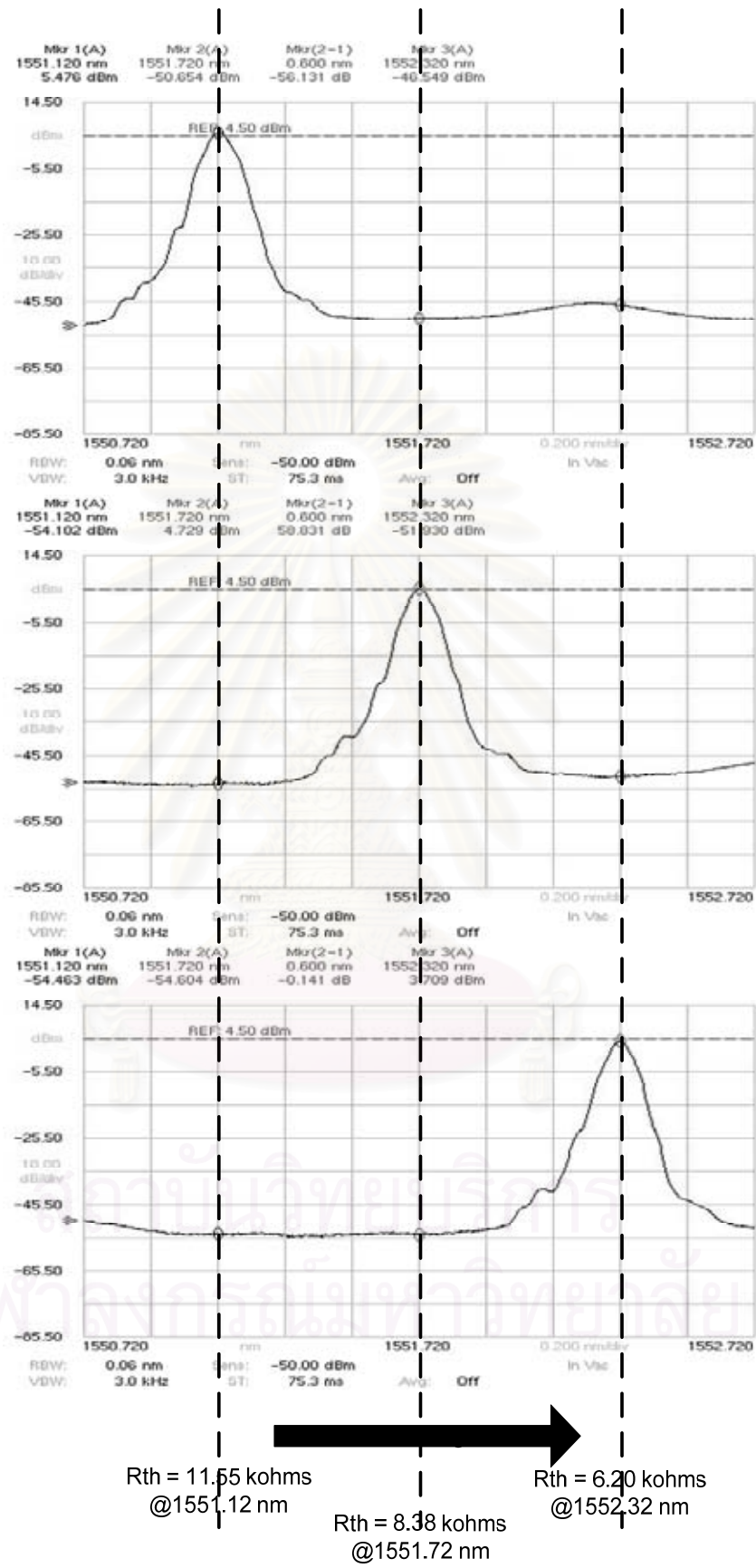


รูปที่ 6.14 สเปกตรัมทางแสงของสัญญาณทางแสงขาออกของตัวส่งสัญญาณต้นแบบ

สเปกตรัมทางแสงขาออกจากตัวส่งสัญญาณแสงต้นแบบจากรูปที่ 6.14 มีค่ายอดกำลังแสงสูงสุดเท่ากับ 2.75 dBm ที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 1552.72 nm และมีความกว้างสเปกตรัมเท่ากับ 0.054 dBm

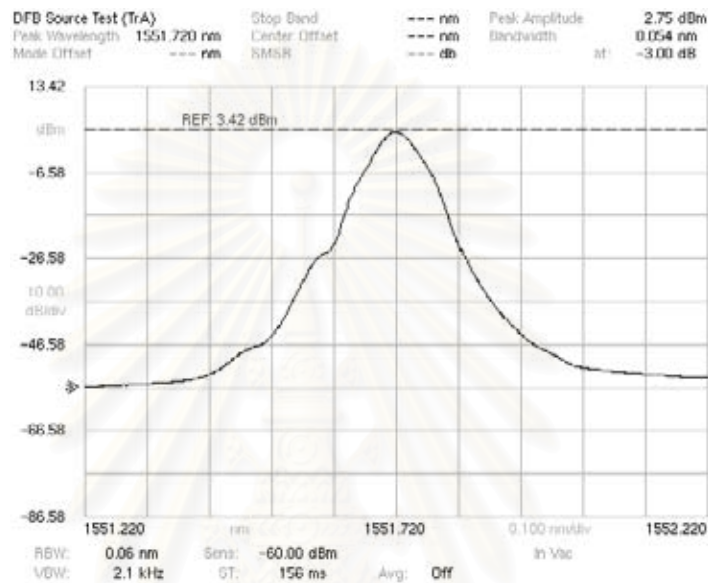
### 6.3.3 การควบคุมความยาวคลื่นของเลเซอร์ด้วยตัวควบคุมอุณหภูมิ

การควบคุมให้ความยาวคลื่นของเลเซอร์คงที่ตรงตามตำแหน่งที่ต้องการ จำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิของเลเซอร์ด้วยตัวควบคุมอุณหภูมิ จากผลการทดลองรูปที่ 6.15 สรุปได้ว่า TEC ที่มีประกอบอยู่ในตัว EML สามารถควบคุมอุณหภูมิของตัวเลเซอร์ ซึ่งส่งผลต่อค่าความยาวคลื่นของสัญญาณแสงที่ตัวเลเซอร์สร้างขึ้น ค่าความต้านทานของ Thermistor ในตัว EML มีค่าประมาณ 10 kohms จากอุณหภูมิห้องหากทำการปรับความต้านทานของ Thermistor ให้สูงขึ้นเป็น 11.55 kohms กระแสบวก TE จะไหลเข้าสู่ TEC ในตัวเลเซอร์ ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิของตัวเลเซอร์ต่ำลงและให้ค่าความยาวคลื่นลดลง โดยมีค่าเป็น 1551.12 nm ในการปรับจูนกระแสควรปรับทีละน้อย ค่ากระแสบวก TE ต้องไม่เกิน 1.3 A ในทางกลับกัน หากทำการปรับความต้านทานของ Thermistor ให้ต่ำลงเท่ากับ 6.20 kohms กระแสลบ TE จะไหลเข้าสู่ TEC ในตัวเลเซอร์ ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิของตัวเลเซอร์ร้อนขึ้นและทำให้ค่าความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น เป็นค่า 1552.32 nm ในการปรับจูนกระแส ควรปรับทีละน้อย ค่ากระแสลบ TE ต้องไม่ต่ำกว่า -0.5 A ซึ่งช่วงในการปรับนั้นสามารถปรับให้ความยาวคลื่นเปลี่ยนแปลงได้ประมาณ 3 nm



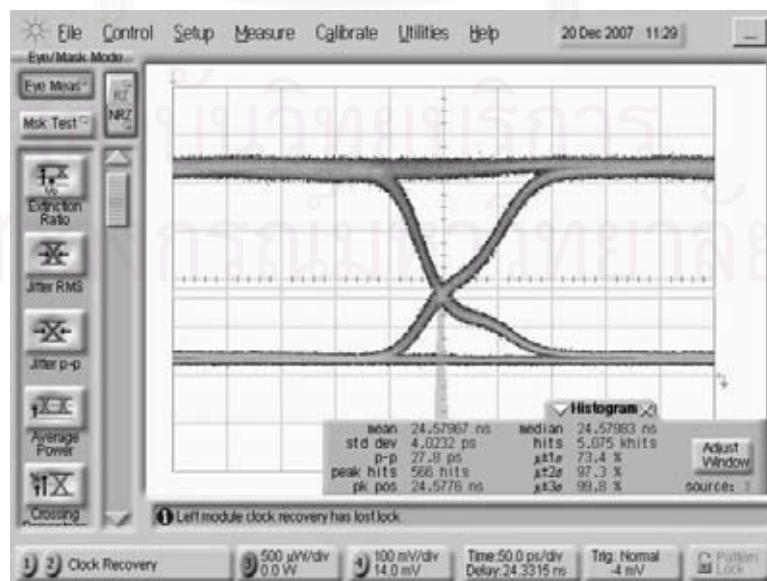
รูปที่ 6.15 ผลการปรับจูนความยาวคลื่นของเลเซอร์ด้วยตัวควบคุมอุณหภูมิ

ซึ่งทำยที่สุดในการปรับความยาวคลื่นให้มีค่าเท่ากับ 1551.72 nm ต้องปรับค่าความต้านทานของ Thermistor มีค่าเท่ากับ 8.43 kohms ถึงจะทำให้เลเซอร์เปล่งแสงความยาวคลื่น 1551.72 สอดคล้องกับมาตรฐาน ITU-Grid 694.1 โดยตัวควบคุมอุณหภูมิจะควบคุมอุณหภูมิเลเซอร์ให้คงที่ตลอด ทำให้สเปกตรัมของแสงขาออกมีความยาวคลื่นคงที่ที่ 1551.72 nm เพื่อนำไปทดลองในระบบ WDM ต่อไป รูปที่ 6.16 ซึ่งมีค่ายอดเท่ากับ 2.75 dBm และความกว้างของสเปกตรัมมีค่า 0.054 nm



รูปที่ 6.16 สเปกตรัมสัญญาณทางแสงขาออกจากตัวส่งสัญญาณทางแสง

### 6.3.4 การสายของสัญญาณ (Jitter)



รูปที่ 6.17 วัด jitter ด้วยวิธี Histogram



วัดการส่ายทั้งหมด (Total Jitter) ของสัญญาณทางแสงขาออกที่ตำแหน่งสัญญาณขาขึ้น และสัญญาณขาลงตัดกันบนแผนภาพรูปตาด้วยการวัด histogram ของสัญญาณดังรูปที่ 6.17 เมื่อเก็บข้อมูล histogram ทั้งหมด 5.075 khits วัดค่า Jitter peak-to-peak ได้เท่ากับ 27.8 ps และกราฟ histogram ที่ได้มีลักษณะเป็นระฆังคว่ำแบบเกาส์เซียน โดยมีค่าความแปรปรวน (Standard Deviation,  $\sigma$ ) เท่ากับ 4.032 ps

### 6.3.5 พลังงานที่บอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสงใช้ (Power consumption)

ในการวัดพลังงานที่บอร์ดของตัวส่งสัญญาณทางแสงต้นแบบต้องการใช้ ทำโดยต่อแอมป์มิเตอร์แบบอนุกรมเข้ากับวงจรไฟเลี้ยง ซึ่งมีการต่อไฟเลี้ยงเข้ากับตัวส่งสัญญาณทางแสงทั้งหมดสองวงจรถือ ไฟเลี้ยง 3.3 V เพื่อไบแอสขั้วตัวเลเซอร์ และไฟเลี้ยง -5.2 V เพื่อเลี้ยงชิปตัวขับมอดูเลเตอร์ ซึ่งกระแสไฟที่วัดได้ขณะที่อุปกรณ์ทำงานคือ 95.3 mA และ -203.4 mA ตามลำดับ

จากสมการ  $P = IV$

$$P1 = (95.3 \text{ mA})(3.3\text{V}) = 314.49 \text{ mW}$$

$$P2 = (-203.4 \text{ mA})(-5.2\text{V}) = 1057.68 \text{ mW}$$

$$P_{\text{total}} = P1 + P2 = 314.49 + 1057.68 = 1372.17 \text{ mW}$$

ดังนั้นต้นแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงด้วยวิธีดูคัลลินคลื่นไฟฟ้าที่ออกแบบขึ้นมาจะกินพลังงานทั้งหมดประมาณ 1.37 W ทั้งนี้ไม่รวมพลังงานที่ใช้ปรับความยาวคลื่นจากบอร์ดตัวควบคุมอุณหภูมิ

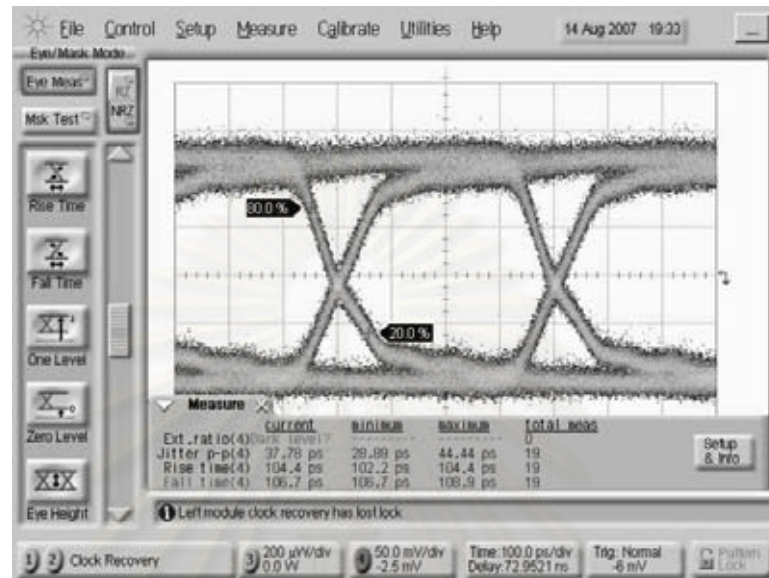
## 6.4 การทดสอบรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสงชนิดต่างๆ

การทดสอบรับส่งสัญญาณด้วยตัวส่งสัญญาณทางแสง แบ่งการทดลองออกเป็น 3 กรณี คือ (1) การป้อนกลับ (Loop back) (2) ผ่านเส้นใยนำแสงชนิด SSMF ด้วยความยาว 50 km (3) ผ่านเส้นใยนำแสงชนิด Truewave-RS ด้วยความยาว 50 km ก่อนถึงภาครับสัญญาณ

### 6.4.1 การป้อนกลับ (Loop back)

เมื่อนำสัญญาณขาออกจากตัวส่งสัญญาณทางแสงในรูปที่ 6.13 พร้อมทั้งปรับจูนความยาวคลื่นให้คงที่เท่ากับ 1551.72 nm ป้อนกลับเข้าทางภาครับสัญญาณข้อมูลทางแสงเพื่อแปลงกลับเป็นสัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้าภาครับสัญญาณทางแสงประกอบด้วยตัวตรวจจับแสงชนิด

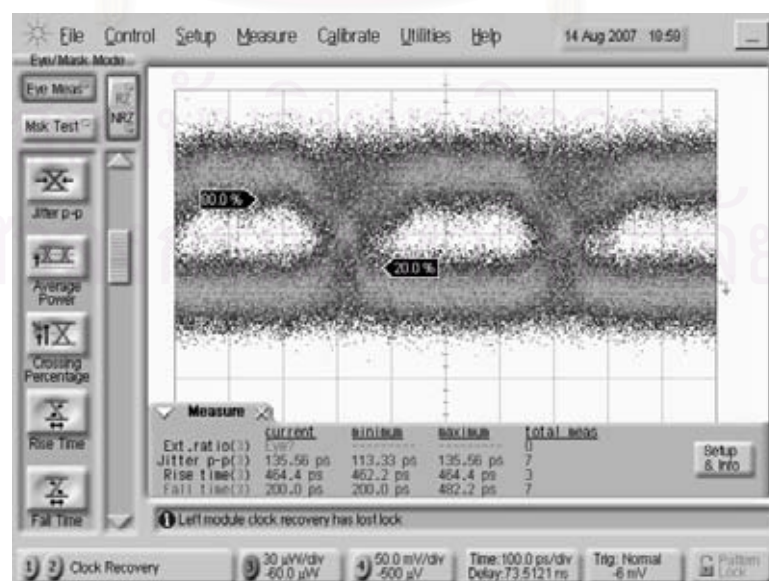
APD พร้อมตัวขยายสัญญาณชนิด TIA เมื่อปรับลดทอนกำลังแสงลงด้วยตัว variable optical attenuator ให้เหลือเท่ากับ  $-16$  dBm ลักษณะสัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้าที่ตรวจจับได้เป็นดังรูปที่ 6.18 ซึ่งมีแอมพลิจูดจากยอดถึงยอดเท่ากับ  $275.90$  mVp-p และค่า Jitter peak-to-peak เท่ากับ  $37.78$  ps ส่วนค่า Rise time และ Fall time มีค่าเท่ากับ  $104.4$  และ  $106.7$  ps ตามลำดับ



รูปที่ 6.18 แผนภาพรูปตาสัญญาณทางไฟฟ้าขาออกจาก APD+TIA

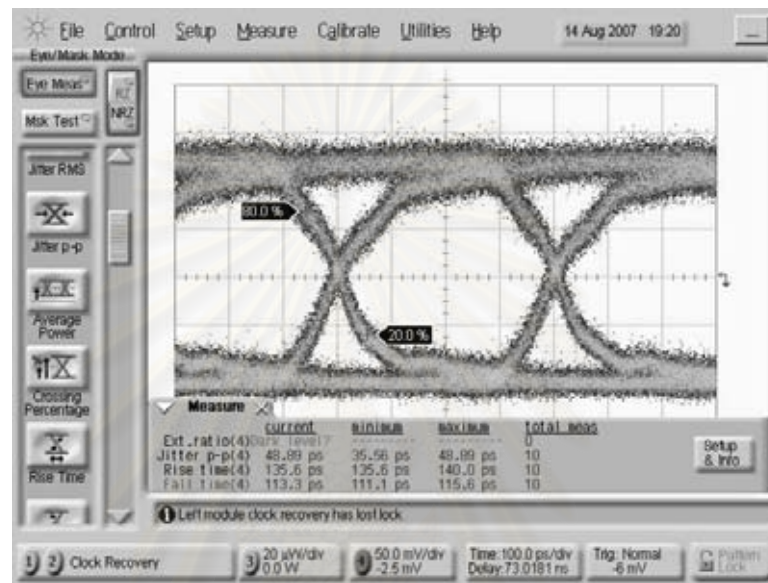
#### 6.4.2 ผ่านเส้นใยนำแสงชนิด SSMF 50 km

เมื่อนำสัญญาณทางแสงรูปที่ 6.13 ส่งผ่านเส้นใยนำแสงชนิด SSMF เป็นระยะทางประมาณ 50 km ซึ่งประกอบด้วยม้วนเส้นใยนำแสงทั้งหมด 18 ม้วนดังที่กล่าวในหัวข้อ 5.2.1 ซึ่งมีระยะทางรวมเท่ากับ 50.166 km โดยมีค่ากำลังสูญเสียรวมเท่ากับ 13.95 dB และค่า fiber dispersion เท่ากับ 18 ps/km/nm ที่ความยาวคลื่นแถบ 1550 nm



รูปที่ 6.19 สัญญาณแสงขาออกจาก SSMF 50 km

จากการวัดด้วยอุปกรณ์ Power monitor กำลังแสงขาเข้าเส้นใยนำแสง SSMF มีค่าเท่ากับ 3 dBm ส่วนสัญญาณขาออกมีกำลังแสงเท่ากับ -11 dBm ดังนั้นค่ากำลังสูญเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นมีค่าประมาณ  $3 - (-11) = 14$  dB ตรงกับค่ากำลังสูญเสียที่วัดไว้ที่ -13.95 dB ลักษณะของสัญญาณขาออก จากเส้นใยนำแสง SSMF ก่อนเข้าภาครับมีลักษณะดังรูปที่ 6.19 มีค่า Jitter peak-to-peak เท่ากับ 135.56 ps ส่วน Rise time และ Fall time มีค่าเท่ากับ 464.4 ps และ 200 ps ตามลำดับ

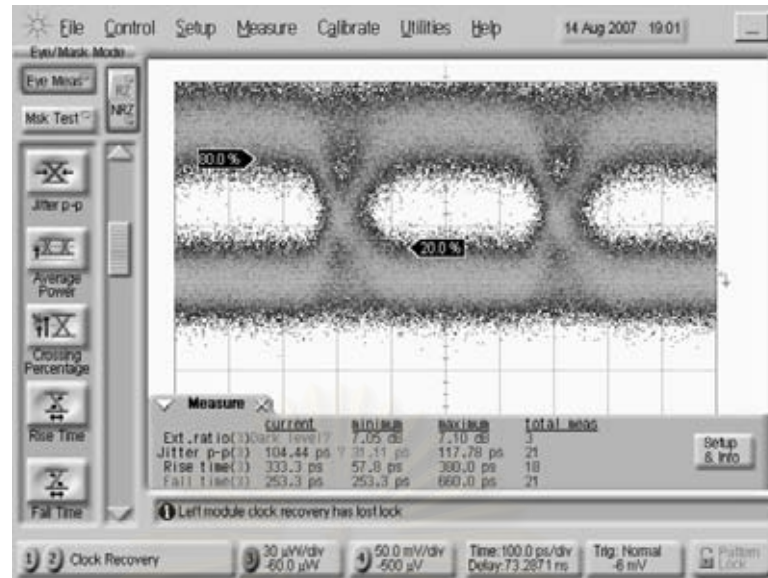


รูปที่ 6.20 สัญญาณทางไฟฟ้าขาออกจาก APD+TIA (กรณีแสงผ่าน SSMF 50 km)

หลังจากลดทอนสัญญาณแสงขาออกจากเส้นใยนำแสง SSMF ลงเท่ากับ -16 dBm แล้วส่งสัญญาณผ่านตัว APD+TIA จะได้ลักษณะสัญญาณดังรูปที่ 6.20 ซึ่งมีแอมพลิจูดจากยอดถึงยอดเท่ากับ 284.41 mVp-p และค่า Jitter peak-to-peak เท่ากับ 48.89 ps ส่วนค่า Rise time และ Fall time มีค่าเท่ากับ 135.6 และ 113.3 ps ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณขาออกของกรณี loop back รูปที่ 6.18 พบว่าลักษณะของแผนภาพรูปตาหลังจากผ่านเส้นใยนำแสงจะเปิดกว้างน้อยกว่า ค่า Jitter peak-to-peak, Rise time และ Fall time มีค่ามากขึ้น

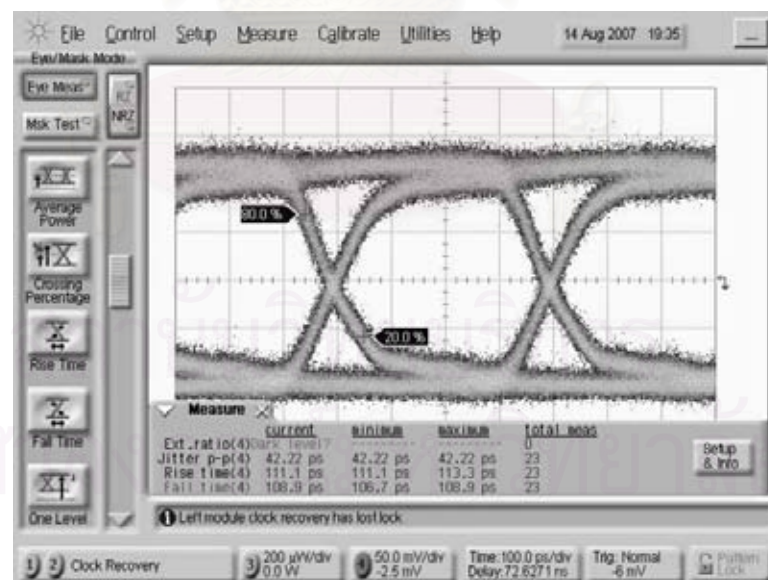
#### 6.4.3 ผ่านเส้นใยนำแสงชนิด Truewave-RS 50 km

เมื่อนำสัญญาณทางแสงรูปที่ 6.13 ส่งผ่านเส้นใยนำแสงชนิด Truewave-RS เป็นระยะทางประมาณ 50 km ซึ่งประกอบด้วยม้วนเส้นใยนำแสงทั้งหมด 2 ม้วนดังที่กล่าวในหัวข้อ 5.2.2 ซึ่งมีระยะทางรวมเท่ากับ 48.765 km โดยมีค่ากำลังสูญเสียรวมเท่ากับ 11.37 dB และค่า fiber dispersion เท่ากับ 4 ps/km/nm ที่ความยาวคลื่นแถบ 1550 nm



รูปที่ 6.21 สัญญาณแสงขาออกจาก Truewave-RS 50 km

เมื่อจากการวัดด้วยอุปกรณ์ power monitor กำลังแสงขาเข้าเส้นใยนำแสง Truewave-RS มีค่าเท่ากับ 3 dBm ส่วนสัญญาณขาออกมีกำลังแสงเท่ากับ -9.9 dBm ดังนั้นค่ากำลังสูญเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นมีค่าประมาณ  $3 - (-9.9) = 12.9$  dB ใกล้เคียงกับค่ากำลังสูญเสียที่วัดไว้ที่ 11.37 dB ลักษณะของสัญญาณขาออกที่ -9.9 dBm เป็นดังรูปที่ 6.21

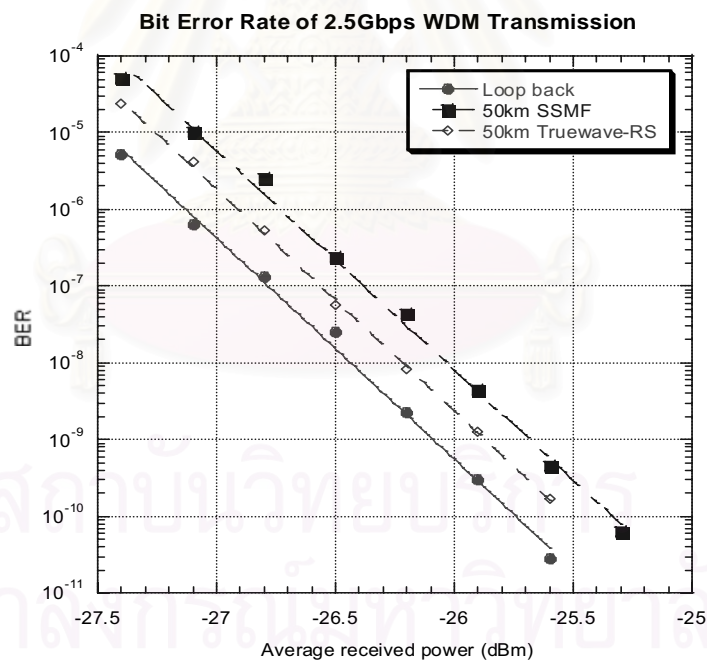


รูปที่ 6.22 สัญญาณทางไฟฟ้าขาออกจาก APD+TIA (กรณีแสงผ่าน Truewave-RS 50 km)

หลังจากลดทอนสัญญาณแสงขาออกจากเส้นใยนำแสง Truewave-RS ลงเท่ากับ -16 dBm แล้ว ส่งสัญญาณผ่านตัว APD+TIA จะได้ลักษณะสัญญาณดังรูปที่ 6.22 ซึ่งมีแรงดันจาก

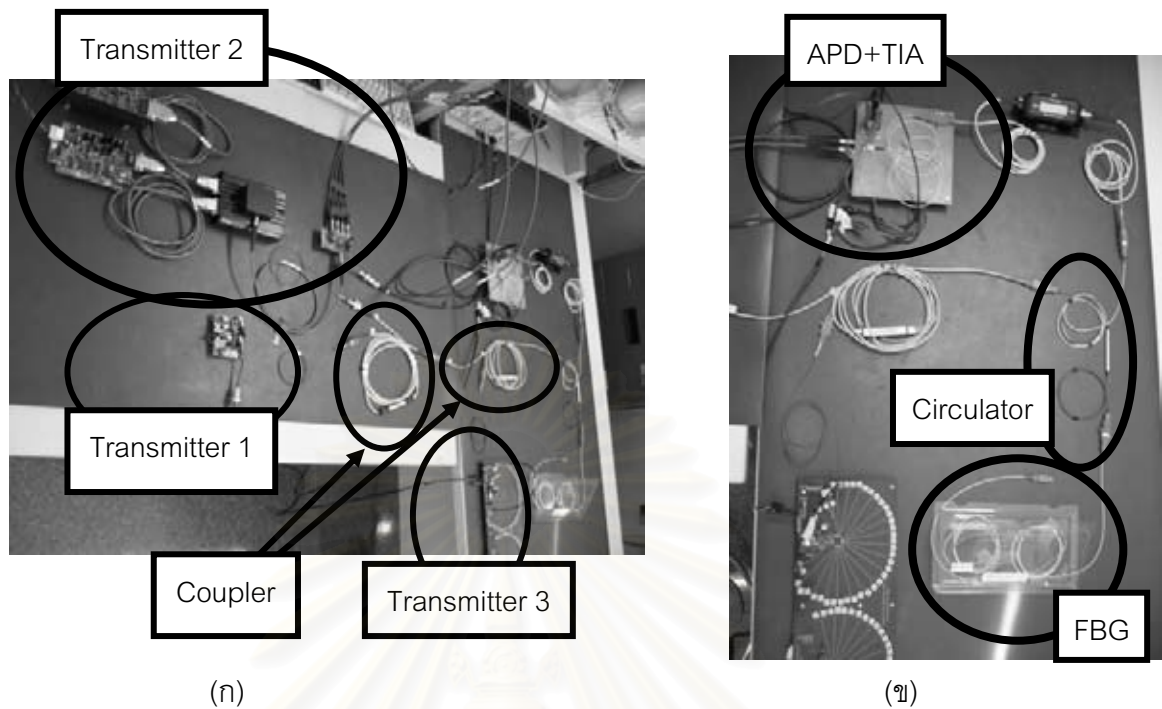
ยอดถึงยอดเท่ากับ 270.18 mVp-p และค่า Jitter peak-to-peak เท่ากับ 42.22 ps ส่วนค่า Rise time และ Fall time มีค่าเท่ากับ 111.1 และ 108.9 ps ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าค่าในกรณีส่ง SSMF ซึ่งเมื่อเทียบกับสัญญาณขาออกของกรณี loop back รูปที่ 6.18 พบว่าลักษณะของแผนภาพรูปตา หลังจากผ่านเส้นใยนำแสงจะเปิดกว้างน้อยกว่า ให้ค่า Rise time และ Fall time ที่มีค่ามากขึ้นแต่เมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ผ่านเส้นใยนำแสงชนิด SSMF ลักษณะของแผนภาพรูปตาจะดีกว่า โดยจะมีรูปตาที่เปิดกว้างมากกว่า เนื่องจากเส้นใยนำแสงชนิด Truewave-RS มีค่า fiber dispersion ที่ต่ำกว่ามาก ทำให้สามารถส่งสัญญาณผ่านได้โดยมีการบิดเพี้ยนของสัญญาณน้อยกว่า

จากนั้นทดลองวัดอัตราผิดพลาดบิต โดยผลการทดสอบค่าอัตราผิดพลาดบิตเป็นดังรูปที่ 6.23 โดยความผิดพลาดบิตที่เกิดขึ้นในกรณีส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสงชนิด SSMF จะมีค่าผิดพลาดมากกว่ากรณีส่งผ่านเส้นใยนำแสงชนิด Truewave-RS ซึ่งค่า Power penalty ที่ BER =  $10^{-9}$  ในกรณีส่งสัญญาณทางแสงผ่านเส้นใยนำแสงชนิด SSMF กับ Truewave-RS มีค่าเท่ากับ 0.41 dB (-25.68-(-26.09)) และ 0.22 dB (-25.87-(-26.09)) ตามลำดับ



รูปที่ 6.23 อัตราผิดพลาดบิต 3 กรณี (1) Loop back (2) ผ่าน SSMF 50 km และ (3) ผ่าน Truewave-RS 50 km

## 6.5 การทดสอบระบบ WDM

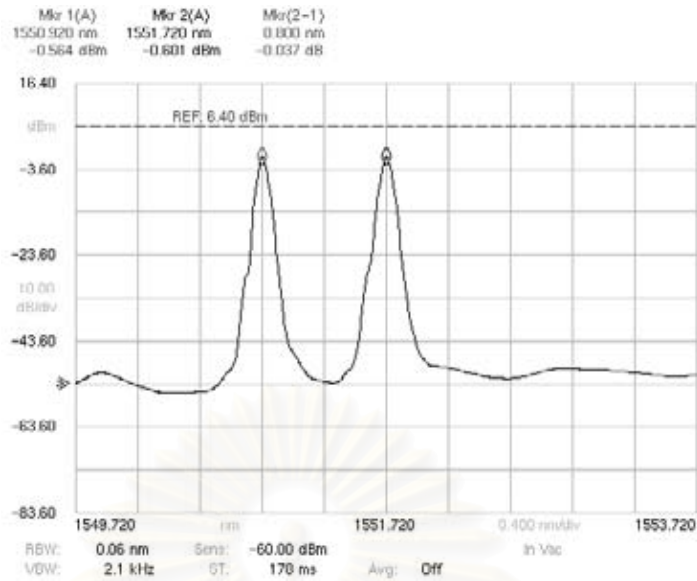


รูปที่ 6.24 (ก) ภาคส่งสัญญาณของระบบ WDM (ข) ภาครับสัญญาณของระบบ WDM

จากหัวข้อ 5.1.1 จำลองระบบ WDM ที่มีระยะระหว่างแต่ละช่องสัญญาณ 100 GHz หรือ 0.8 nm โดยเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ เข้าด้วยกันเพื่อทดลองรับส่งสัญญาณแสงดังรูปที่ 6.24 สัญญาณข้อมูลทางแสง 2.5 Gb/s ถูกส่งออกไปด้วยตัวส่งสัญญาณทางแสง 2 (Transmitter 2) โดยมีช่องสัญญาณอยู่ตรงกลาง กำหนดให้เป็นความยาวคลื่นที่ 2 (1551.72 nm) ได้สัญญาณแสงเป็นดังรูปที่ 6.13 ถือว่าเป็นช่องสัญญาณหลักที่สนใจ การทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ ภาคส่งสัญญาณกับภาครับสัญญาณ

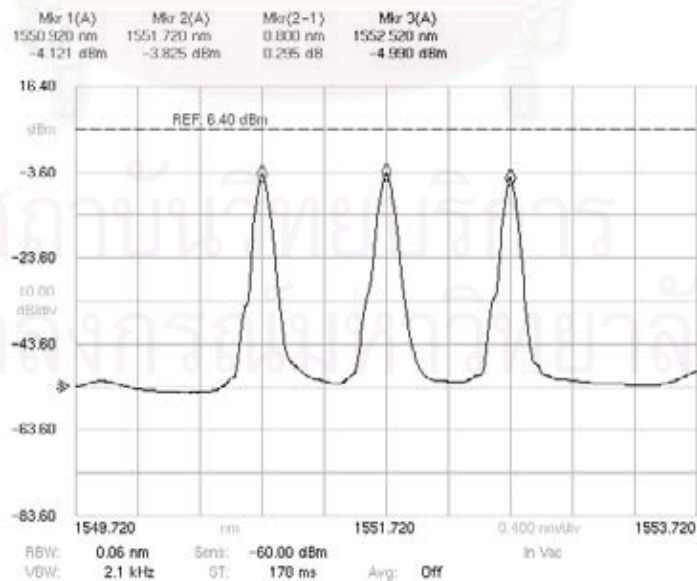
### 6.5.1 ผลการทดลองภาคส่งสัญญาณ

ขั้นแรกนำตัวส่งสัญญาณข้อมูลทางแสงความยาวคลื่นที่ 1 (1550.92 nm) สร้างสัญญาณแสงต่อเนื่องด้วยกำลังเฉลี่ย 3 dBm และส่งสัญญาณข้อมูลทางแสงความยาวคลื่นที่ 2 (1551.72 nm) สร้างสัญญาณข้อมูลทางแสงด้วยกำลังเฉลี่ย 3 dBm เช่นกัน แล้วนำมารวมเข้าด้วยกันด้วยตัว 3 dB optical coupler ตัวที่ 1 ผลสเปกตรัมทางแสงขาออกที่ได้เป็นดังรูปที่ 6.25 วัดกำลังขาออกได้ 2.81 dBm จากผลการรวมสัญญาณนี้แสดงถึงความสามารถรวมสัญญาณข้อมูลทางแสงสองความยาวคลื่นหรือสองสัญญาณบนเส้นใยนำแสงเส้นทางเดียวกันได้ โดยแต่ละช่องสัญญาณมีสเปกตรัมที่แยกออกจากกันชัดเจน



รูปที่ 6.25 สเปกตรัมการรวมกันของสัญญาณแสงสองช่องสัญญาณ

จากนั้น นำสัญญาณที่รวมกันแล้วสองช่องสัญญาณในดังรูปที่ 6.25 มารวมกับสัญญาณแสงต่อเนื่องที่สร้างโดยตัวส่งสัญญาณข้อมูลทางแสงความยาวคลื่นที่ 3 (1552.52 nm) ซึ่งให้กำลังแสงเฉลี่ย  $-0.7$  dBm ด้วยตัว 3 dB optical coupler ตัวที่ 2 จะได้สัญญาณขาออกนั้นมีสเปกตรัมดังรูปที่ 6.26 วัดกำลังแสงขาออกได้  $1.2$  dBm ซึ่งเป็นผลการรวมสัญญาณทั้งหมด 3 ช่องสัญญาณด้วยกันส่งผ่านเส้นใยนำแสงเพียงเส้นเดียว โดยมีระยะระหว่างยอดสเปกตรัมเท่ากับ  $0.8$  nm ตามที่ต้องการ



รูปที่ 6.26 สเปกตรัมการรวมกันของสัญญาณแสงสามช่องสัญญาณ

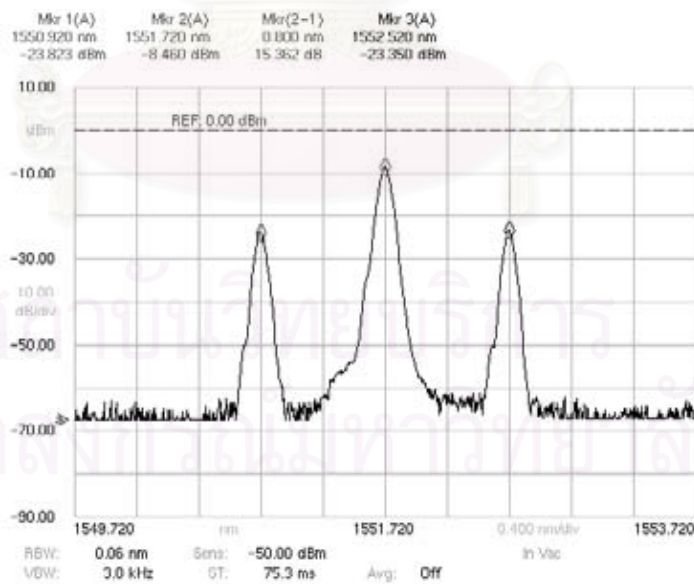
## 6.5.2 ผลการทดลองภาครับสัญญาณ

ทดสอบการรับส่งสัญญาณข้อมูลผ่านระบบ WDM 3 ช่องสัญญาณ โดยภาคส่งสัญญาณ ได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 6.5.1 จากนั้นจะแบ่งการทดลองภาครับสัญญาณออกเป็น 3 กรณี คือ (1) WDM 100 GHz แบบป้อนกลับ, (2) WDM 100 GHz ผ่านเส้นใยนำแสงชนิด SSMF 50 km ก่อนถึงภาครับสัญญาณ และ (3) WDM 100 GHz ผ่านเส้นใยนำแสงชนิด Truewave-RS 50 km ก่อนถึงภาครับสัญญาณ

### 1) ระบบ WDM 100 GHz แบบป้อนกลับ

ส่งสัญญาณสามช่องสัญญาณในรูปที่ 6.26 ป้อนกลับไปยังภาครับสัญญาณปลายทาง ซึ่งจะมีตัวดีมัลติเพลกซ์สัญญาณทางแสงเพื่อแยกสัญญาณแต่ละช่องสัญญาณออกจากกัน โดยในการทดลองจะแยกสัญญาณทางแสงความยาวคลื่นที่ 2 ซึ่งเป็นสัญญาณตรงกลางที่สนใจ ด้วยอุปกรณ์ดีมัลติเพลกซ์ที่ประกอบไปด้วย 3 port optical circulator และ FBG ดังการเชื่อมต่อที่กล่าวในหัวข้อ 5.3

นำสัญญาณทางแสงที่มีสามช่องสัญญาณมาผ่านตัว Circulator และ FBG เพื่อคัดกรองสัญญาณความยาวคลื่นที่ 2 ซึ่งเป็นความยาวคลื่นตรงกลาง สัญญาณช่องที่ 2 นี้เมื่อเจอ FBG ก็สะท้อนกลับออกมาที่ขาพอร์ตที่ 3 ของตัว Circulator ซึ่งสเปกตรัมที่ได้จากการทดลองเป็นดังรูปที่ 6.27 ส่วนสัญญาณความยาวคลื่นอื่นๆ ที่เหลือจะสามารถทะลุผ่าน FBG ออกไปดังรูปที่ 6.28

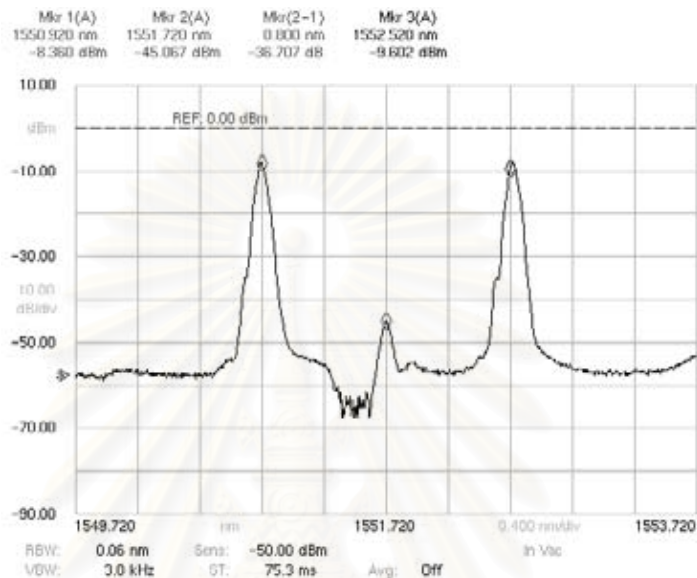


รูปที่ 6.27 สัญญาณทางแสงขาออกพอร์ตที่ 3 ของตัว Circulator

จากรูปที่ 6.27 นั้นผลของสัญญาณความยาวคลื่นด้านข้างทั้งซ้ายและขวาของความยาวคลื่นที่ 2 นั้นออกมากับพอร์ตที่ 3 ด้วย เนื่องมาจากการสะท้อนกลับกำลังแสงบางส่วนของทั้งสอง



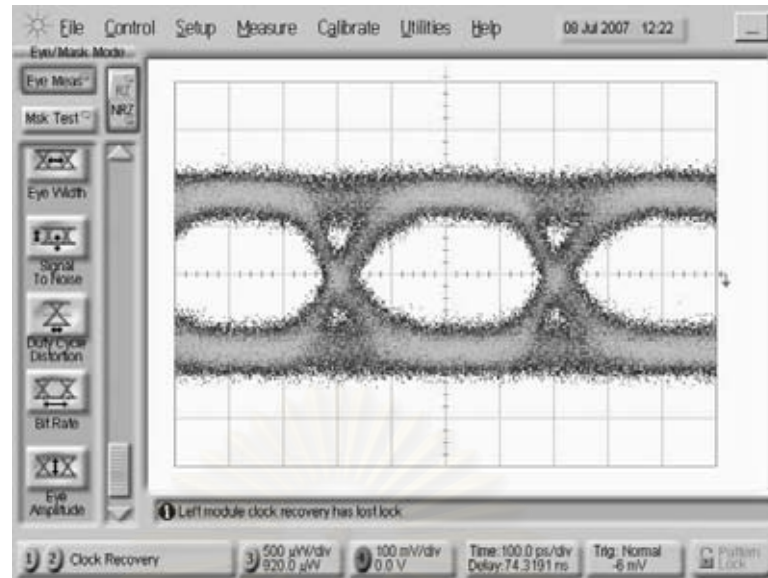
ช่องสัญญาณ โดยยอดกำลังแสงสูงสุดของสัญญาณความยาวคลื่นที่ 1 และ 3 มีเพียง  $-23.8$  dBm และ  $-23.4$  dBm ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่ายอดกำลังแสงสูงสุดของสัญญาณความยาวคลื่นที่ 2 อยู่ประมาณ  $-15$  dB ซึ่งน้อยกว่ามาก ทำให้ผลจากการรบกวนของสัญญาณด้านข้างทั้งสองมีต่อสัญญาณข้อมูลทางแสงความยาวคลื่นที่ 2 น้อย



รูปที่ 6.28 สัญญาณทางแสงขาออกของตัว FBG

จากรูปที่ 6.28 เมื่อวัดสัญญาณทางแสงขาออกจากตัว FBG พบว่าสัญญาณทางแสงความยาวคลื่นที่ 2 นั้นได้ถูกรองออกหมดแล้ว เหลือเพียงสัญญาณทางแสงของความยาวคลื่นที่ 1 และความยาวคลื่นที่ 3 เท่านั้นที่สามารถผ่านตัว FBG ได้

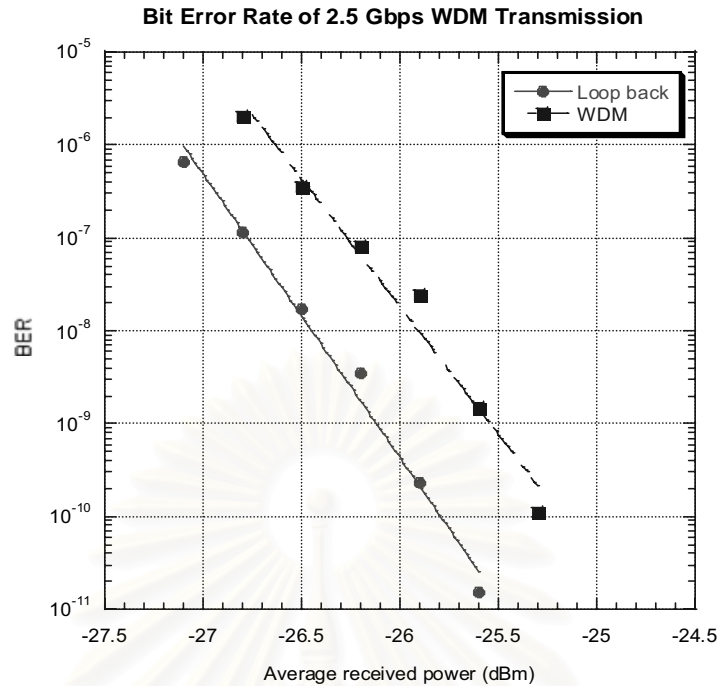
ขั้นตอนต่อไป นำสัญญาณที่ได้จากพอร์ตที่ 3 ของตัว Circulator ดังรูปที่ 6.27 ผ่านตัว variable attenuator เพื่อให้มีค่ากำลังแสง  $-10$  dBm ป้อนเข้าตัวรับสัญญาณทางแสงชนิด APD ที่ประกอบด้วยขยายสัญญาณชนิด TIA รวมไว้ภายในด้วย ซึ่งมีค่าความไวกำลังแสง (Sensitivity) เท่ากับ  $-26$  dBm เพื่อแปลงสัญญาณข้อมูลทางแสงให้เป็นสัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้าพร้อมทั้งขยายสัญญาณขาออกให้เป็นสัญญาณแบบผลต่าง (Differential signal) เมื่อวัดสัญญาณข้อมูลขาออกที่ระดับกำลังแสง  $-10$  dBm ลักษณะแผนภาพรูปตาดังรูปที่ 6.29 ซึ่งมีขนาดแรงดันจากยอดถึงยอดประมาณ  $888.68$  mVp-p



รูปที่ 6.29 แผนภาพรูปตาของสัญญาณขาออกจากตัว APD+TIA (โดยมีค่าลดทอน 6 dB)

จากนั้นวัดประสิทธิภาพการรับส่งสัญญาณข้อมูลแบบ WDM ด้วยการวัดหาค่าอัตราผิดพลาดบิต (Bit Error Rate, BER) โดยนำสัญญาณข้อมูลขาออกจากตัว APD+TIA ดังในรูปที่ 6.29 นี้กลับไปเปรียบเทียบกับสัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้าขาเข้าตัวส่งสัญญาณทางแสง จากนั้นคำนวณค่า BER ซึ่งเครื่องมีวัดชื่อ Bit Error Rate Testor (BERT) จะแสดงค่า BER ออกมาโดยอัตโนมัติ ผล BER ที่ได้เป็นดังกราฟรูปที่ 6.30 จากผลการทดสอบวัด BER ของการรับส่งสัญญาณความยาวคลื่นแสงเพียงความยาวคลื่นแสงเดียวซึ่งในรูปที่ 6.30 นี้ใช้ชื่อเป็น Loop Back และ การทดสอบวัด BER ของการส่งสัญญาณสามความยาวคลื่นแสง ซึ่งในรูปที่ 6.30 นี้ใช้ชื่อเป็น WDM โดยให้ Power penalty ที่ BER เท่ากับ  $10^{-9}$  มีค่าเท่ากับ  $-26.13 - (-25.55) = 0.58$  dB ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่ามาตรฐานของ 1 dB มาก

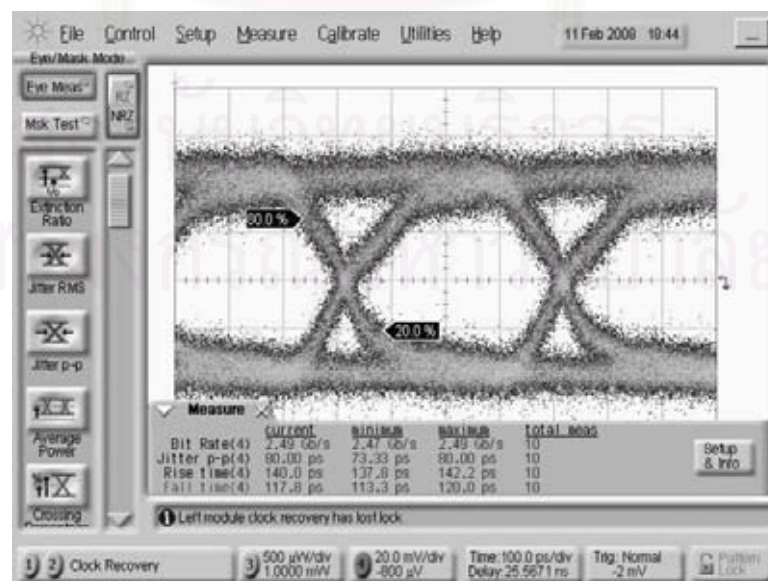
สรุปผลการทดลองนี้คือ สามารถจำลองการส่งรับสัญญาณแสงในระบบ WDM เบื้องต้นได้โดยมีค่า BER ต่ำกว่า  $10^{-9}$  สอดคล้องกับมาตรฐาน ITU-T G.692



รูปที่ 6.30 ผลการวัด BER ต่อกำลังแสงที่ตัวรับสัญญาณทางแสงรับได้ในสองกรณี

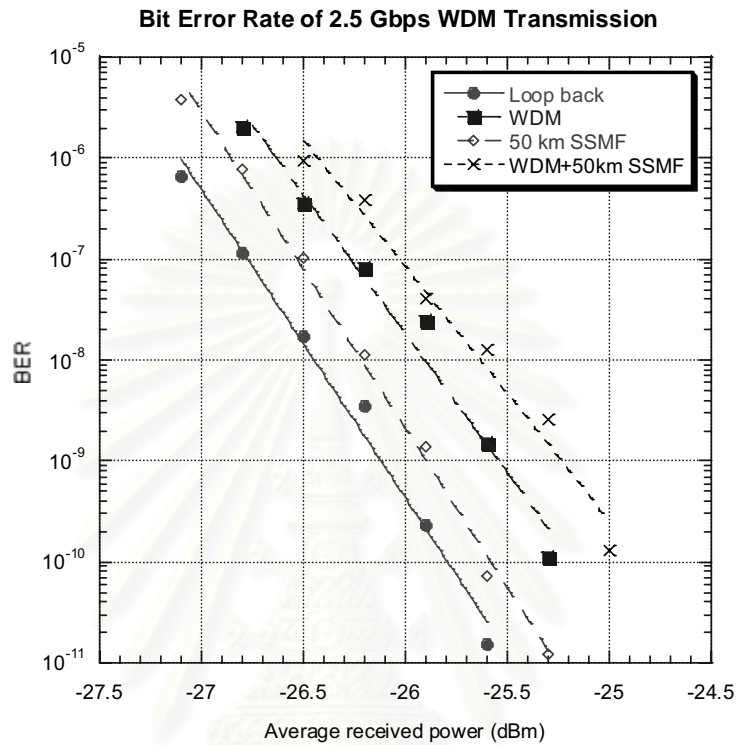
2) WDM 100 GHz และผ่านเส้นใยนำแสงชนิด SSMF 50 km

นำสัญญาณทางแสงกำลังขนาด 1.2 dBm ระบบ WDM 100 GHz ผ่านเส้นใยนำแสงชนิด SSMF 50 km จะเหลือกำลังแสงเท่ากับ  $-14.4$  dBm แล้วลดทอนสัญญาณลงเหลือ  $-16$  dBm ป้อนสัญญาณทางแสงไปที่ APD+TIA เมื่อแปลงสัญญาณทางไฟฟ้ากลับมาเป็นสัญญาณทางแสงแล้วจะได้สัญญาณทางไฟฟ้าดังรูปที่ 6.31 ซึ่งมีแรงดันจากยอดถึงยอดเท่ากับ 111.66 mVp-p



รูปที่ 6.31 สัญญาณไฟฟ้าขาออกจาก SSMF 50 km ในระบบ WDM 100 GHz

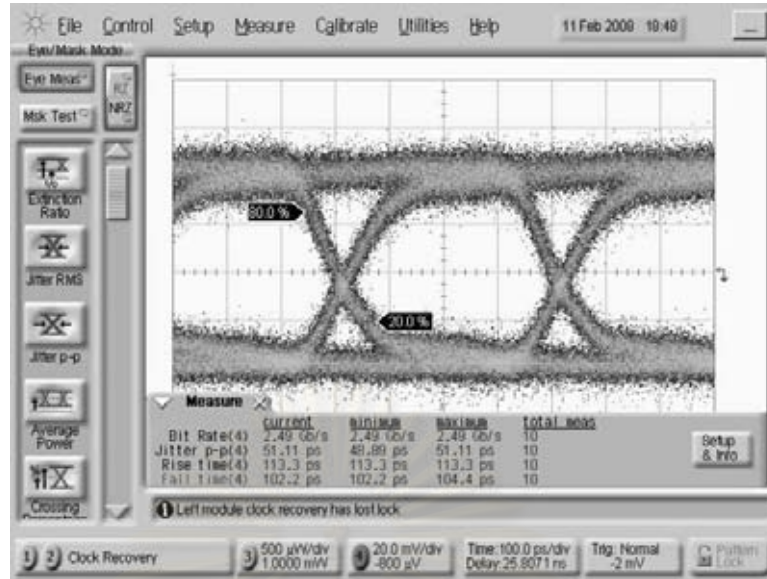
จากนั้นทดลองวัดอัตราผิดพลาดบิต โดยผลการทดสอบค่าอัตราผิดพลาดบิตเป็นดังรูปที่ 6.49 ซึ่งค่า Power penalty ที่  $BER = 10^{-9}$  WDM 100 GHz ในกรณีสัญญาณทางแสงผ่านเส้นใยนำแสงชนิด SSMF 0.89 dB ( $-25.24 - (-26.13)$ ) (มากกว่า  $0.23 + 0.58 = 0.81$  dB)



รูปที่ 6.32 อัตราผิดพลาดบิตผ่านเส้นใยนำแสงในระบบ WDM 100 GHz

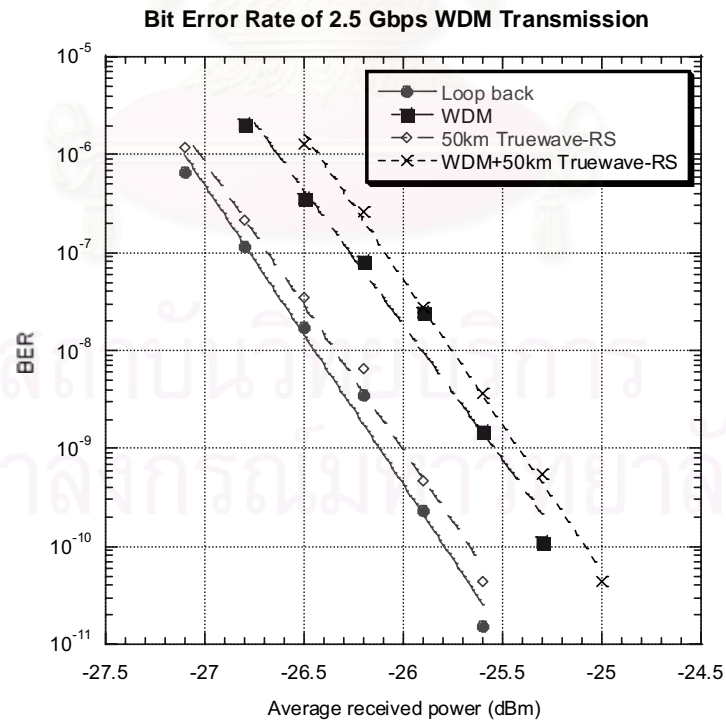
3) WDM 100 GHz และผ่านเส้นใยนำแสงชนิด Truwave-RS 50 km

นำสัญญาณทางแสงกำลังขนาด 1.2 dBm ระบบ WDM 100 GHz ผ่านเส้นใยนำแสงชนิด SSMF 50 km จะเหลือกำลังแสงเท่ากับ  $-13.8$  dBm แล้วลดทอนสัญญาณลงเหลือ  $-16$  dBm ป้อนสัญญาณทางแสงไปที่ APD+TIA เมื่อแปลงสัญญาณทางไฟฟ้ากลับมาเป็นสัญญาณทางแสงแล้วจะได้สัญญาณทางไฟฟ้างดังรูปที่ 6.33 ซึ่งมีแรงดันจากยอดถึงยอดเท่ากับ 108.07 mVp-p



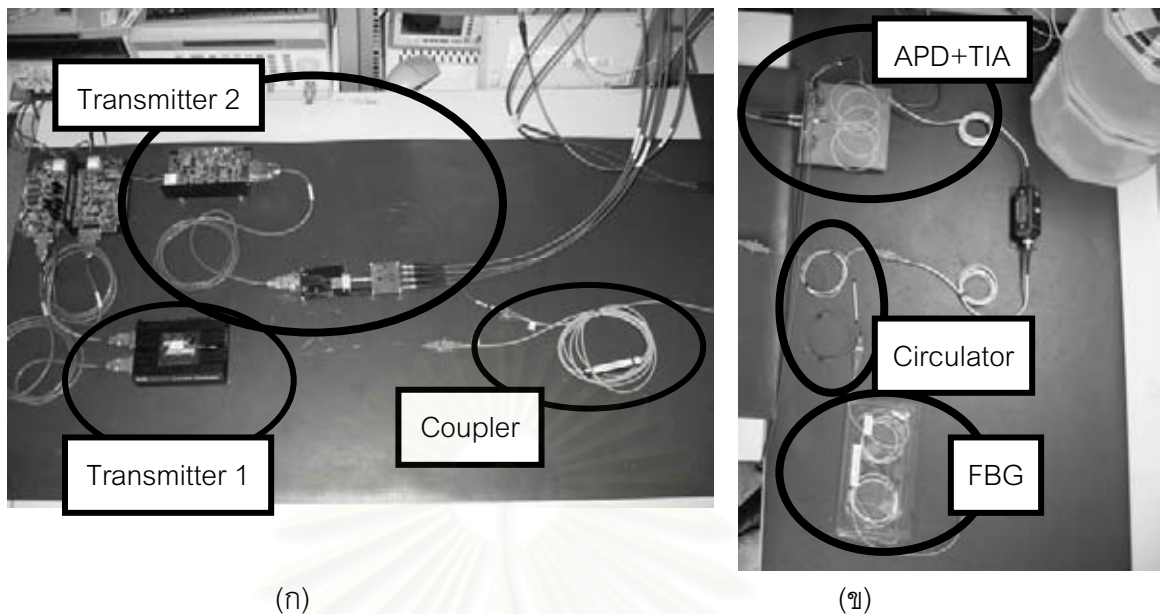
รูปที่ 6.33 สัญญาณไฟฟ้าขาออกจาก Truwave-RS 50 km ในระบบ WDM 100 GHz

จากนั้นทดลองวัดอัตราผิดพลาดบิต โดยผลการทดสอบค่าอัตราผิดพลาดบิตเป็นดังรูปที่ 6.49 ซึ่งค่า Power penalty ที่ BER =  $10^{-9}$  WDM 100 GHz ในกรณีสัญญาณทางแสงผ่านเส้นใยนำแสงชนิด Truwave-RS มีค่าเท่ากับ 0.72 dB  $(-25.41 - (-26.13))$  (มากกว่า  $0.13 + 0.58 = 0.71$  dB)



รูปที่ 6.34 อัตราผิดพลาดบิตผ่านเส้นใยนำแสงในระบบ WDM 100 GHz

## 6.6 การปรับระยะระหว่างช่องสัญญาณ (Channel spacing)



รูปที่ 6.35 (ก) ภาคส่งสัญญาณ (ข) ภาครับสัญญาณในระบบ WDM 2 ช่องสัญญาณ

จากหัวข้อ 5.1.2 จำลองระบบ WDM ที่มีระยะระหว่างแต่ละช่องสัญญาณ 100 GHz หรือ 0.8 nm โดยใช้การเชื่อมต่อเพื่อส่งสัญญาณแสงดังรูปที่ 6.35 ส่งข้อมูลทางแสงที่ช่องสัญญาณความยาวคลื่นที่ 2 ด้วยสัญญาณรูปที่ 6.13 เป็นช่องสัญญาณหลักที่สนใจและมัลติเพล็กซ์กับสัญญาณความยาวคลื่นที่ 1 รวมเป็นสองช่องสัญญาณเท่านั้นเพราะมีเลเซอร์ที่สามารถปรับจูนความยาวคลื่นด้วยอุณหภูมิต่างกันได้เพียงแค่ 2 ตัว จากนั้นปรับความยาวคลื่นให้ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณลดลงเป็น 50 GHz หรือ 0.4 nm เพื่อทดสอบผลกระทบต่อ BER อันเนื่องมาจากระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ การทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ ภาคส่งสัญญาณกับภาครับสัญญาณ

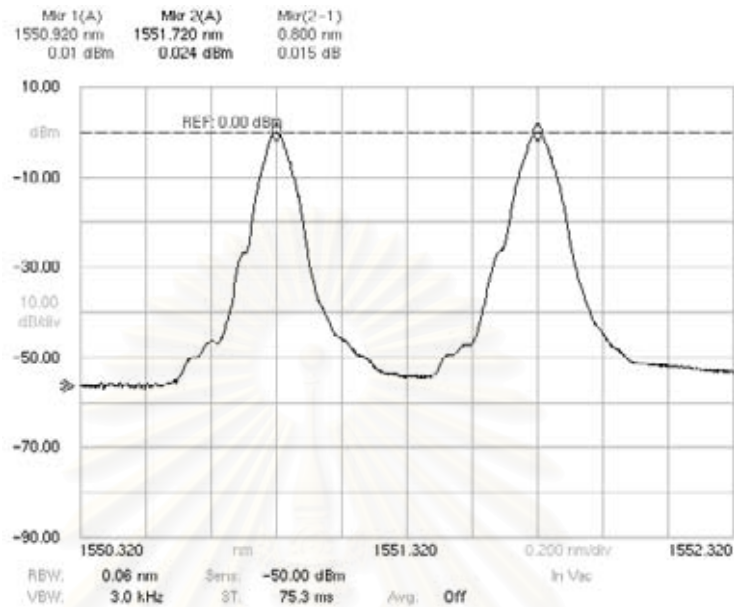
### 6.6.1 ผลการทดลองภาคส่งสัญญาณ

ทดลองรับส่งสัญญาณข้อมูลแสงผ่านระบบ WDM 2 ช่องสัญญาณ ด้วยระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากับ 100 GHz (0.8 nm) และ 50 GHz (0.4 nm)

1) ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากับ 100 GHz

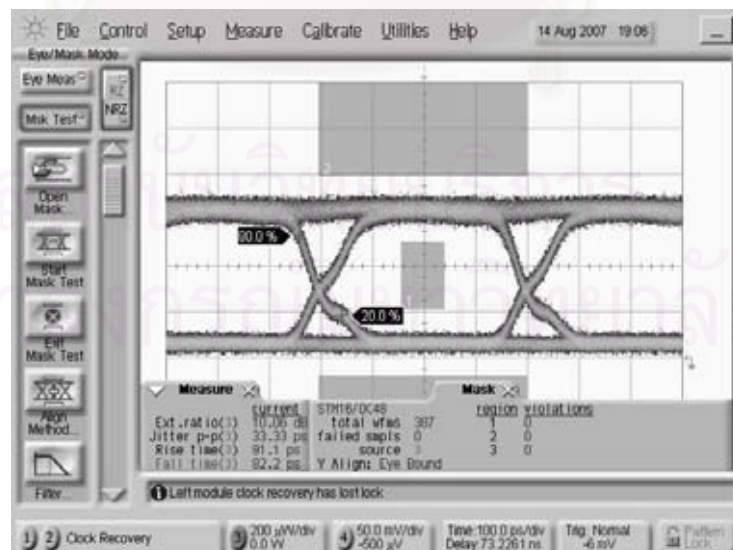
ประยุกต์ตัวส่งสัญญาณทางแสงรูปที่ 6.7 มาใช้ในระบบ WDM 2 ช่องสัญญาณโดยกำหนดให้เป็นความยาวคลื่นที่ 2 ซึ่งมีค่ายอดของสเปกตรัมอยู่ที่ 1551.72 nm ส่วนสัญญาณความยาวคลื่นที่ 1 สร้างโดยตัวส่งสัญญาณทางแสงอีกตัวซึ่งมีค่ายอดของสเปกตรัมอยู่ที่ 1550.92 nm ดังนั้นทั้งสองช่องสัญญาณจะอยู่ห่างกันเท่ากับ 0.8 nm โดยการมัลติเพล็กซ์สัญญาณทางแสง

จะใช้ตัว 3 dB optical coupler สเปกตรัมขาออกที่วัดได้จะเป็นดังรูปที่ 6.36 ซึ่งมีการรับส่งสัญญาณ WDM สองช่องสัญญาณแสงบนเส้นทางเดียวกัน ด้วยระยะห่างกันเท่ากับ 0.8 nm



รูปที่ 6.36 สเปกตรัมของแสงขาออกในระบบ WDM ที่ channel spacing 100 GHz

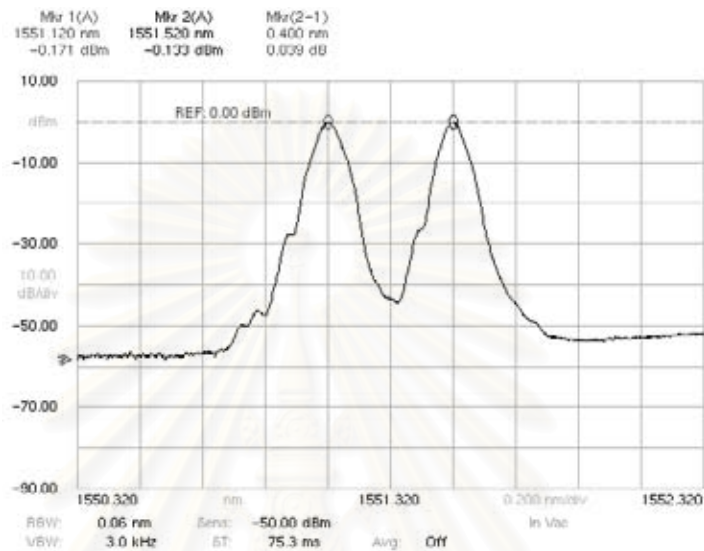
กำลังแสงเฉลี่ยขาออกที่วัดได้เท่ากับ 2.81 dBm มีลักษณะสัญญาณข้อมูลของทั้งสองความยาวคลื่นที่เป็นดังรูปที่ 6.37 ซึ่งมีค่า EX = 10.06 dB และ Jitter peak-to-peak เท่ากับ 33.33 ps ส่วน Rise time และ Fall time มีค่าเท่ากับ 91.1 ps และ 82.2 ps ตามลำดับ



รูปที่ 6.37 สัญญาณแสงขาออก ในระบบ WDM ที่มี channel spacing 100 GHz

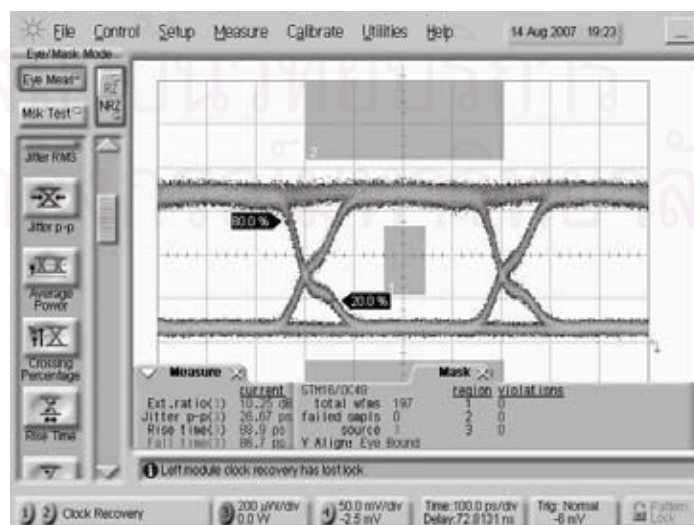
## 2) ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากับ 50 GHz

ในการศึกษาระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ จะทดลองปรับความยาวคลื่นด้วยการควบคุมอุณหภูมิของเลเซอร์ โดยปรับความยาวคลื่นที่ 1 จาก 1550.92 nm มาอยู่ที่ 1551.12 nm และปรับความยาวคลื่นที่ 2 จาก 1551.72 มาอยู่ที่ 1551.52 nm ซึ่งทั้งสองช่องสัญญาณมีระยะห่างกัน 0.4 nm หรือ 50 GHz เมื่อมัลติเพลกซ์สัญญาณแล้วจะได้สเปกตรัมจะดังรูปที่ 6.38



รูปที่ 6.38 สเปกตรัมของแสงขาออกในระบบ WDM ที่มี channel spacing 50 GHz

กำลังแสงเฉลี่ยขาออกที่วัดได้เท่ากับ 2.81 dBm มีลักษณะสัญญาณเป็นดังรูปที่ 6.39 ซึ่งมีค่า Extinction ratio = 10.25 dB และ Jitter peak-to-peak เท่ากับ 26.67 ps ส่วน Rise time และ Fall time มีค่าเท่ากับ 88.9 ps และ 86.7 ps ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากับ 100 GHz จะเห็นว่า มีลักษณะของแผนภาพรูปตาที่แย่กว่าโดยเฉพาะ บิต '1'



รูปที่ 6.39 สัญญาณแสงขาออก ในระบบ WDM ที่มี channel spacing 50 GHz

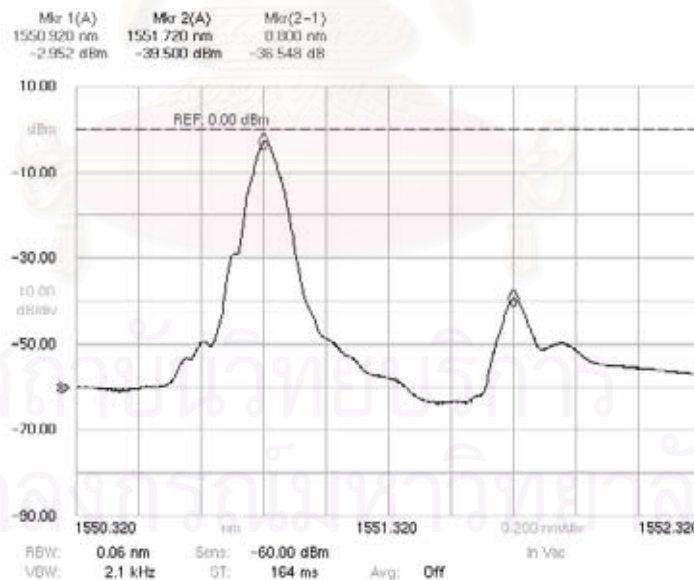


## 6.6.2 ผลการทดลองภาครับสัญญาณ

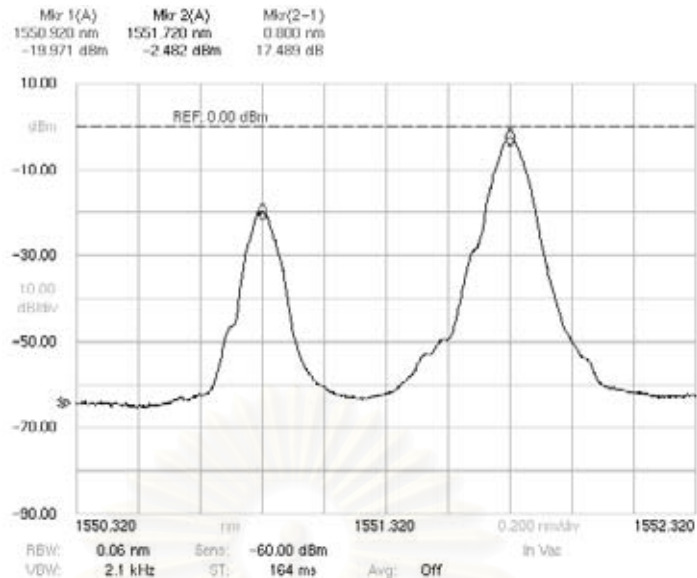
ทดสอบการรับส่งสัญญาณผ่านระบบ WDM 2 ช่องสัญญาณ โดยทางภาคส่งสัญญาณได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 6.6.1 จากนั้นจะแบ่งการทดลองเป็น 6 กรณี คือ (1) WDM 100 GHz แบบป้อนกลับ, (2) WDM 50 GHz แบบป้อนกลับ และ (3) WDM 100 GHz ผ่านเส้นใยนำแสงชนิด SSMF 50 km ก่อนถึงภาครับสัญญาณ, (4) WDM 100 GHz ผ่านเส้นใยนำแสงชนิด Truwave-RS 50 km ก่อนถึงภาครับสัญญาณ, (5) WDM 50 GHz ผ่านเส้นใยนำแสงชนิด SSMF 50 km ก่อนถึงภาครับสัญญาณ และ (6) WDM 50 GHz ผ่านเส้นใยนำแสงชนิด Truwave-RS 50 km ก่อนถึงภาครับสัญญาณ

### 1) ระบบ WDM 100 GHz แบบป้อนกลับ

สัญญาณจากภาคส่งสัญญาณในรูปที่ 6.37 ส่งไปยังภาครับของระบบ WDM ซึ่งจะมีตัว Circulator และ FBG ช่วยในการดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณเฉพาะสัญญาณความยาวคลื่นที่ 2 และส่งต่อไปยังตัวรับสัญญาณทางแสง APD+TIA สัญญาณที่ทะลุผ่านตัว FBG มีสเปกตรัมดังรูปที่ 6.40 ส่วนสัญญาณความยาวคลื่นที่ 2 นั้นจะสะท้อนกลับไปยังตัว Circulator ส่งผ่านไปยังพอร์ต 3 มีสเปกตรัมดังรูปที่ 6.41

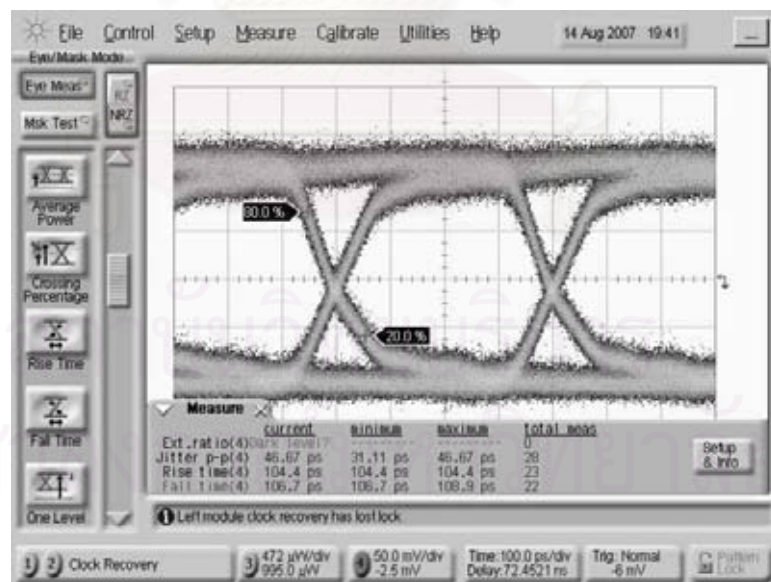


รูปที่ 6.40 สเปกตรัมสัญญาณขาออกจาก FBG ในระบบ WDM ที่มี channel spacing 100 GHz



รูปที่ 6.41 สเปกตรัมสัญญาณความยาวคลื่นที่ 2 หลังดีมัลติเพลกซ์ ในระบบ WDM ที่มี channel spacing 100 GHz

จากรูปที่ 6.41 เป็นรูปสเปกตรัมของสัญญาณที่ถูกดีมัลติเพลกซ์ออกมา โดยอัตราส่วนระหว่างยอดกำลังแสงสัญญาณความยาวคลื่นที่ 2 ต่อยอดกำลังแสงของช่องสัญญาณด้านข้างมีค่าเท่ากับ 17.489 dB

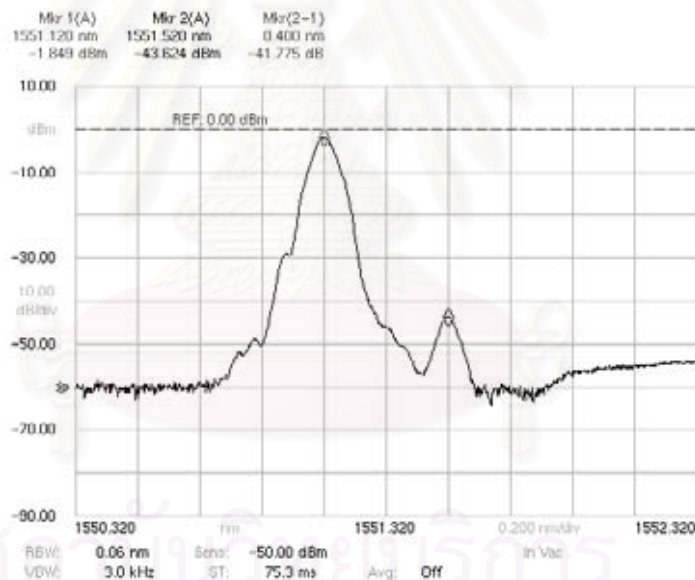


รูปที่ 6.42 สัญญาณไฟฟ้าขาออกหลังการดีมัลติเพลกซ์ ใน WDM channel spacing 100 GHz

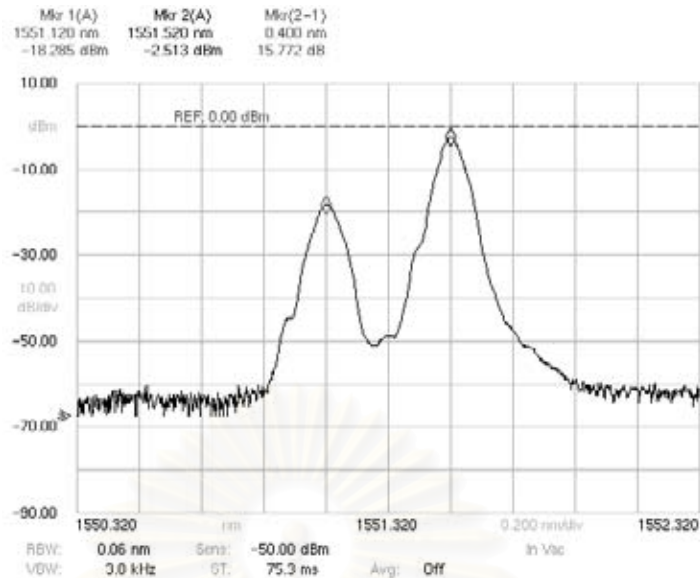
ก่อนที่จะป้อนสัญญาณทางแสงไปที่ตัวรับสัญญาณทางแสง ปรับกำลังแสงลดลงเหลือ  $-16$  dBm เมื่อแปลงสัญญาณทางแสงกลับมาเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าแล้วจะได้สัญญาณทางไฟฟ้าดังรูปที่ 6.42 ซึ่งมีแรงดันจากยอดถึงยอดเท่ากับ  $273.75$  mVp-p และค่า Jitter peak-to-peak เท่ากับ  $46.67$  ps ส่วนค่า Rise time และ Fall time มีค่าเท่ากับ  $104.4$  ps และ  $106.7$  ps ตามลำดับ

## 2) ระบบ WDM 50 GHz แบบป้อนกลับ

สัญญาณจากภาคส่งสัญญาณในรูปที่ 6.39 ส่งไปยังภาครับของระบบ WDM ซึ่งจะมีตัว Circulator และ FBG ช่วยในการดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณเฉพาะสัญญาณความยาวคลื่นที่ 2 ก่อนส่งต่อไปยังตัวรับสัญญาณทางแสง APD+TIA สัญญาณที่ทะลุผ่านตัว FBG มีสเปกตรัมดังรูปที่ 6.43 ส่วนสัญญาณความยาวคลื่นที่ 2 นั้นจะสะท้อนกลับไปยังตัว Circulator ส่งผ่านไปยังพอร์ต 3 มีสเปกตรัมดังรูปที่ 6.44

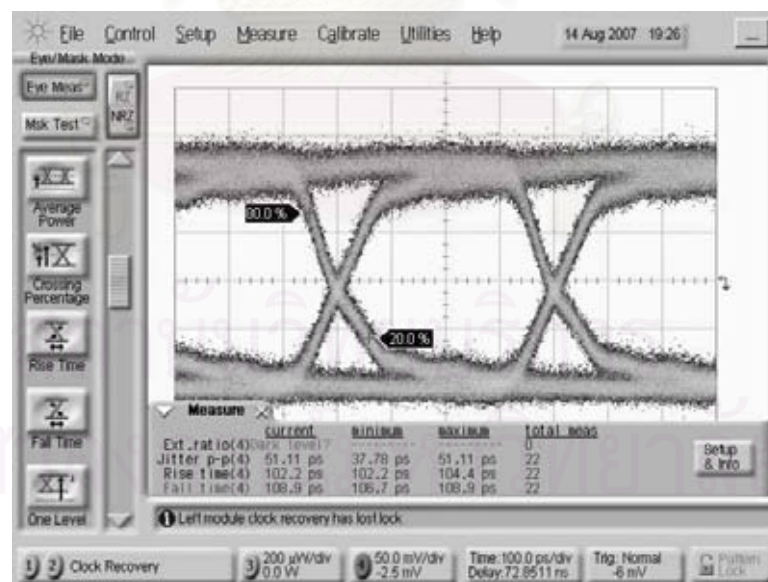


รูปที่ 6.43 สเปกตรัมสัญญาณขาออกจาก FBG ในระบบ WDM ที่มี channel spacing 50 GHz



รูปที่ 6.44 สเปกตรัมสัญญาณความยาวคลื่นที่ 2 หลังดีมัลติเพลกซ์ ในระบบ WDM ที่มี channel spacing 50 GHz

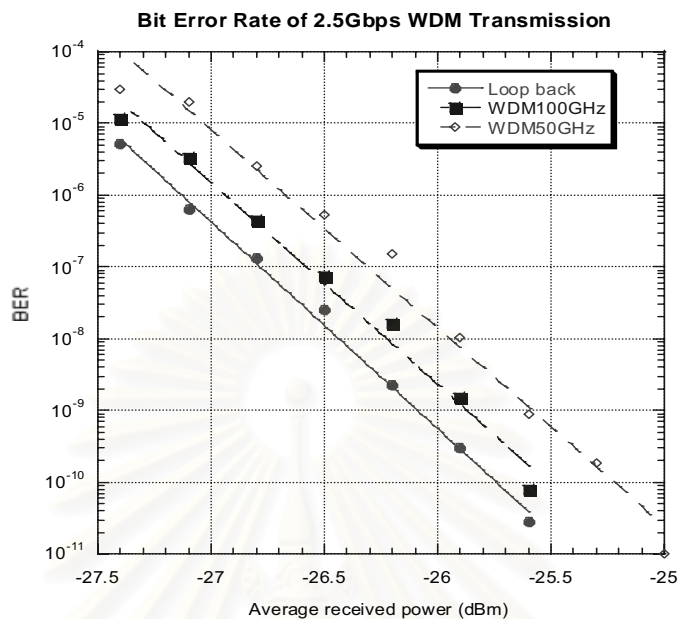
จากรูปที่ 6.44 เป็นรูปสเปกตรัมของสัญญาณที่ถูกดีมัลติเพลกซ์ออกมา โดยอัตราส่วนระหว่างยอดกำลังแสงของสัญญาณความยาวคลื่นที่ 2 ต่อยอดกำลังแสงของช่องสัญญาณข้างมีค่าเท่ากับ 15.772 dB



รูปที่ 6.45 สัญญาณไฟฟ้าขาออกหลังการดีมัลติเพลกซ์ ใน WDM channel spacing 50 GHz

ก่อนที่จะป้อนสัญญาณทางแสงไปสัญญาณทางแสง ปรับกำลังแสงลดลงเหลือ -16 dBm เมื่อแปลงสัญญาณทางแสงกลับมาเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าแล้วจะได้สัญญาณทางไฟฟ้างดังรูปที่

6.45 ซึ่งมีแรงแต้นจากยอดถึงยอดเท่ากับ 277.57 mVp-p และค่า Jitter peak-to-peak เท่ากับ 51.11 ps ส่วนค่า Rise time และ Fall time มีค่าเท่ากับ 102.2 ps และ 108.9 ps ตามลำดับ

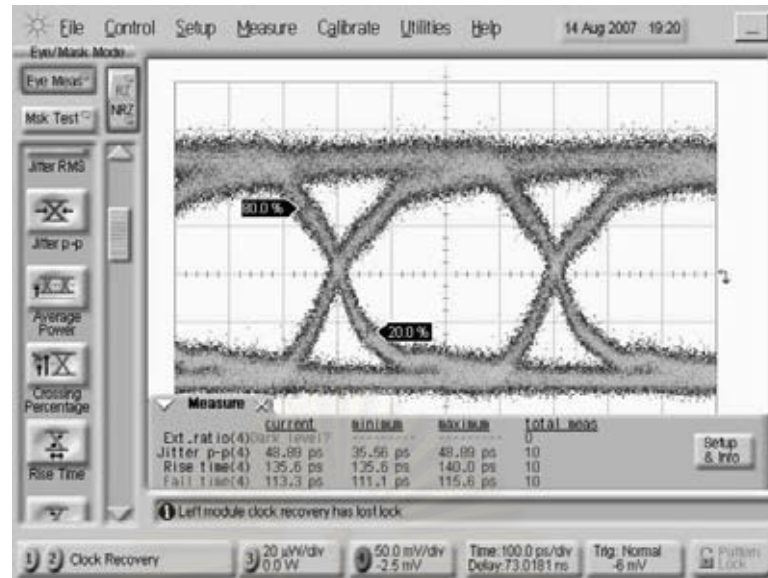


รูปที่ 6.46 อัตราผิดพลาดบิตกรณีผ่านระบบ WDM channel spacing 100 GHz และ 50 GHz

จากนั้นทดลองวัดอัตราผิดพลาดบิต โดยผลการทดสอบค่าอัตราผิดพลาดบิตเป็นดังรูปที่ 6.46 ซึ่งค่า Power penalty ที่ BER =  $10^{-9}$  ในกรณีสัญญาณทางแสงผ่านระบบ WDM ที่มี channel spacing 100 GHz และ 50 GHz มีค่าเท่ากับ 0.22 dB ( $-25.87 - (-26.09)$ ) และ 0.51 dB ( $-25.58 - (-26.09)$ ) ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าระบบ WDM 50 GHz จะมีอัตราผิดพลาดบิตมากกว่าที่ระดับกำลังแสงขาเข้าเท่ากันเนื่องจากช่องสัญญาณ WDM มีระยะห่างใกล้กันทำให้เกิดการรบกวนซึ่งกันและกันของสัญญาณแสงได้มากกว่า

### 3) WDM 100 GHz และผ่านเส้นใยนำแสงชนิด SSMF 50 km

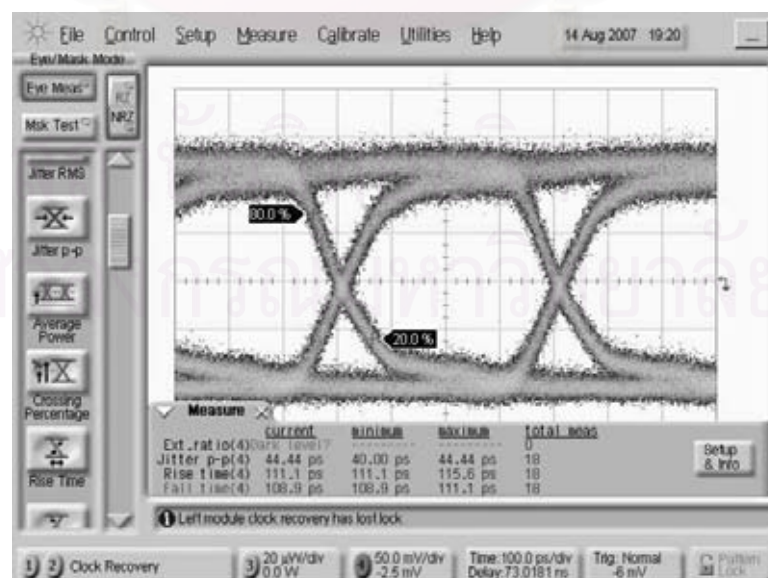
สัญญาณทางแสงกำลังเฉลี่ยขนาด 2.81 dBm ระบบ WDM 50 GHz 2 ช่องสัญญาณ ส่งผ่านเส้นใยนำแสงชนิด SSMF ความยาวประมาณ 50 km ก่อนที่จะป้อนสัญญาณแสงไปที่ตัวรับสัญญาณทางแสง ปรับกำลังแสงลดลงเหลือ -16 dBm เมื่อแปลงสัญญาณทางแสงกลับมาเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าแล้วจะได้สัญญาณทางไฟฟ้างดังรูปที่ 6.47 ซึ่งมีแรงแต้นจากยอดถึงยอดเท่ากับ 284.41 mVp-p และค่า Jitter peak-to-peak เท่ากับ 48.89 ps ส่วนค่า Rise time และ Fall time มีค่าเท่ากับ 135.6 ps และ 113.3 ps ตามลำดับ



รูปที่ 6.47 สัญญาณไฟฟ้าขาออกจากเส้นใยนำแสง SSMF 50 km ในระบบ WDM 100 GHz

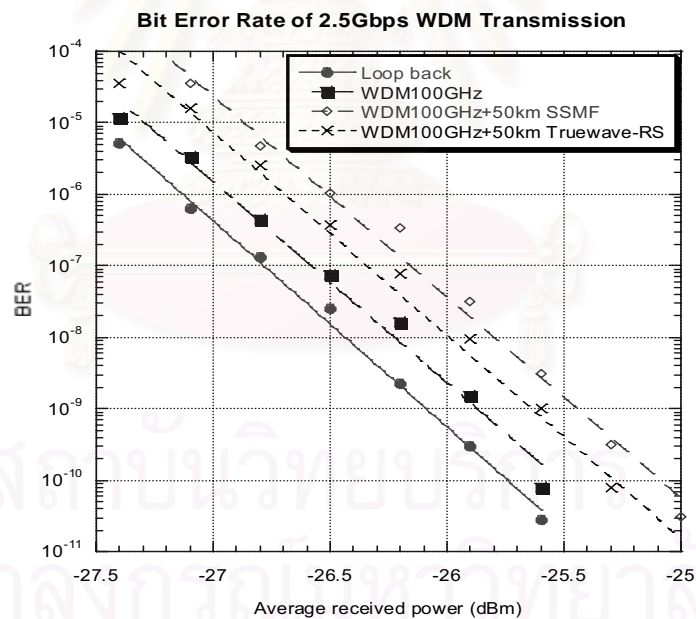
4) WDM 100 GHz และผ่านเส้นใยนำแสงชนิด Truwave-RS 50 km

สัญญาณทางแสงกำลังเฉลี่ยขนาด 2.81 dBm ระบบ WDM 50 GHz 2 ช่องสัญญาณส่งผ่านเส้นใยนำแสงชนิด Truwave-RS ความยาวประมาณ 50 km และก่อนที่จะป้อนสัญญาณแสงไปที่ตัวรับ ปรับกำลังแสงลดลงเหลือ -16 dBm เมื่อแปลงสัญญาณทางแสงกลับมาเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าแล้วจะได้สัญญาณทางไฟฟ้างดรูปที่ 6.48 ซึ่งมีแรงแต้นจากยอดถึงยอดเท่ากับ 275.36 mVp-p และค่า Jitter peak-to-peak เท่ากับ 44.44 ps ส่วนค่า Rise time และ Fall time มีค่าเท่ากับ 111.1 ps และ 108.9 ps ตามลำดับ



รูปที่ 6.48 สัญญาณไฟฟ้าขาออกจากเส้นใยนำแสง Truwave-RS 50 km ใน WDM 100 GHz

จากนั้นทดลองวัดอัตราผิดพลาดบิต โดยผลการทดสอบค่าอัตราผิดพลาดบิตเป็นดังรูปที่ 6.49 ซึ่งค่า power penalty ที่ BER =  $10^{-9}$  ด้วยระบบ WDM 100 GHz ในกรณีสัญญาณทางแสงผ่านเส้นใยนำแสงชนิด SSMF มีค่าเท่ากับ 0.65 dB (-25.44-(-26.09)) ซึ่งมากกว่าผลรวมกันระหว่าง power penalty ของระบบ WDM 100 GHz อย่างเดียว (0.22 dB) กับผ่านเส้นใยนำแสง SSMF อย่างเดียว (0.41 dB) โดยรวมกันแล้วจะมีค่า  $0.22+0.41=0.63$  dB และพบว่ากรณีสัญญาณแสงผ่านเส้นใยนำแสงชนิด Truewave-RS จะมีค่า 0.45 dB (-25.64-(-26.09)) ซึ่งมากกว่าผลรวมกันระหว่าง power penalty ของระบบ WDM 100 GHz อย่างเดียว(0.22 dB) กับผ่านเส้นใยนำแสง Truewave-RS อย่างเดียว (0.22 dB) โดยรวมกันแล้วจะมีค่า  $0.22+0.22=0.44$  ซึ่งจะพบว่าเมื่อสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสงชนิด SSMF จะมีอัตราผิดพลาดบิตสูงกว่าผ่านเส้นใยนำแสงชนิด Truewave-RS ในระบบ WDM 100 GHz เนื่องจากเส้นใยนำแสง Truewave-RS มีค่า fiber dispersion ในช่วงแถบ 1550 nm มีค่าต่ำกว่าของ SSMF ทำให้มีความผิดเพี้ยนของสัญญาณข้อมูลน้อยกว่า

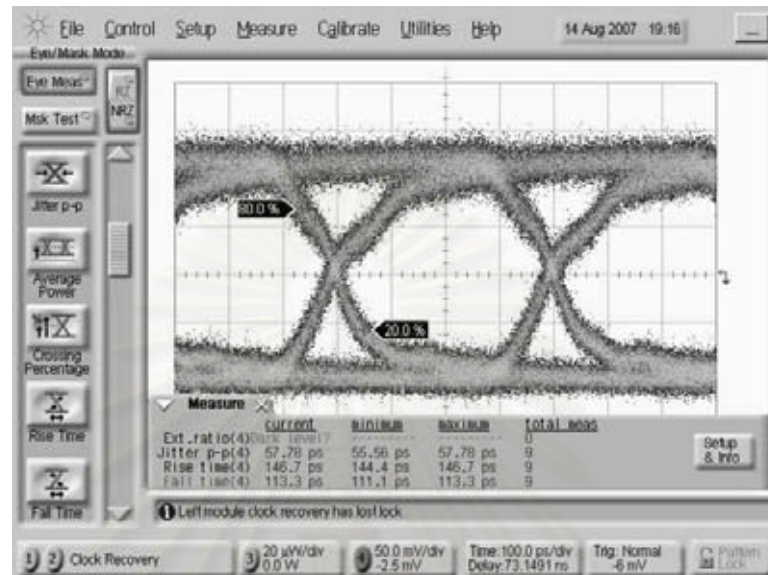


รูปที่ 6.49 อัตราผิดพลาดบิตผ่านเส้นใยนำแสงในระบบ WDM 100 GHz

5) WDM 50 GHz และผ่านเส้นใยนำแสงชนิด SSMF 50 km

สัญญาณทางแสงกำลังเฉลี่ยขนาด 2.81 dBm ระบบ WDM 100 GHz 2 ช่องสัญญาณส่งผ่านเส้นใยนำแสงชนิด SSMF ความยาวประมาณ 50 km ก่อนที่จะป้อนสัญญาณแสงไปที่ตัวรับสัญญาณทางแสง ปรับกำลังแสงลดลงเหลือ -16 dBm เมื่อแปลงสัญญาณทางแสงกลับมา

เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าแล้วจะได้สัญญาณทางไฟฟ้างรูปที่ 6.50 ซึ่งมีแรงดันจากยอดถึงยอดเท่ากับ 277.75 mVp-p และค่า Jitter peak-to-peak เท่ากับ 57.78 ps ส่วนค่า Rise time และ Fall time มีค่าเท่ากับ 146.7 ps และ 113.3 ps ตามลำดับ



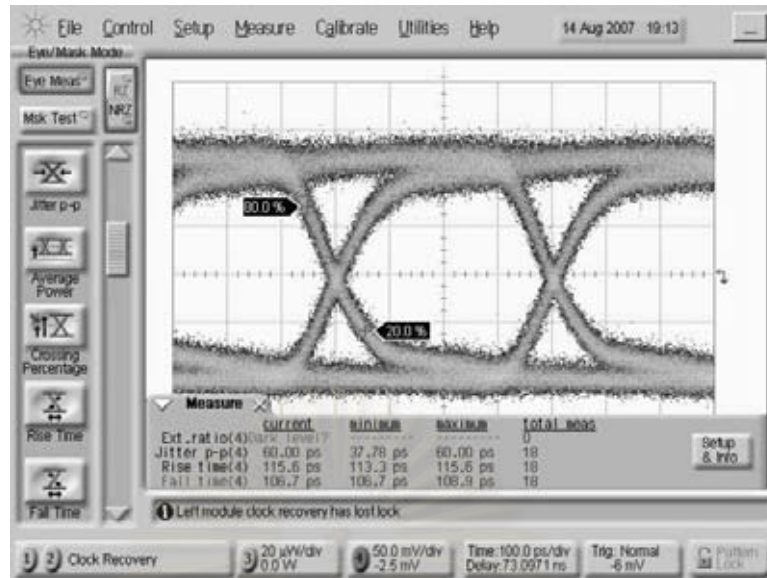
รูปที่ 6.50 สัญญาณไฟฟ้าขาออกจากเส้นใยนำแสง SSMF 50 km ในระบบ WDM 50 GHz

6) WDM 50 GHz และผ่านเส้นใยนำแสงชนิด Truwave-RS 50 km

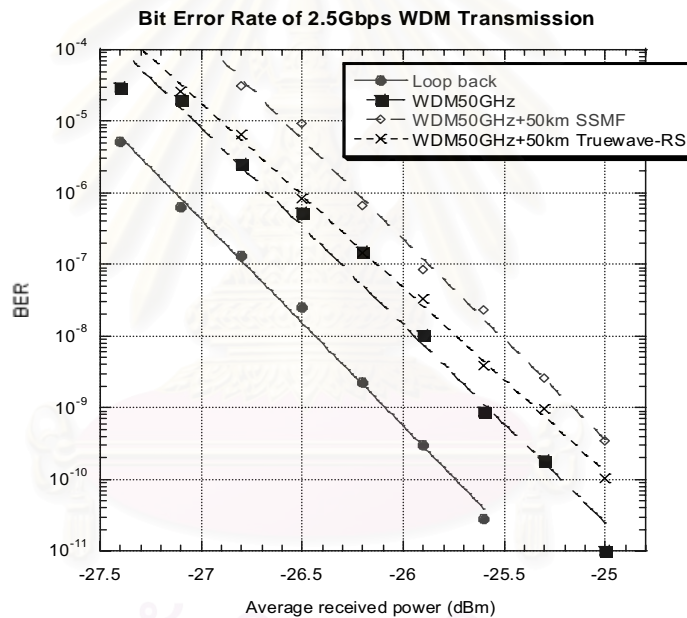
สัญญาณทางแสงกำลังเฉลี่ยขนาด 2.81 dBm ระบบ WDM 100 GHz 2 ช่องสัญญาณส่งผ่านเส้นใยนำแสงชนิด Truwave-RS ความยาวประมาณ 50 km และก่อนที่จะป้อนสัญญาณแสงไปที่ตัวรับ ปรับกำลังแสงลดลงเหลือ -16 dBm เมื่อแปลงสัญญาณทางแสงกลับมาเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าแล้วจะได้สัญญาณทางไฟฟ้างรูปที่ 6.51 ซึ่งมีแรงดันจากยอดถึงยอดเท่ากับ 276.09 mVp-p และค่า Jitter peak-to-peak เท่ากับ 60.00 ps ส่วนค่า Rise time และ Fall time มีค่าเท่ากับ 115.6 ps และ 106.7 ps ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 6.51 สัญญาณไฟฟ้าขาออกจากเส้นใยนำแสง Truewave-RS 50 km ใน WDM 50 GHz

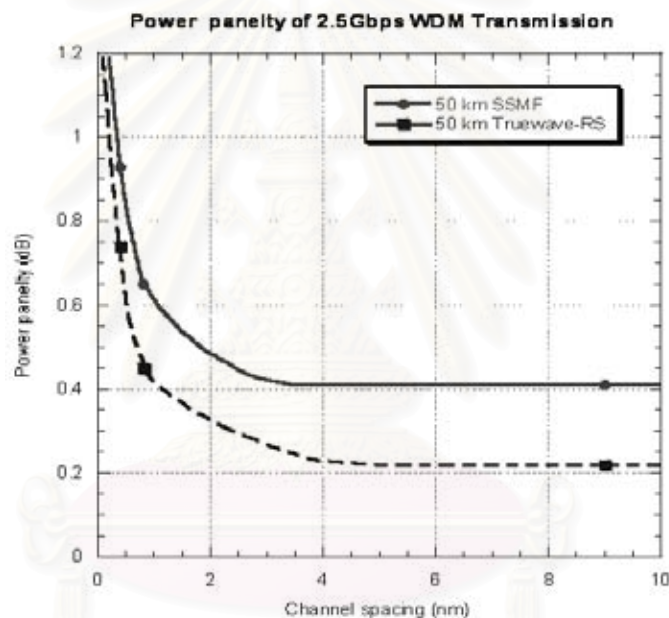


รูปที่ 6.52 อัตราผิดพลาดบิตผ่านเส้นใยนำแสงในระบบ WDM 50 GHz

จากนั้นทดลองวัดอัตราผิดพลาดบิต โดยผลการทดสอบค่าอัตราผิดพลาดบิตเป็นดังรูปที่ 6.52 ซึ่งค่า power penalty ที่ BER =  $10^{-9}$  ด้วยระบบ WDM 50 GHz ในกรณีสัญญาณทางแสงผ่านเส้นใยนำแสงชนิด SSMF มีค่าเท่ากับ 0.93 dB ( $-25.16 - (-26.09)$ ) ซึ่งมากกว่าผลรวมกันระหว่าง power penalty ของระบบ WDM 50 GHz อย่างเดียว (0.51 dB) กับผ่านเส้นใยนำแสง SSMF อย่างเดียว (0.41 dB) โดยรวมกันแล้วจะมีค่า  $0.51 + 0.41 = 0.92$  dB และพบว่ากรณีสัญญาณแสงผ่านเส้นใยนำแสงชนิด Truewave-RS จะมีค่า 0.74 dB ( $-25.35 - (-26.09)$ ) ซึ่งมากกว่าผลรวมกันระหว่าง power penalty ของระบบ WDM 50 GHz อย่างเดียว (0.51 dB) กับ

ผ่านเส้นใยนำแสง Truewave-RS อย่างเดียว (0.22 dB) โดยรวมกันแล้วจะมีค่า  $0.51+0.22=0.73$  ซึ่งจะพบว่าเมื่อสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสงชนิด SSMF จะมีอัตราผิดพลาดบิตสูงกว่าผ่านเส้นใยนำแสงชนิด Truewave-RS ในระบบ WDM 50 GHz เนื่องจากเส้นใยนำแสง Truewave-RS มีค่า fiber dispersion ในช่วงแถบ 1550 nm มีค่าต่ำกว่าของ SSMF ทำให้มีความผิดเพี้ยนของสัญญาณข้อมูลน้อยกว่า แต่อย่างไรก็ตามค่า BER ทั้งหมดที่วัดได้ยังมีค่าน้อยกว่า 1 dB สอดคล้องกับค่าสอดคล้องกับมาตรฐาน ITU-T G.692 Optical interfaces of multichannel systems with optical amplifiers [5]

### 6.6.3 Power Penalty



รูปที่ 6.53 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณและค่า Power penalty ผ่านเส้นใยนำแสงชนิด SSMF และ Truewave-RS ระยะทาง 50 km

เมื่อนำค่า Power penalty ที่วัดได้ทั้งหมดของทั้งการรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสงชนิด SSMF และชนิด Truewave-RS ระยะทาง 50 km มาพล็อตลงในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแสงกับค่า Power penalty จะพบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแสงมีค่าสูงมาก ค่า Power penalty เท่ากับ 0.45 dB ในกรณีระบบผ่าน SSMF และ 0.22 dB ในกรณีระบบผ่าน Truewave-RS และเมื่อบีบระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณให้แคบลง จะพบว่า Power penalty มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องมาจากการรบกวนซึ่งกันและกันระหว่างสัญญาณแสงใกล้เคียง

## บทที่ 7

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 7.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการออกแบบและประกอบตัวส่งสัญญาณทางแสงโดยใช้เทคนิคการมอดูเลตด้วยวิธีดูดกลืนคลื่นไฟฟ้าในการมอดูเลตทางความเข้มแสง ซึ่งสามารถใช้งานได้ที่อัตราข้อมูลความเร็วสูง 2.5 Gb/s ตามมาตรฐาน SONET/SDH นอกจากนั้นตัวส่งสัญญาณสามารถปรับความยาวคลื่นแสงได้ จึงนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบการรับส่งสัญญาณข้อมูลหลายความยาวคลื่น ผ่านเส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดียว (Standard Single Mode Fiber, SSMF) และชนิด Truewave-RS ระยะทาง 50 km โดยมีอัตราความผิดพลาดบิตน้อยกว่า  $10^{-9}$

จากการศึกษาผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวส่งสัญญาณทางแสงด้วยวิธีการดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า พบว่าอุปกรณ์เลเซอร์ที่มีตัวมอดูเลเตอร์ด้วยวิธีการดูดกลืนคลื่นไฟฟ้าในปัจจุบันได้พัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นและสามารถประยุกต์ใช้ในระบบการรับส่งสัญญาณด้วยอัตราความเร็วของข้อมูลสูงขึ้น อีกทั้งยังมีความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้งานในระบบรับส่งสัญญาณหลายความยาวคลื่นอีกด้วย

ในการออกแบบแผ่นวงจรตัวส่งสัญญาณทางแสงใช้วัสดุชนิด FR4 ประกอบไปด้วย 4 ชั้น คือ Signal layer, Power plane, Ground plane และ Signal layer ซึ่งในการออกแบบวงจรความถี่สูงจำเป็นต้องคำนึงถึงการลดปัญหาเรื่องสัญญาณรบกวน ค่าอิมพีแดนซ์ วัสดุที่ใช้ ออกแบบ เป็นต้น ในการออกแบบวาดลายวงจรเขียนด้วยมือโดยใช้ซอฟต์แวร์โปรแกรม Protel และจำลองลายวงจรหาค่าอิมพีแดนซ์ด้วยซอฟต์แวร์โปรแกรม TXLine2003 และ PolarSi8000

เมื่อทดสอบส่งสัญญาณข้อมูลระดับ CML ด้วยลำดับบิต PRBS  $2^{31} - 1$  ป้อนเข้าตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ออกแบบไว้ สามารถส่งสัญญาณข้อมูลความเร็ว 2.5 Gb/s ด้วยกำลังแสงสูง 3 dBm ได้โดยมีประสิทธิภาพสอดคล้องกับมาตรฐาน ITU-T G.692 โดยที่ตัวส่งสัญญาณทางแสงจะกินพลังงานไฟฟ้าประมาณ 1.37 W

จากนั้นประยุกต์ใช้งานตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ออกแบบไว้ให้มีความยาวคลื่น 1551.72 nm เข้ากับระบบการรับส่งสัญญาณหลายความยาวคลื่น โดยจำลองระบบด้วยการรับส่งสัญญาณ 3 ช่องสัญญาณที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากับ 100 GHz (0.8 nm) ที่ความยาวคลื่น 1550.92, 1551.72 และ 1552.52 สอดคล้องกับมาตรฐาน ITU-Grid G.694.1 ซึ่งหลังจากตีพิมพ์ผลึกสัญญาณความยาวคลื่น 1551.72 nm ออกมาและวัดหาอัตราผิดพลาดบิตพบว่ามีค่า Power penalty น้อยกว่าค่ามาตรฐาน ITU-T ที่ระบุว่าต้องมีค่าน้อยกว่า 1 dB

จากนั้นทดสอบระบบสัญญาณหลายความยาวคลื่นผ่านเส้นใยนำแสงชนิด SSMF และ Truewave-RS ระยะทาง 50 km ซึ่งจัดเป็นระยะทางมาตรฐานระดับ Intermediate-Reach โดยไม่ต้องใช้ตัวขยายสัญญาณระหว่างทาง พบว่ามีค่า Power penalty เท่ากับ 0.93 และ 0.74 dB ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่ามาตรฐาน ITU-T ที่ระบุว่าต้องมีค่าน้อยกว่า 1 dB

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงและพัฒนาการออกแบบและประกอบตัวส่งสัญญาณทางแสงด้วยวิธีมอดูเลตแบบดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า เพื่อนำไปประยุกต์ต่อในอนาคตมีดังนี้

1) เปลี่ยนชนิดของวัสดุที่ใช้ทำแผ่นวงจรเพื่อลดการบิดเบี้ยวของสัญญาณข้อมูลความเร็วสูง เช่น Duriod หรือ Roger แทน FR4 แต่ด้วยราคาสูงกว่าและขณะนี้ยังไม่สามารถทำได้ในประเทศไทย ในการวิจัยนี้จึงใช้วัสดุ FR4 ในการออกแบบ

2) การออกแบบลายวงจรจำเป็นต้องคำนึงถึงการเท่ากันของอิมพีแดนซ์ของลายวงจรกับอุปกรณ์ เพื่อป้องกันการสะท้อนกลับของสัญญาณ โดยสามารถใช้ซอฟต์แวร์โปรแกรมในการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ได้อย่างถูกต้อง โดยใช้โปรแกรม TXLINE2003 และ PolarSi8000

3) เมื่อออกแบบโดยใช้วัสดุและลายวงจรที่เหมาะสม จะสามารถทำงานได้ที่อัตราข้อมูลสูงกว่า 2.5 Gb/s ได้

4) ในการควบคุมอุณหภูมิของเลเซอร์สามารถประกอบวงจรป้อนกลับซึ่งมีความซับซ้อนเพื่อใช้ในการควบคุมคุณสมบัติเลเซอร์ให้คงที่ได้ โดยจำเป็นต้องคำนึงถึงการระบายความร้อนของวงจรด้วย เนื่องจากวงจรควบคุมอุณหภูมิกินพลังงานมาก

5) สามารถเพิ่มวงจรป้อนในการควบคุมกำลังแสงของเลเซอร์ให้คงที่ได้ โดยต่อวงจรเข้ากับตัว Photodetector ที่มีอยู่ในตัว EML อยู่แล้วให้ทำงานได้ เพื่อเป็นตัววัดระดับของกำลังแสงแล้วป้อนกลับไปควบคุมเลเซอร์

6) จำลองการทำงาน (Simulation) เพื่อลดปัญหาความผิดพลาดในการออกแบบ โดยสามารถใช้ซอฟต์แวร์โปรแกรม AWR และ Sonnet ในการวิเคราะห์ก่อนการผลิตบอร์ดวงจรจริง เพื่อลดต้นทุนในการผลิตได้

7) สามารถปรับระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณในการรับส่งสัญญาณแสงหลายความยาวคลื่นให้มีระยะแคบลงกว่าเดิม แต่จำเป็นต้องใช้ตัวดีมัลติเพลกซ์ที่สามารถปรับจูนได้ เนื่องจากจากอุปกรณ์ในการดีมัลติเพลกซ์สัญญาณที่ใช้อยู่ไม่เป็นอุปกรณ์แบบปรับจูนได้ จึงดีมัลติเพลกซ์ช่องสัญญาณที่ต้องการไม่ได้

8) หาแหล่งข้อมูลเพิ่มอีก 2 แหล่งข้อมูลเข้าไปมอดูเลตสัญญาณแสงของช่องสัญญาณแสงซ้ายและขวา เพื่อศึกษาผลกระทบจากปัญหา cross-phase modulation ต่อช่องสัญญาณแสงตรงกลางที่สนใจ

9) สามารถส่งสัญญาณข้อมูลผ่านเส้นใยนำแสงระยะทางระดับไกล Long-Reach หรือ Ultra-Reach ได้โดยใช้ตัวขยายสัญญาณทางแสง เช่น Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFA) ช่วยในการรับส่งสัญญาณให้ได้ระยะทางไกลขึ้น



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- [1] H. Suzuki, N. Takachio, H. Masuda and K. Iwatsuki. Super-dense WDM transmission technology in the zero-dispersion region employing distributed Raman amplification. IEEE J. Lightwave Technol. 21 (April 2003): 973 – 981.
- [2] K. Pattanakul, P. Tantivongampai, and D. Wonglumsom. Design and experimentation of 2.5 Gb/s directly modulated optical transmitter. The Second National Conference on Optics and Applications (NCOA-2), Bangkok, Thailand. (February 2005): 96–101
- [3] P. Tantivongampai, K. Pattanakul, and D. Wonglumsom. Bit error rate performance of 2.5 Gb/s optical transponder over 15-km SSMF and 50-km Truewave fiber transmissions. The Fourth International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), Bangkok, Thailand. (December 2005): 414–417.
- [4] M. Okayasu, M. Akashi, and M. Aoki. A 1550-nm 40-Gbits/s Electro-Absorption DFB Laser Diode Module for Transponders with Very Short Reach (< 2 km) Applications. LEOS'04. 2 (November 2004): 513–514.
- [5] ITU Telecommunication Standardization Sector. ITU-T Recommendation G.692, Optical interfaces of multichannel systems with optical amplifiers [Computer file]. 1998. Available from: <http://www.itu.int/> [2007, March 12]
- [6] Harold K. Fiber optic communication. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2004
- [7] Harry J. R. Duttun. Understanding optical communication. 1<sup>st</sup> ed. (n.p.): IBM Corporation International Technical Support Organization, 1998.
- [8] Keiser G. Optical fiber communications. 3<sup>rd</sup> ed. Singapore: McGraw-Hill, 2000.
- [9] Fiber-optics information. Laser diode [Online]. (n.d.). Available from: <http://www.fiber-optics.info/articles/laser-diode.htm> [2007, July 30]
- [10] ITU Telecommunication Standardization Sector. ITU-T G.657, Optical interfaces for equipments and systems relating to the synchronous digital hierarchy [Computer file]. 2006. Available from: <http://www.itu.int/> [2007, March 12]
- [11] Y .Miyazaki, T. Yamatoya, K. Matsumoto, K. Kuramoto, K. Shibata, T. Aoyagi, and T. Ishikawa. High-power ultralow-chirp 10-Gb/s electroabsorption

- modulator integrated laser with ultrashort photocarrier lifetime. IEEE J. Quantum Electron. 42, 4 (April 2006): 357–362.
- [12] Y. Chen, Y. Chang, C. Chen, C. Lee, C. Ni, C. Hsu, F. Cheng, S. Lee, Y. Yu, J. Chern. High manufacturability and high reliable 10Gb/s electro-absorption laser package. Electronic Components and Technology Conference, 2005. Proceedings. 55th. 2 (May 2005): 1642 – 1647
- [13] H. Fukano, Y. Akage, Y. Kawaguchi, Y. Suzuki, K. Kishi, T. Yamanaka, Y. Kondo and H. Yasaka. Low driving-voltage 40-Gbit/s electroabsorption modulator integrated DFB laser module with low chirp characteristics. Semiconductor Laser Conf, Conference Digest. 2006 IEEE 20th International. 1 (2006): 155-156
- [14] E. Lach and K. Schuh. Recent advances in Ultrahigh Bit Rate ETDM Transmission Systems. IEEE J. Lightw. Technol. 24, 12 (August 2006): 4455–4467
- [15] ITU Telecommunication Standardization Sector. ITU-T G.694.1, Spectral grids for WDM application: DWDM frequency grid [Computer file]. 2002. Available from: <http://www.itu.int/> [2007, March 12]
- [16] ITU Telecommunication Standardization Sector. ITU-T G.691, Optical interfaces for single-channel STM-64, STM-256 and other SDH systems with optical interfaces [Computer file]. 2003. Available from: <http://www.itu.int/> [2007, March 12]
- [17] Lawrence A. J. Application note#1, Controlling temperatures of diode lasers thermoelectrically [Computer file]. ILX Lightwave, 2003. Available from: <http://www.ilxlightwave.com/> [2007, May 1]
- [18] Lawrence A. J. Application note#14, Optimizing TEC drive current [Computer file]. ILX Lightwave, 2003. Available from: <http://www.ilxlightwave.com/> [2007, May 1]
- [19] Its Caltech. Termoelectrics [Online]. (n.d.). Available from: [http://www.its.caltech.edu/~jsnyder/thermoelectrics/history\\_page.htm](http://www.its.caltech.edu/~jsnyder/thermoelectrics/history_page.htm) [2007, July 30]
- [20] Lawrence A. J. Application note#2, Selecting and using thermistors for temperature control [Computer file]. ILX Lightwave, 2003. Available from: <http://www.ilxlightwave.com/> [2007, May 1]

- [21] Maxim-IC. MAX3941 datasheet [Computer File]. (n.d.). Available from:  
<http://www.maxim-ic.com/> [2006, September 15 ]
- [22] ILX Lightwave. LDT-5100 datasheet, Temperature controller [Computer file]. (n.d.).  
Available from: <http://www.ilxlightwave.com/> [2007, May 1]
- [23] ILX Lightwave. CC-505 TEC Interconnect Cable and CC-305S Current Source  
Interconnect Cable datasheet [Computer file]. (n.d.). Available from:  
<http://www.ilxlightwave.com/> [2007, May 1]
- [24] ILX Lightwave LDX-3100 Current Controller datasheet [Computer file]. (n.d.).  
Available from: <http://www.ilxlightwave.com/> [2007, May 1]
- [25] CyOptics. E4560 datasheet, EML [Computer file]. (n.d.). Available from:  
<http://www.cyoptics.com/> [2006, September 15 ]
- [26] Altera. Application note#224, High-speed board layout guidelines version 1.1  
[Computer file]. 2003. Available from: <http://www.altera.com/> [2007, September  
6 ]
- [27] Agilent Technologies. Signal Integrity [Computer file]. (n.d.). Available from:  
<http://www.agilent.com/> [2007, September 6 ]
- [28] Stephen H. Hall, Carrett W. Hall, James A. McCall. High-speed digital system  
Design. USA: JOHN WILEY & SONS, 2000
- [29] Agilent Technologies. Presentation 2, Differential signaling making the right logic  
analyzer connection. [Computer File]. 2004. Available from:  
<http://www.agilent.com/> [2007, September 6 ]
- [30] ITU Telecommunication Standardization Sector. ITU-T G.652. Optical interfaces for  
equipments and systems relating to the synchronous digital hierarchy [Computer  
file]. 2006. Available from: <http://www.itu.int/> [2007, March 12]
- [31] OFS. Truewave-RS fiber datasheet. [Computer file]. (n.d.). Available from:  
<http://www.ofs.com/> [2006, September 15 ]
- [32] CyOptics. R195A datasheet [Computer file]. (n.d.). Available from:  
<http://www.cyoptics.com/> [2006, September 15 ]





ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก. บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่

P. Sricham and D. Worasuchep, " A 2.5 Gb/s Optical Transmitter in Wavelength Division Multiplexing Applications," in 30<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference (EECON-30), Kanjanaburi, Thailand, Oct 25 – 26, 2007.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ตัวส่งสัญญาณทางแสงที่อัตราข้อมูล 2.5 กิกะบิตต่อวินาที เพื่องานประยุกต์ทางการรับส่งสัญญาณแสงหลายความยาวคลื่น

## A 2.5 Gb/s Optical Transmitter in Wavelength Division Multiplexing Applications

พลาธร ศรีฉ่ำ และ ดวงฤดี วรสุชีพ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

โทร. 0-2218-6915 E-mail: palabas@hotmail.com, Duangrudee.W@Chula.ac.th

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอรายละเอียดการออกแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงด้วยเลเซอร์ที่มีมอดูเลเตอร์ชนิดดูดกลืนคลื่นไฟฟ้าที่อยู่ภายใน (Electro-Absorption Modulator Integrated Laser, EML) ที่อัตราข้อมูล 2.5 Gb/s ความยาวคลื่นแสง 1551.72 nm โดยใช้เทคนิคการมอดูเลตความเข้มแสงชนิดดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า เพื่อประยุกต์ใช้ในระบบการรับส่งสัญญาณหลายความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing, WDM) พร้อมแสดงผลการทดลอง WDM ผ่านเส้นใยนำแสงโหมดเดียว ชนิดมาตรฐานระยะทาง 50 km โดยได้ค่าอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate, BER) ต่ำกว่า  $10^{-9}$

คำสำคัญ: ตัวส่งสัญญาณทางแสง, มอดูเลเตอร์แบบดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า, เลเซอร์ที่มีมอดูเลเตอร์ชนิดดูดกลืนคลื่นไฟฟ้าที่อยู่ภายใน, การรับส่งสัญญาณหลายความยาวคลื่น

### Abstract

This article will describe the designing details of 2.5 Gb/s Electro-Absorption Modulator Integrated Laser (EML) optical transmitter using Electro-Absorption Modulation technique to apply in Wavelength Division Multiplexing (WDM) systems. It will also show the experimental results of multi-channel data transmission over 50 km standard single mode fiber (SSMF) at 1551.72 nm with the Bit Error Rate below  $10^{-9}$

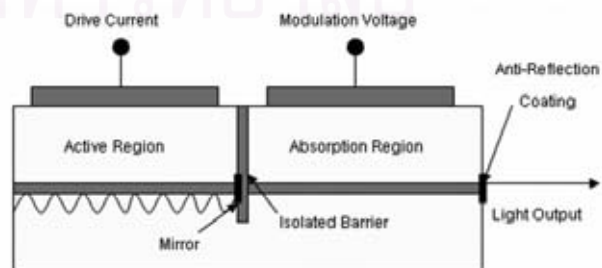
Keywords: Optical Transmitter, Electro-Absorption Modulator, Electro-absorption Modulator Integrated Laser, Wavelength Division Multiplexing

### 1. บทนำ

ปัจจุบันการสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงมีบทบาทมากขึ้น เนื่องจากความจุในการส่งข้อมูลที่มีปริมาณมากและส่งได้รวดเร็ว แม่นยำ

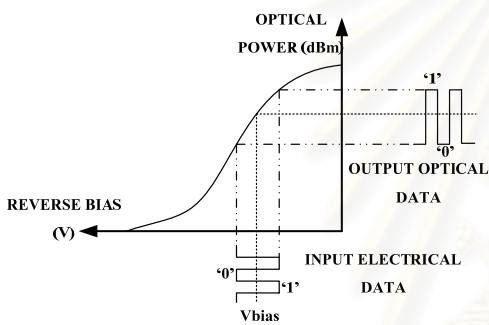
กว่าการสื่อสารในรูปแบบอื่น งานวิจัยทางการสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงนี้ก็มีมาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการพัฒนาตัวส่ง (Optical Transmitter) [1] และตัวรับสัญญาณทางแสง (Optical Receiver) ที่ได้มีการรวมเข้าด้วยกันเป็นตัวรับส่งสัญญาณทางแสง (Optical Transceiver) ดังเช่น [2] และเนื่องด้วยเส้นใยนำแสงมีแบนด์วิธในการส่งสัญญาณที่กว้างมากเพื่อให้ใช้ประโยชน์จากเส้นใยนำแสงอย่างคุ้มค่า จึงได้นำการรับส่งสัญญาณหลายความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing, WDM) มาใช้งาน ในช่วงแรกเทคโนโลยี WDM ถูกเรียกว่า Wideband WDM เนื่องจากแต่ละช่องสัญญาณข้อมูลอยู่ห่างกันมาก ต่อมาจึงได้มีการพัฒนาให้ช่องว่างระหว่างความยาวคลื่นนี้แคบลงเรียกว่า Narrowband WDM เพื่อรองรับปริมาณช่องสัญญาณได้มากขึ้น จนได้เป็น Dense WDM ซึ่งจะสามารถรับส่งสัญญาณแสงได้พร้อมกันถึง 16-160 ช่องสัญญาณ โดยมีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ (Channel spacing) อยู่ที่ 200 100 50 25 และ 12.5 GHz ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1 สำหรับเทคนิคการมอดูเลตทางความเข้มแสงที่เหมาะสมกับระบบ WDM ก็คือการมอดูเลตแบบดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า [3] ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อที่ 2 จากนั้นจะกล่าวถึงการออกแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงในหัวข้อที่ 3 ส่วนการประยุกต์ใช้งานในระบบ WDM จะเสนอในหัวข้อที่ 4 พร้อมทั้งแสดงผลการทดลอง WDM ผ่านเส้นใยนำแสง 50 km ซึ่งเป็นครั้งแรกในประเทศไทยในหัวข้อที่ 5

### 2. ทฤษฎีการมอดูเลตด้วยวิธีดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า



รูปที่ 1 โครงสร้างการมอดูเลตด้วยวิธีดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า

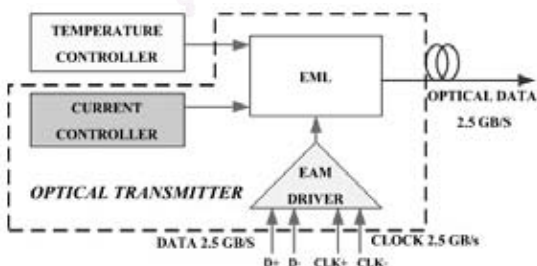
โครงสร้างในการมอดูเลตสัญญาณแบบดูดกลืนคลื่นไฟฟ้านั้น จะนำส่วนของเลเซอร์และส่วนของมอดูเลเตอร์ชนิดดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า (Electro-Absorption Modulator, EAM) เข้ามารวมอยู่บนชิปเดียวกัน เรียกอุปกรณ์นี้ว่าเลเซอร์ที่มอดูเลตด้วยการดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า (Electro-Absorption Modulator Integrated Laser, EML) ดังรูปที่ 1 เมื่อจ่ายกระแสเพื่อขับเลเซอร์บริเวณแอกทีฟ (Active Region) จะมีการผลิตแสงต่อเนื่อง (Continuous Wave, CW) ส่งผ่านไปยังบริเวณดูดกลืน (Absorption Region) ถ้าไม่มีการจ่ายแรงดันมอดูเลต ถ้าแสงต่อเนื่องก็จะผ่านบริเวณนี้ ออกสู่ภายนอก แต่เมื่อมีแรงดันติดลบเข้ามาแสงจะถูกดูดกลืน ดังนั้นถ้า บิตข้อมูลเป็น '1' ระดับแรงดันไบแอสติดลบน้อย แสงจะถูกดูดกลืนน้อย จึงเหลือแสงออกจากอุปกรณ์มาก สำหรับบิตข้อมูลที่เป็น '0' ระดับแรงดันไบแอสจะมีค่าติดลบมาก แสงจะถูกดูดกลืนมาก แสงที่เหลือออกมาจะมีกำลังน้อยกว่า จึงได้เป็นการมอดูเลตสัญญาณแสงตามความเข้ม (Intensity Modulation) ดังรูปที่ 2



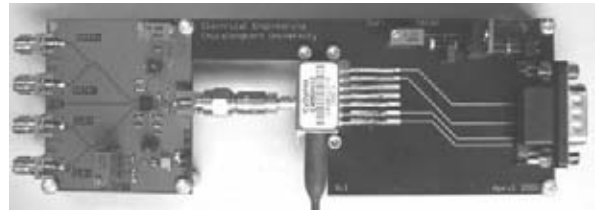
รูปที่ 2 การมอดูเลตด้วยวิธีดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า

**3. การออกแบบการทดลองตัวส่งสัญญาณทางแสง**

ส่วนประกอบของตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ได้ออกแบบแสดง ในรูปที่ 3 สัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้าความเร็ว 2.5 Gb/s ระดับสัญญาณ ชนิด Common Mode Logic (CML) พร้อมสัญญาณนาฬิกาถูกป้อนเข้าสู่ ตัวส่งสัญญาณทางแสง ไปยังตัวขับ EAM (EAM Driver) เพื่อขยายขนาด ของแรงดันมอดูเลตให้เหมาะสม แล้วต่อเข้ากับตัว EML ซึ่งมีการ เชื่อมต่อควบคุมกระแสและตัวควบคุมอุณหภูมิอยู่ด้วย สัญญาณข้อมูล ทางแสงขาออกความเร็ว 2.5 Gb/s ส่งผ่านเข้าสู่เส้นใยนำแสงโหมดเดียว ชนิดมาตรฐาน (Standard Single Mode Fiber, SSMF)



รูปที่ 3 ส่วนประกอบของตัวส่งสัญญาณทางแสง



รูปที่ 4 ตัวส่งสัญญาณทางแสง

เมื่อประกอบรวมวงจรในส่วนของตัว EML ตัวควบคุม กระแส และตัวขับ EAM เข้าด้วยกันบนแผงวงจรเดียวกันดังรูปที่ 4 และมี วงจรเชื่อมต่อเพื่อทำการควบคุมอุณหภูมิของตัวเลเซอร์ด้วยตัวควบคุม อุณหภูมิจากภายนอกได้ วงจรขับมอดูเลเตอร์ทางด้านซ้ายของรูปมี ความสามารถในการขยายสัญญาณข้อมูลได้ประมาณ 2 Vp-p ชิปที่ เลือกใช้คือ MAX3941 ของบริษัท Maxim ที่สามารถขยายสัญญาณระดับ CML (แรงดันตั้งแต่ -400 mV ถึง 0 mV) ให้มีขนาดแรงดันมอดูเลต 1-3 Vp-p สัญญาณขาเข้าของวงจรขับประกอบด้วยพอร์ต Data+, Data-, Clk+ และ Clk- ส่วนพอร์ตขาออก Out ต่อเชื่อมกับตัว EML โดยตัว EML ที่เลือกใช้คือ โมดูล E4560 ของบริษัท CyOptics ภายในจะมี Thermo Electric Cooler (TEC) และ Thermistor สำหรับช่วยในการ ควบคุมอุณหภูมิของเลเซอร์ หลังการทดสอบ คุณลักษณะของเลเซอร์ ภายใต้มีค่ากระแสขีดเริ่มเปลี่ยนเท่ากับ 11.16 mA ให้กำลังแสงสูงสุดถึง 13 dBm

ทางด้านขวาของรูปคือวงจรควบคุมกระแสขับเลเซอร์ โดย วงจรส่วนนี้จะอาศัยการทำงานของตัว Regulator โมดูล LM317 ค่ากระแสที่สามารถปรับได้อยู่ในช่วงการทำงานของเลเซอร์ คือ 50 – 100 mA ส่วนการควบคุมอุณหภูมิจะเชื่อมต่อจากแผ่นวงจรนี้เข้ากับตัว ควบคุมอุณหภูมิของบริษัท ILX Lightwave โมดูล LDT-5100 ตัว Thermistor ที่อยู่ภายในเลเซอร์จะเป็นตัวตรวจวัดอุณหภูมิของเลเซอร์ แล้วส่งสัญญาณไปยังตัวควบคุมอุณหภูมิภายนอก โดยจะอาศัยหลักการ ทำงานวงจรป้อนกลับ (Feed Back Control) ในการป้อนกระแสไฟบวก หรือลบกลับไปยังตัว TEC ที่อยู่ภายในเลเซอร์เพื่อทำให้สามารถดูหรือ คายความร้อนจากตัวเลเซอร์ได้ เนื่องจากอุณหภูมิของเลเซอร์มีผลต่อ ความยาวคลื่นแสงของแสง ดังนั้นความสามารถปรับค่าอุณหภูมิของ เลเซอร์ได้ก็จะทำให้สามารถปรับค่าความยาวคลื่นแสงได้ โดยในการ ทดลองนี้จะปรับค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์บนตัวส่งสัญญาณทางแสง ให้อยอดสเปกตรัมสูงที่สุดคงที่อยู่ที่ค่า 1551.72 nm ตามมาตรฐาน ITU-T Grid G.694.1

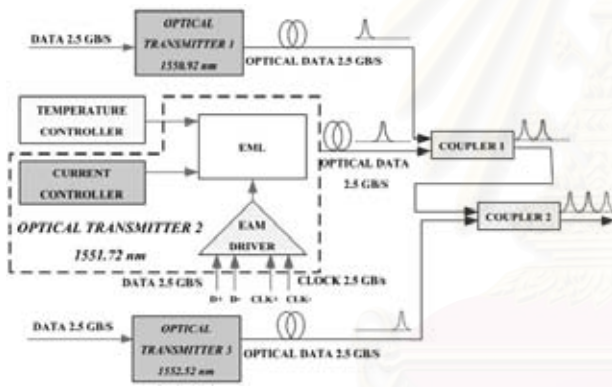
**4. การออกแบบระบบการรับส่งสัญญาณหลายความยาวคลื่น**

จำลองระบบ WDM ที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณแสง (Channel spacing) 100 GHz สอดคล้องกับมาตรฐาน ITU-T 694.1 ภาคส่งสัญญาณจะทำการสร้างสัญญาณข้อมูลแสง 3 ความยาวคลื่นที่มี

ยอดของความยาวคลื่นห่างจากกันเท่ากับ 0.8 nm จากนั้นนำสัญญาณแต่ละช่องสัญญาณมารวมกันด้วยตัวมัลติเพลกซ์ทางแสงก่อนส่งผ่านเส้นใยนำแสงเส้นเดียวกัน สำหรับทางภาครับทำการแยกสัญญาณความยาวคลื่นตรงกลางออก แล้วส่งต่อไปยังตัวรับสัญญาณทางแสงก่อนที่จะแปลงสัญญาณทางแสงกลับสู่สัญญาณทางไฟฟ้าต่อไป ซึ่งจะอธิบายภาคส่งและภาครับสัญญาณในหัวข้อ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

**4.1 ภาคส่ง**

จากรูปที่ 5 นำตัวส่งสัญญาณทางแสงในหัวข้อที่ 3 จะสร้างสัญญาณความยาวคลื่น 1551.72 nm ซึ่งเป็นความยาวคลื่นหลักที่สนใจกำหนดให้เป็นความยาวคลื่นที่ 2 จากนั้นสร้างสัญญาณแสงด้านข้างทั้งสองข้างคือ ความยาวคลื่นที่ 1 (1550.92 nm) และ 3 (1552.52 nm) ซึ่งเป็นความยาวคลื่นด้านซ้ายและขวาของความยาวคลื่นที่ 2 ให้ทั้งสามค่าความยาวคลื่นห่างกัน 100 GHz สอดคล้องกับมาตรฐาน ITU-Grid G.694.1 จากนั้นนำสัญญาณความยาวคลื่นทั้ง 3 มารวมกันด้วยตัวคู่ต่อสัญญาณทางแสง (Optical Coupler) 2 ตัวก่อนผ่านเส้นใยนำแสงเพียงเส้นทางเดียว

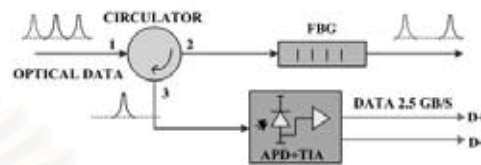


รูปที่ 5 ภาคส่งสัญญาณในระบบ WDM

**4.2 ภาครับ**

ทางภาครับจะต้องสามารถแยกความยาวคลื่นหลักที่สนใจออกจากคลื่นแสงอื่นๆ ได้ ในการทดลองนี้จะใช้ตัว Optical circulator ร่วมกับตัว FBG ในการแยกความยาวคลื่นที่ 2 ตัว Circulator ที่ใช้เป็นของบริษัท Agiltron ที่ทำงานที่ความยาวคลื่น 1550 nm ซึ่งมีหลักการทำงานคือ จะส่งผ่านแสงที่เข้าขาที่ 1 ออกไปยังขาที่ 2 และในขณะเดียวกันส่งผ่านแสงที่เข้าขาที่ 2 ออกไปยังขาที่ 3 เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยในตัว Fiber Bragg Grating (FBG) ในการกรองสัญญาณแสง เมื่อสัญญาณข้อมูล 3 ช่องสัญญาณผ่าน Circulator เข้าสู่ตัว FBG ความยาวคลื่นแสงที่ตรงกันกับ FBG ก็จะถูกสะท้อนกลับไปให้ Circulator แต่ถ้าไม่ตรงก็จะส่งผ่านออกไป ตัว FBG ที่เลือกใช้เป็นของบริษัท Photonix สามารถสะท้อนแสงความยาวคลื่นในช่วง 1551.67 +/- 0.25 nm ซึ่งจะสะท้อนสัญญาณข้อมูลช่องสัญญาณที่ 2 (1551.72 nm) กลับ แล้วส่งผ่านไปยังขาที่ 3 ของตัว Circulator จากนั้นทำการตรวจจับสัญญาณแสงนี้ด้วย

ตัว Avalanche Photodiode (APD) ที่มีค่าความไวเท่ากับ -26 dBm โดยแปลงสัญญาณทางแสงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า และผ่านตัวขยายสัญญาณแบบ Linear Preamplifier ชนิด Transimpedance Amplifier (TIA) ซึ่งจะขยายสัญญาณจากโดเมนกระแสให้อยู่ในโดเมนแรงดันที่มีขนาดสูงประมาณ 700-1000 mVp-p ซึ่งตัว APD และ TIA ที่เลือกใช้จะประกอบอยู่บนแพ็คเกจตัวเดียวกัน โมดูล R195A ของบริษัท CyOptics

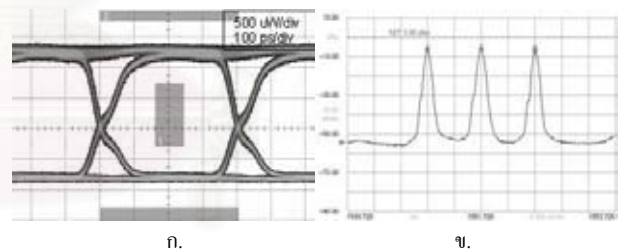


รูปที่ 6 ภาครับสัญญาณในระบบ WDM

**5. การทดลองและผลที่วัดได้**

**5.1 ลักษณะสัญญาณแผนภาพรูปตา (Eye Diagram)**

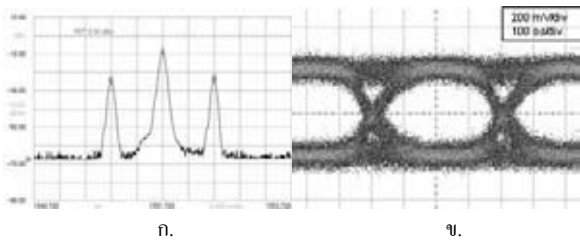
สัญญาณแสงความเร็ว 2.5 Gb/s ที่มีข้อมูลชนิด PRBS 2<sup>31</sup>-1 polynomial ขาออกจากตัวส่งสัญญาณทางแสงจะมีลักษณะสัญญาณแผนภาพรูปตาดังแสดงในรูป 7 (ก) เมื่อวัดที่ระดับพลังงานแสงขาออก 3 dBm โดยตั้งระดับแรงดันมอดูลดขนาด 2 Vp-p และแรงดันไบแอสอยู่ที่ 0 V ทำการวัดสัญญาณแสงนี้ด้วยเครื่อง Digital Communication Analyzer (DCA) ได้ค่าสัดส่วนเอกซ์ทิงชัน (Extinction ratio, EX) เท่ากับ 10.53 dB ซึ่งดีกว่าค่า 8.2 dB ที่เป็นค่าขั้นต่ำตามมาตรฐาน ITU-T G.693



รูปที่ 7 (ก) 2.5 Gb/s Eye Diagram ของสัญญาณขาออก EML (ข) สเปกตรัมสัญญาณข้อมูลแสง 3 ช่องสัญญาณ

เมื่อทำการมัลติเพลกซ์สัญญาณทางแสง 3 ช่องสัญญาณ ด้วยตัววัดสัญญาณทางแสง 2 ตัว จะได้สเปกตรัมทางแสงเป็นดังรูปที่ 7.ข โดยมีระยะห่างระหว่างความยาวคลื่นเท่ากับ 100 GHz (0.8 nm) เมื่อสัญญาณแสงทั้ง 3 ถูกส่งผ่านเส้นใยนำแสงป้อนเข้าสู่ภาครับของระบบ WDM สัญญาณจะถูกมัลติเพลกซ์ด้วย Circulator และ FBG เพื่อกรองสัญญาณช่องที่ 2 ออก ได้สเปกตรัมเป็นดังในรูปที่ 8 (ก) ค่ากำลังแสงสูงสุดมีค่าเท่ากับ -8.46 dBm และพบว่ามีการรบกวนจากสัญญาณช่องที่ 1 และช่องที่ 3 แต่ด้วยกำลังที่น้อยกว่าสัญญาณช่องที่ 2 อยู่ประมาณ 15 dB ซึ่งถือว่าน้อยมาก จากนั้นแปลงสัญญาณทางแสงที่กรองมาเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าด้วย APD พร้อมทั้งขยายสัญญาณด้วย TIA สัญญาณที่ตรวจจับ

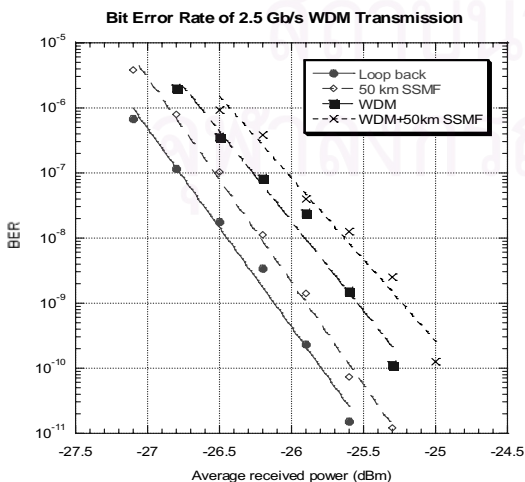
ได้จะมีลักษณะสัญญาณแผนภาพรูปตาตั้งในรูปที่ 8 (ข) โดยวัดที่ระดับพลังงานแสงเฉลี่ยที่ -10 dBm มีค่า peak-to-peak เท่ากับ 830 mVp-p



รูปที่ 8 (ก) สเปกตรัมสัญญาณข้อมูลแสงหลังคิมัลติเพล็กซ์ (ข) 2.5 Gb/s Eye Diagram ของสัญญาณขาออก APD+TIA

### 5.2 อัตราความผิดพลาดบิต

จากรูปที่ 9 แสดงผลการวัดอัตราความผิดพลาดบิตของตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ประกอบขึ้นที่อัตราข้อมูล 2.5 Gb/s โดยทำการทดสอบทั้งหมด 4 กรณีคือ (1) Loop-Back, (2) ผ่านเส้นใยนำแสงโหมคเดียวขนาดมาตรฐานที่ระยะทาง 50 km, (3) ผ่านระบบ WDM, และ(4) ผ่านระบบ WDM พร้อมทั้งผ่านเส้นใยนำแสงโหมคเดียวขนาดมาตรฐาน 50 km จากการอ่านค่าของเส้นกราฟที่อัตราความผิดพลาดบิต  $10^{-9}$  จะได้ว่าค่าพลังงานแสงขั้นต่ำในการตรวจจับเป็น -26.13, -25.9, -25.55 และ -25.24 dBm ตามลำดับ ดังนั้น Power Penalty ซึ่งคือพลังงานแสงที่ต้องเพิ่มขึ้นเมื่อส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสง 50 km จะมีผลมาจากกระจายโครมาติกและผลรวมของสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์ต่างๆในระบบจะได้อัตรา Power Penalty เท่ากับ 0.23 dB (-25.90-(-26.13)) กรณีส่งผ่านระบบ WDM อันเป็นผลมาจากสัญญาณรบกวนจากช่องสัญญาณข้างเคียงและจากอุปกรณ์ในระบบเท่ากับ 0.58 dB (25.55-(-26.13)) และกรณีสุดท้าย คือกรณีที่ส่งสัญญาณในระบบ WDM ผ่านเส้นใยนำแสง 50 km จะวัดได้เท่ากับ 0.89 dB (-25.24-(-26.13)) ซึ่งใกล้เคียงกับค่า Power Penalty ทั้ง 2 ค่ารวมกัน (0.58 + 0.23 = 0.81 dB) โดยที่ค่านี้ต่ำกว่า 1 dB ที่กำหนดไว้ในมาตรฐานทั่วไป



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังแสงที่รับ

### 6. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอรายละเอียดการออกแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงความเร็ว 2.5 Gb/s ที่ความยาวคลื่น 1551.72 nm โดยใช้เทคนิคการมอดูเลตความเข้มแสงชนิดคูดกลืนคลื่นไฟฟ้า พร้อมแสดงผลการวัดประสิทธิภาพของตัวส่งสัญญาณ เมื่อทดลองส่งสัญญาณข้อมูลชนิด PRBS  $2^{31}-1$  polynomial ในระบบการรับส่งสัญญาณหลายความยาวคลื่นผ่านเส้นใยนำแสงโหมคเดียวขนาดมาตรฐาน 50 km ได้ค่า Power Penalty 0.89 dB และสามารถให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ต่ำกว่า  $10^{-9}$  ได้

### 7. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้ทุนสนับสนุนจากโครงการเสริมสร้างความเชื่อมโยงระหว่างภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและภาคเอกชนทางด้านการวิจัยและพัฒนาปีที่ 4 และได้รับการอนุเคราะห์บริจาคเส้นใยนำแสงระยะทาง 50 km จากบริษัทไทยไฟเบอร์ออปติก จำกัด

### เอกสารอ้างอิง

[1] K. Pattanakul, P. Tantivongumpai, and D. Wonglumsom, "Design and Experimentation of 2.5 Gb/s Directly Modulated Optical Transmitter," *The Second National Conference on Optics and Applications (NCOA-2)*, Feb. 2005.  
[2] J.W. Raring and L.A. Coldren, "40 Gb/s Widely Tunable Transceivers," *IEEE J. Sel. Topics in Quantum Electron.*, vol. 13, no. 1, pp. 3-14, Jan. 2007.  
[3] T. Tanbun-Ek, L. E. Adams, G. Nykolak, C. Bethea, R. People, A. M. Sergent, P. W. Wisk, P. F. Sciortino, Jr., S. N. G. Chu, T. Fullowan, R. Pawelek, and W. T. Tsang, "Broad-Band Tunable Electroabsorption Modulated Laser for WDM Application," *IEEE J. Sel. Topics in Quantum Electron.*, vol.3, no. 3, June 1997.



นางสาวพลาซ ศรีฉวี นักศึกษาระดับปริญญาตรี วศ.บ. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549 ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ดวงฤดี วรสุชีพ นักศึกษาระดับปริญญาตรี ในสองสาขาวิชาคือ B.S. in Electrical Engineering และ Engineering Physics จาก Lehigh University, USA รวมทั้งได้จบการศึกษาระดับปริญญาโทและเอก (M.S. and Ph.D.) ในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จาก

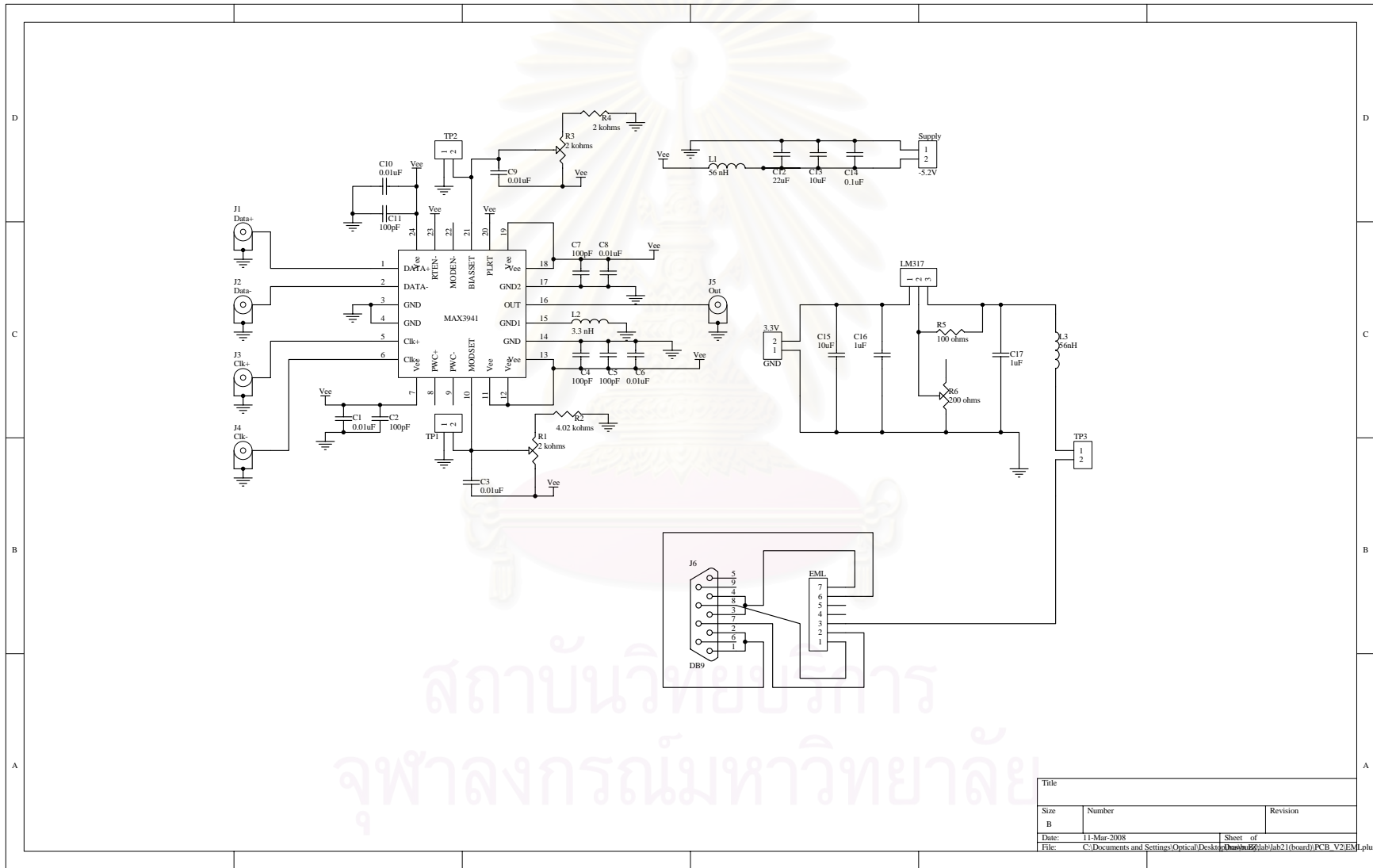
Stanford University, USA ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข. Schematic ของวงจรตัวส่งสัญญาณทางแสง

ลายวงจรตัวส่งสัญญาณทางแสงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เขียน Schematic และวาดลายวงจรโดยซอฟต์แวร์โปรแกรม Protel 99 SE



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิจัยประชากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Title		
Size	Number	Revision
B		
Date:	11-Mar-2008	Sheet of
File:	C:\Documents and Settings\Optical\Desktop\lab21(board)\PCB_V2\EMplusDriver1.dtb	



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพลาธร ศรีจ๋า เกิดวันที่ 22 มีนาคม พ.ศ.2527 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร เข้าศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2545 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2548 ต่อจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549 และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย