

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ



246153

การควบคุมความแปรปรวนและเสถียรภาพของอุณหภูมิในตู้ใส่ตู้ดูดอากาศแบบ
อัตรา 10 ลิตซ์บีตต่อวินาที
บนการตั้งแหล่งจ่ายความแปรปรวนแบบพหุนามหนึ่งตัวระยะห่าง 25 ลิตซ์เฮิรตซ์

นายจิรฤดี อัครานุชาต

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

๒๐๐๒๕๑๖๒๐

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ



การควบคุมความยาวคลื่นและเสถียรภาพของอุณหภูมิในตัวส่งสัญญาณทางแสงต้นแบบ
อัตรา 10 กิกะบิตต่อวินาที
บนการส่งแสงหลายความยาวคลื่นแบบหนาแน่นด้วยระยะห่าง 25 กิกะเฮิรตซ์



นาย จิรวุฒิ อัครานูชาติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



WAVELENGTH CONTROLLING AND TEMPERATURE STABILITY
IN A 10 GB/S OPTICAL TRANSMITTER PROTOTYPE
IN 25-GHZ DENSE WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING TRANSMISSION

Mr. Jirawut Akaranuchat

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 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การควบคุมความยาวคลื่นและเสถียรภาพของอนุกรมใน
ตัวส่งสัญญาณทางแสงต้นแบบ อัตรา 10 กิกะบิตต่อวินาที
บนการส่งแสงหลายความยาวคลื่นแบบหนาแน่นด้วย
ระยะห่าง 25 กิกะเฮิรตซ์

โดย

นายจิรวุฒิ อัครานูชาติ

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

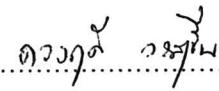
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดวงฤดี วรสุชีพ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


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


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


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


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. อภิศักดิ์ วรพิเชฐ)

จิรวุฒิ อัครานุชาต : การควบคุมความยาวคลื่นและเสถียรภาพของอุณหภูมิในตัวส่งสัญญาณทางแสงต้นแบบ อัตรา 10 กิกะบิตต่อวินาที บนการส่งแสงหลายความยาวคลื่นแบบหนาแน่นด้วยระยะห่าง 25 กิกะเฮิรตซ์. (WAVELENGTH CONTROLLING AND TEMPERATURE STABILITY IN A 10 GB/S OPTICAL TRANSMITTER PROTOTYPE IN 25-GHZ DENSE WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING TRANSMISSION) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. ดวงฤดี วรสุชีพ, 162 หน้า.

246153

วิทยานิพนธ์นำเสนอการออกแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงอัตราข้อมูล 10 Gb/s ด้วยเลเซอร์ที่มีมอดูเลเตอร์ชนิดดัดคลื่นไฟฟ้าอยู่ภายใน พร้อมระบบควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ตัวควบคุมพีไอดี รวมทั้งผลการทดสอบของตัวส่งสัญญาณทางแสงในการรักษาเสถียรภาพของอุณหภูมิ เพื่อควบคุมให้ความคลาดเคลื่อนของความยาวคลื่นอยู่ในช่วง ± 10 pm ตามมาตรฐาน ITU-T G.692 (Frequency Deviation) และผลการทดสอบแผนภาพรูปตาของการส่งข้อมูลด้วยอัตรา 10 Gb/s ในการส่งแสงหลายความยาวคลื่นแบบหนาแน่น จำนวน 3 ช่องสัญญาณ ด้วยระยะห่างช่องสัญญาณ 25 GHz ให้ได้ตามมาตรฐาน SONET(OC-192)/SDH(STM-64)โดยไม่พิจารณาผลการลดทอน และการกระจายโครมาติกของสายต่อเส้นใยนำแสงสั้นๆ

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต จิรวุฒิ อัครานุชาต
 สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ดวงฤดี วรสุชีพ
 ปีการศึกษา 2553

5270662521 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : OPTICAL TRANSMITTER / TEMPERATURE CONTROL SYSTEM / PID Controller / DENSE WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING TRANSMISSION/

JIRAWUT AKARANUCHAT: WAVELENGTH CONTROLLING AND TEMPERATURE STABILITY IN A 10 GB/S OPTICAL TRANSMITTER PROTOTYPE IN 25-GHZ DENSE WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING TRANSMISSION.THESIS ADVISOR : ASST. PROF. DUANG-RUDEE WORASUCHEEP, Ph.D., 162 pp.

246153

This thesis describes the design of 10 Gb/s Optical Transmitter using an Electro-Absorption Modulator Integrated Laser (EML) with Temperature Control System using a Proportional Integral Derivative (PID) controller. The experimental results show that the wavelength deviation of the Optical Transmitter is kept within ± 10 pm according to ITU-T G.692 (Frequency Deviation) standard. The measured 10 Gb/s eye-diagrams of 3 channels in 25-GHz DWDM transmission meet the SONET (OC-192)/SDH (STM-64) specification, without a considering attenuation and chromatic dispersion effects from short fiber patch cord.

Department :Electrical Engineering..... Student's SignatureJirawut Akaranuchat
Field of Study : ..Electrical Engineering..... Advisor's Signature*Duang-Rudee*.....
Academic Year :2010.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ต้องกราบขอบพระคุณสำหรับความช่วยเหลือเป็นอย่างดีของ ผศ. ดร. ดวงฤดี วรสุชีพ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ แรงกระตุ้น แรงบันดาลใจในการทำงานวิจัย อีกทั้งข้อคิด ประสบการณ์ เกี่ยวกับการดำเนินชีวิต

ขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้ความเข้าใจในวิชาเรียนที่เปิดสอน และให้ความช่วยเหลือ ข้อเสนอแนะ ปัญหาที่เกี่ยวกับงานวิจัย

ขอบพระคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมโทรคมนาคม (สพท.) สำนักงานคณะกรรมการกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กทช.) สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัย

ขอขอบพระคุณโครงการวิจัยร่วมเสริมสร้างความเชื่อมโยงระหว่างภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและภาคเอกชนทางด้านกรวิจัยและพัฒนา สำหรับการสนับสนุนเครื่องมือวัดทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณโครงการกลุ่มเชี่ยวชาญแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ด้านการสื่อสารคลื่นแสงและความเร็วสูง (Excellence Group of Chulalongkorn University in Lightwave and High-Speed Communications) สำหรับการสนับสนุนเครื่องมือวัดทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณบริษัท IRC Technologies จำกัด สำหรับการสนับสนุนเครื่อง Function Generator และ Digital Multi Meter ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

ขอบพระคุณ รุ่นพี่ รุ่นน้อง เพื่อนๆ รอบตัวผู้วิจัย ทั้งภายในและภายนอกห้องปฏิบัติการวิจัย สำหรับความช่วยเหลือ คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ และกำลังใจในการวิจัยตลอดมา

ขอบพระคุณโครงการนำร่องเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีควบคุมอัจฉริยะ (GE12 Project: Pilot Plant for Development of Intelligent Control Technology for Green Society) สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัวของผู้วิจัย สำหรับกำลังใจและการสนับสนุนแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง	ฐ
สารบัญภาพ.....	ฑ
ดัชนีคำศัพท์.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	4
1.3 เป้าหมายและขอบเขตงานวิจัย	4
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.6 ประมวลวิทยานิพนธ์	5
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 องค์ประกอบของตัวส่งสัญญาณทางแสงพร้อมระบบควบคุมอุณหภูมิ	7
2.1.1 แหล่งกำเนิดแสง (Light Source)	8
2.1.1.1 ไดโอดเปล่งแสง (Light-Emitting Diode, LED).....	8
2.1.1.2 เลเซอร์ (Laser).....	9
2.1.1.2.1 Fabry-Perot Laser (FP laser)	10
2.1.1.2.2 Distributed-Feedback Laser (DFB laser)	11
2.1.1.2.3 Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser (VCSEL).....	13

2.1.2 วงจรจ่ายกระแสไบแอส (Bias Current Circuit)	13
2.1.3 ตัวมอดูเลเตอร์ทางแสง (Optical Modulator)	14
2.1.3.1 การมอดูเลตแสงโดยตรง (Direct Modulation)	14
2.1.3.2 การมอดูเลตด้วยวิธีดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า	15
2.1.3.3 การมอดูเลตภายนอก (External Modulation)	17
2.1.4 ตัวขับมอดูเลเตอร์ (Modulator Driver)	18
2.1.5 ระบบควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Control System)	19
2.2 การควบคุมความยาวคลื่นและเสถียรภาพของอุณหภูมิ	19
2.2.1 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการเปล่งแสงเลเซอร์	19
2.2.2 องค์ประกอบของระบบควบคุมอุณหภูมิ	22
2.2.2.1 เทอร์มิสเตอร์ (Thermistor)	22
2.2.2.2 การตั้งค่าอุณหภูมิ (Temperature Setting)	23
2.2.2.3 วงจรควบคุมพีไอดี	24
2.2.2.4 ตัวขับกระแสสองขั้ว (Bipolar Current Driver)	27
2.2.2.5 ตัวระบายความร้อน (TEC)	27
2.2.3 หลักการควบคุมอุณหภูมิของเลเซอร์	29
2.3 การรับส่งข้อมูลแบบ DWDM	30
2.3.1 ภาคส่งสัญญาณทางแสง	31
2.3.1.1 ตัวส่งสัญญาณทางแสง	31
2.3.1.1.1 เลเซอร์ปรับความยาวคลื่นได้ (Wavelength Tunable Laser)	32
2.3.1.1.2 เลเซอร์หลายความยาวคลื่น (Multi Wavelength Laser Array)	32
2.3.1.2 ตัวรวมสัญญาณทางแสง (Multiplexer)	33
2.3.1.2.1 ตัวคู่ต่อทางแสง (Optical Fiber Coupler)	33

2.3.1.2.2 Array Waveguide Grating (AWG).....	34
2.3.2 ภาครับสัญญาณทางแสง.....	35
2.3.2.1 ตัวแยกสัญญาณทางแสง (De-Multiplexer)	35
2.3.2.1.1 Fiber Bragg Grating (FBG).....	35
2.3.2.1.2 AWG.....	36
2.3.2.1.3 ตัวกรองแสงแบบปรับได้ (Tunable Filter).....	36
2.3.2.2 ตัวรับสัญญาณทางแสง (Optical Receiver)	37
2.3.2.2.1 ตัวตรวจจับแสงชนิด Positive-Intrinsic-Negative (PIN).....	37
2.3.2.2.2 ตัวตรวจจับแสงชนิด Avalanche Photo-Detector (APD).....	38
2.4 การออกแบบลายวงจรพิมพ์อัตราเร็วสูง	39
2.4.1 ชนิดของลายวงจรพิมพ์.....	39
2.4.2 ชนิดของสัญญาณอัตราเร็วสูง	40
2.4.2.1 สัญญาณแบบเดี่ยว (Single-Ended Signal)	40
2.4.2.2 สัญญาณแบบผลต่าง (Differential Signal).....	41
2.4.3 อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของลายวงจร	43
2.4.3.1 อิมพีแดนซ์ของสายส่งไมโครสตริปแบบเดี่ยว	43
2.4.3.2 อิมพีแดนซ์ของสายส่งไมโครสตริปแบบผลต่าง.....	44
บทที่ 3 การออกแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงพร้อมระบบควบคุมอุณหภูมิ.....	45
3.1 องค์ประกอบที่เลือกใช้.....	45
3.1.1 เลเซอร์ที่มีมอดูเลเตอร์ชนิดดูดกลืนคลื่นไฟฟ้าอยู่ภายใน (EML).....	46
3.1.2 วงจรจ่ายกระแสไบแอส (Bias Current Circuit)	47
3.1.3 ตัวขับมอดูเลเตอร์ชนิดดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า (EAM Driver)	48
3.2 การออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิ	49

3.2.1 องค์ประกอบที่เลือกใช้.....	49
3.2.1.1 เทอร์มิสเตอร์.....	49
3.2.1.2 วงจรตั้งค่าอุณหภูมิ.....	50
3.2.1.3 วงจรควบคุมพีไอดี.....	51
3.2.1.4 ตัวขับเคลื่อนกระแสสองขั้ว.....	52
3.2.1.5 TEC.....	53
3.2.2 การออกแบบวงจรควบคุมพีไอดี.....	53
3.2.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอุณหภูมิ.....	53
3.2.2.2 ฟังก์ชันการส่งผ่านของวงจรควบคุมพีไอดี.....	56
3.2.2.2.1 การปรับจูนค่าการควบคุมแบบสัดส่วน (K_p varying).....	58
3.2.2.2.2 การปรับจูนค่าการควบคุมแบบปริพันธ์ (K_i varying).....	61
3.2.2.2.3 การปรับจูนค่าการควบคุมอนุพันธ์ (K_d varying).....	64
3.2.2.3 การคำนวณองค์ประกอบของวงจรควบคุมพีไอดี.....	68
3.3 การออกแบบแผ่นวงจรพิมพ์อัตราเร็วสูง.....	71
3.3.1 วัสดุที่เลือกใช้ในการผลิตแผ่นวงจรพิมพ์.....	71
3.3.1.1 ตัวนำไฟฟ้า.....	71
3.3.1.2 ไดอิเล็กตริก.....	72
3.3.2 การคำนวณอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ.....	73
3.3.2.1 อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของเส้นสัญญาณไมโครสตริปแบบเดี่ยว.....	73
3.3.2.2 อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของเส้นสัญญาณไมโครสตริปแบบผลต่าง.....	75
3.4 การออกแบบลายวงจรของตัวส่งสัญญาณทางแสงต้นแบบ.....	77
3.4.1 ลายวงจรฐานยี่ด EML.....	79
3.4.2 ลายวงจรของวงจรรายกระแสไปแอสเลเซอร์.....	79

3.4.3	ลายวงจรของระบบควบคุมอุณหภูมิเลเซอร์.....	80
3.4.4	ลายวงจรตัวขับ EAM.....	81
3.4.4.1	S-parameter	83
3.4.4.2	TDR	85
3.4.4.3	Eye-diagram.....	87
บทที่ 4	การทดสอบประสิทธิภาพของตัวส่งสัญญาณทางแสงต้นแบบ	89
4.1	การทดสอบประสิทธิภาพของระบบควบคุมอุณหภูมิ.....	89
4.1.1	การวัดความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเทอร์มิสเตอร์กับความยาวคลื่นเลเซอร์.....	90
4.1.2	การตั้งค่าอุณหภูมิและความยาวคลื่น	91
4.1.3	การวัดความคลาดเคลื่อนของความยาวคลื่นเลเซอร์	92
4.2	การทดสอบระบบ DWDM 3 ช่องสัญญาณ.....	93
4.2.1	ภาคส่ง	93
4.2.1.1	ตัวส่งสัญญาณทางแสง.....	94
4.2.1.2	ตัวรวมสัญญาณทางแสง.....	94
4.2.2	ภาครับ	95
4.2.2.1	ตัวแยกสัญญาณทางแสง	95
4.2.2.2	ตัวรับสัญญาณทางแสง.....	97
บทที่ 5	ผลการทดสอบ	99
5.1	คุณลักษณะแต่ละองค์ประกอบของตัวส่งสัญญาณทางแสง	99
5.1.1	แหล่งกำเนิดสัญญาณทางแสง	99
5.1.1.1	สเปกตรัมของเลเซอร์.....	99
5.1.1.2	คุณลักษณะการเปล่งแสงของเลเซอร์	100
5.1.1.3	คุณลักษณะของมอดูเลเตอร์แบบดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า.....	101

5.1.2 ตัวขับมอดูเลเตอร์.....	103
5.2 คุณลักษณะของระบบควบคุมอุณหภูมิ.....	112
5.2.1 คุณลักษณะของเทอร์มิสเตอร์.....	112
5.2.2 คุณลักษณะแรงดันเทอร์มิสเตอร์กับความยาวคลื่นของเลเซอร์.....	113
5.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบควบคุมอุณหภูมิ.....	115
5.3.1 ผลการทดสอบการตั้งค่าอุณหภูมิและความยาวคลื่น.....	115
5.3.2 ผลการวัดความคลาดเคลื่อนของความยาวคลื่นเลเซอร์.....	116
5.4 ผลการทดสอบระบบ DWDM 3 ช่องสัญญาณ.....	118
5.4.1 สเปกตรัมของสัญญาณแสง.....	118
5.4.1.1 ภาคส่ง.....	118
5.4.1.2 ภาครับ.....	121
5.4.2 Interchannel Crosstalk.....	122
5.4.3 อัตราความผิดพลาดบิต.....	125
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	128
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	128
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	129
รายการอ้างอิง.....	131
ภาคผนวก.....	136
ภาคผนวก ก. บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่.....	137
ภาคผนวก ข. Schematic ของตัวส่งสัญญาณทางแสงต้นแบบ.....	157
ภาคผนวก ค. การอ้างอิงอุณหภูมิของเลเซอร์.....	159
ภาคผนวก ง. การวัดค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะด้วยเครื่อง TDR.....	160
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	162

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงค่าคงที่ A และ B ที่ใช้ในสมการ Vashni ของสารกึ่งตัวนำบางชนิด	21
ตารางที่ 2.2 วงจรควบคุมรูปแบบต่างๆ.....	26
ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างช่องสัญญาณตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1	30
ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์ค่า K_p , K_l และ K_D กับองค์ประกอบของวงจรีโอดี.....	57
ตารางที่ 3.2 ตำแหน่งของโพลเมื่อปรับค่า K_p	59
ตารางที่ 3.3 ตำแหน่งของโพลและซีโรเมื่อปรับค่า K_l	62
ตารางที่ 3.4 ตำแหน่งของโพลและซีโรเมื่อปรับค่า K_D กรณีระบบตอบสนองแบบหน่วงเกิน	65
ตารางที่ 3.5 ตำแหน่งของโพลและซีโรเมื่อปรับค่า K_D กรณีระบบตอบสนองแบบหน่วงขาด.....	67
ตารางที่ 3.6 ค่าคงที่ K_p , K_l และ K_D ที่คำนวณได้จากองค์ประกอบจริง	68
ตารางที่ 3.7 ค่าคงที่ K_p , K_l และ K_D ที่คำนวณได้จากองค์ประกอบจริง เมื่อเพิ่ม K_l เป็น 2	70
ตารางที่ 3.8 ค่าคงที่ไดอิล็กตริกกับค่า loss tangent ของสารไดอิล็กตริกต่างๆ	72
ตารางที่ 4.1 การกำหนดช่องสัญญาณให้กับตัวส่งสัญญาณทางแสง	89
ตารางที่ 4.2 รายละเอียดของสัญญาณ V_{SET} ที่ใช้ในการตั้งค่าอุณหภูมิและความยาวคลื่น.....	91
ตารางที่ 4.3 ค่า Insertion Loss ของช่องสัญญาณต่างๆ เมื่อผ่าน Tunable Filter	96
ตารางที่ 5.1 ผลการวัดพารามิเตอร์ต่างๆของสัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้า ณ ตำแหน่ง B	106
ตารางที่ 5.2 พารามิเตอร์ที่วัดจากแผนภาพรูปตาทางแสง ณ ตำแหน่ง C ในกรณีปรับ V_{BIAS}	108
ตารางที่ 5.3 พารามิเตอร์ของแผนภาพรูปตาที่วัดได้ในกรณีเปลี่ยน V_{MOD}	110
ตารางที่ 5.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเลเซอร์ในแต่ละช่องสัญญาณ.....	114
ตารางที่ 5.5 ผลการวัดค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดของความยาวคลื่นในแต่ละช่องสัญญาณ... 117	117
ตารางที่ 5.6 เปรียบเทียบสัญญาณ Crosstalk แผนภาพรูปตาบนระบบ DWDM	123
ตารางที่ 5.7 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของบิต 1 และ 0 จากแผนภาพรูปตา	123
ตารางที่ 5.8 การกำหนดช่องสัญญาณทางแสงในระบบ DWDM.....	126

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 การเชื่อมต่อระบบควบคุมอุณหภูมิกับตัวส่งสัญญาณทางแสง (TX)	2
รูปที่ 2.1 แผนภาพองค์ประกอบของตัวส่งสัญญาณทางแสงพร้อมระบบควบคุมอุณหภูมิ	7
รูปที่ 2.2 (บน) โครงสร้างและ (ล่าง) สเปกตรัมของเลเซอร์ชนิด Fabry-Perot	10
รูปที่ 2.3 (บน) โครงสร้าง และ (ล่าง) สเปกตรัมของเลเซอร์ชนิด DFB	12
รูปที่ 2.4 แผนภาพการเปล่งแสงของ VCSEL	13
รูปที่ 2.5 คุณลักษณะการเปล่งแสงของเลเซอร์	14
รูปที่ 2.6 การมอดูเลตแสงโดยตรง	15
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของเลเซอร์ชนิด EML	16
รูปที่ 2.8 คุณลักษณะการทำงานของ EAM.....	16
รูปที่ 2.9 โครงสร้างของมอดูเลเตอร์ชนิด Mach-Zendher	17
รูปที่ 2.10 คุณลักษณะการมอดูเลตตัวมอดูเลเตอร์ Mach-Zendher	18
รูปที่ 2.11 ผลของอุณหภูมิต่อกำลังแสงที่เปล่งออกมาจากเลเซอร์.....	20
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับความยาวคลื่นของเลเซอร์.....	21
รูปที่ 2.13 องค์ประกอบของระบบควบคุมอุณหภูมิภายในตัวส่งสัญญาณทางแสง	22
รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับอุณหภูมิของเทอร์มิสเตอร์.....	23
รูปที่ 2.15 หลักการทำงานของวงจรควบคุมพีไอดี	24
รูปที่ 2.16 (บน) โครงสร้างและ (ล่าง) แผนภาพการทำงานของ H-bridge	27
รูปที่ 2.17 คู่ต่อสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการดูดหรือคายความร้อน	28
รูปที่ 2.18 คู่ต่อ TEC	28
รูปที่ 2.19 แผนภาพการทำงานของระบบควบคุมแบบป้อนกลับในระบบควบคุมอุณหภูมิ.....	29
รูปที่ 2.20 แผนภาพการรับส่งข้อมูลแบบ WDM	31
รูปที่ 2.21 แหล่งกำเนิดแสง WDM แบบเลเซอร์ปรับความยาวคลื่นได้.....	32
รูปที่ 2.22 โครงสร้างของเลเซอร์หลายความยาวคลื่น	32
รูปที่ 2.23 โครงสร้างของ Optical Fiber Coupler	33
รูปที่ 2.24 โครงสร้างพื้นฐานของ AWG	34

รูปที่ 2.25 การรวมแสงแบบ March Zehnder.....	34
รูปที่ 2.26 หลักการทำงานของ FBG และ Optical Circulator	36
รูปที่ 2.27 กระบวนการแยกแสงด้วยตัวกรองแสงแบบปรับได้	37
รูปที่ 2.28 โครงสร้างของตัวตรวจจับแสงชนิด PIN และวงจรมอนิเตอร์แรงดันย้อนกลับ	38
รูปที่ 2.29 โครงสร้างของตัวตรวจจับแสงชนิด APD.....	38
รูปที่ 2.30 ภาพตัดขวางของสายส่งแต่ละชนิด	39
รูปที่ 2.31 ทิศทางของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าของสายส่งแบบไมโครสตริป	40
รูปที่ 2.32 แบบจำลองส่วนย่อยของสายส่ง.....	41
รูปที่ 2.33 การขับสัญญาณแบบผลต่าง	41
รูปที่ 2.34 ทิศทางของสนามไฟฟ้าของสัญญาณแบบผลต่าง	41
รูปที่ 2.35 แผนภาพรูปตาของสัญญาณ PRBS $2^{31}-1$ บิต อัตราข้อมูล 10 Gb/s	42
รูปที่ 2.36 สเปกตรัมของสัญญาณ PRBS $2^{31}-1$ บิต อัตราข้อมูล 10 Gb/s.....	42
รูปที่ 2.37 แบบจำลองการเชื่อมต่อเส้นสัญญาณกับแหล่งกำเนิดสัญญาณและโหลด	43
รูปที่ 2.38 ภาพตัดขวางของสายส่งชนิดไมโครสตริปแบบเดี่ยว.....	43
รูปที่ 2.39 ภาพตัดขวางของสายส่งชนิดไมโครสตริปแบบผลต่าง.....	44
รูปที่ 3.1 องค์ประกอบของตัวส่งสัญญาณทางแสงพร้อมระบบควบคุมอุณหภูมิ	45
รูปที่ 3.2 แหล่งกำเนิดแสงแบบ EML โมดูล E4560	46
รูปที่ 3.3 วงจรภายในของแหล่งกำเนิดแสงชนิด EML โมดูล E4560	46
รูปที่ 3.4 วงจรจ่ายกระแสไบแอสเลเซอร์ใช้ตัวคุมค่าแรงดันโมดูล LM-317.....	47
รูปที่ 3.5 แผนภาพวงจรภายในของชิป MAX3941.....	48
รูปที่ 3.6 องค์ประกอบของระบบควบคุมอุณหภูมิในตัวส่งสัญญาณทางแสงต้นแบบ	49
รูปที่ 3.7 การเชื่อมต่อเทอร์มิสเตอร์กับระบบควบคุมอุณหภูมิ	50
รูปที่ 3.8 วงจรตั้งค่าอุณหภูมิของระบบควบคุมอุณหภูมิ	50
รูปที่ 3.9 วงจร PID สำหรับควบคุมการจ่ายกระแส TEC จากชิป MAX8521	51
รูปที่ 3.10 แผนภาพวงจรภายในของตัวขับกระแสสองขั้วโมดูล MAX8521.....	52
รูปที่ 3.11 แผนภาพการเชื่อมต่อระบบอุณหภูมิของเลเซอร์.....	53

รูปที่ 3.12 แผนภาพการทดสอบการตอบสนองของระบบอนุภูมิของเลเซอร์	54
รูปที่ 3.13 แผนภาพการจำลองผลด้วยโปรแกรม Simulink	54
รูปที่ 3.14 เปรียบเทียบการตอบสนองของระบบอนุภูมิระหว่างผลการวัดกับการจำลอง.....	55
รูปที่ 3.15 แผนภาพการเชื่อมต่อวงจรพีไอดีกับระบบอนุภูมิของเลเซอร์	56
รูปที่ 3.16 วงจรควบคุมพีไอดีที่เลือกใช้	57
รูปที่ 3.17 แผนภาพการจำลองผลของวงจรพีไอดีด้วยโปรแกรม Simulink	58
รูปที่ 3.18 การตอบสนองของระบบอนุภูมิของเลเซอร์เมื่อปรับค่า K_p	59
รูปที่ 3.19 ทางเดินรากของระบบอนุภูมิเมื่อปรับค่า K_p	59
รูปที่ 3.20 การตอบสนองของระบบอนุภูมิเมื่อปรับค่า K_i	62
รูปที่ 3.21 ทางเดินรากของระบบอนุภูมิกรณี $K_i = 1, K_p = 5, K_D = 0$ และ loop gain = 1.....	63
รูปที่ 3.22 ทางเดินรากของระบบอนุภูมิกรณี $K_i = 10, K_p = 5, K_D = 0$ และ loop gain = 1.....	63
รูปที่ 3.23 การตอบสนองของระบบอนุภูมิเมื่อปรับค่า K_D กรณีระบบตอบสนองแบบหน่วงเกิน	65
รูปที่ 3.24 ทางเดินรากของระบบอนุภูมิกรณี $K_D = 0.01, K_p = 5$ และ $K_i = 0$	66
รูปที่ 3.25 การตอบสนองของระบบอนุภูมิเมื่อปรับค่า K_D กรณีระบบตอบสนองแบบหน่วงขาด	66
รูปที่ 3.26 ทางเดินรากของระบบอนุภูมิกรณี $K_D = 10, K_p = 200$, และ $K_i = 0$	67
รูปที่ 3.27 เปรียบเทียบการตอบสนองของระบบเมื่อกำหนดให้ K_i มีค่าเท่ากับ 1.....	69
รูปที่ 3.28 เปรียบเทียบการตอบสนองของระบบเมื่อกำหนดให้ K_i มีค่าเท่ากับ 2.....	70
รูปที่ 3.29 โครงสร้างของวงจรพิมพ์ประเภท 4 ชั้น	71
รูปที่ 3.30 แผ่นวงจรพิมพ์ของตัวส่งสัญญาณทางแสงต้นแบบ โดยมีความหนาตามมาตรฐาน XFP	73
รูปที่ 3.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Z_0 กับความกว้างของเส้นสัญญาณ (W)	74
รูปที่ 3.32 ภาพตัดขวางของเส้นสัญญาณไมโครสตริปแบบเดี่ยวที่ออกแบบ.....	74
รูปที่ 3.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Z_{DIFF} ของเส้นสัญญาณไมโครสตริปแบบผลต่างกับระยะห่างระหว่างขอบด้านในของเส้นสัญญาณ (S).....	75
รูปที่ 3.34 ภาพตัดขวางของเส้นสัญญาณไมโครสตริปแบบผลต่างที่ออกแบบ.....	76
รูปที่ 3.35 การเชื่อมต่อขององค์ประกอบภายในตัวสัญญาณทางแสงต้นแบบ	77
รูปที่ 3.36 ลายวงจรของตัวส่งสัญญาณทางแสงต้นแบบพร้อมระบบควบคุมอนุภูมิ.....	78

รูปที่ 3.37 ลายวงจรรูปร่างยึด EML	79
รูปที่ 3.38 ลายวงจรของวงจรถ่ายกระแสไปแอสเลเซอร์.....	79
รูปที่ 3.39 ลายวงจรของระบบควบคุมอุณหภูมิของเลเซอร์	80
รูปที่ 3.40 ลายวงจรถั่วซัป EAM	81
รูปที่ 3.41 เส้นสัญญาณไมโครสตริปแบบผลต่างที่ออกแบบ	82
รูปที่ 3.42 เส้นสัญญาณไมโครสตริปแบบเดี่ยวที่ออกแบบ	82
รูปที่ 3.43 เปรียบเทียบการสะท้อนของเส้นสัญญาณไมโครสตริปแบบผลต่าง (SD11).....	83
รูปที่ 3.44 เปรียบเทียบค่าการสะท้อนของเส้นสัญญาณไมโครสตริปแบบเดี่ยว (S11).....	84
รูปที่ 3.45 ผลการจำลองการส่งผ่านของเส้นสัญญาณไมโครสตริปแบบเดี่ยวและแบบผลต่าง	84
รูปที่ 3.46 การจำลองผล TDR ของลายเส้นไมโครสตริปแบบผลต่าง	85
รูปที่ 3.47 ผลการวัด TDR ของเส้นสัญญาณไมโครสตริปแบบผลต่าง	85
รูปที่ 3.48 การจำลองผล TDR ของลายเส้นไมโครสตริปแบบเดี่ยว	86
รูปที่ 3.49 ผลการวัด TDR ของเส้นสัญญาณไมโครสตริปแบบเดี่ยว	86
รูปที่ 3.50 แผนภาพรูปตาของสัญญาณข้อมูลในการจำลองผล.....	87
รูปที่ 3.51 แผนภาพรูปตาของสัญญาณออกจากเส้นสัญญาณไมโครสตริปแบบผลต่าง	88
รูปที่ 3.52 แผนภาพรูปตาของสัญญาณออกจากเส้นสัญญาณไมโครสตริปแบบเดี่ยว	88
รูปที่ 4.1 การวัดความสัมพันธ์ของแรงดันเทอร์มิสเตอร์กับความยาวคลื่นเลเซอร์.....	90
รูปที่ 4.2 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเทอร์มิสเตอร์กับความยาวคลื่น.....	91
รูปที่ 4.3 แผนภาพการทดสอบการตั้งค่าอุณหภูมิและความยาวคลื่น.....	91
รูปที่ 4.4 แผนภาพการวัดความคลาดเคลื่อนความยาวคลื่นของเลเซอร์	92
รูปที่ 4.5 การเชื่อมต่อระบบเพื่อทดสอบการรับส่งข้อมูลบนระบบ DWDM	93
รูปที่ 4.6 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการรับส่งข้อมูลบนระบบ DWDM	94
รูปที่ 4.7 ตัวกรองสัญญาณทางแสงแบบปรับได้โมดูล mTVF-A1 โมเดล G ของบริษัท JDSU.....	95
รูปที่ 4.8 หลักการทำงานของ Tunable Filter.....	96
รูปที่ 4.9 คุณลักษณะการแยกแสงของ Tunable Filter.....	96
รูปที่ 4.10 รูปตัวรับสัญญาณทางแสงที่ใช้ตัวตรวจจับแสงชนิด APD	97

รูปที่ 4.11 วงจรภายในของตัวตรวจจับแสงชนิด APD โมดูล R197A 98

รูปที่ 5.1 สเปกตรัมของเลเซอร์ชนิด DFB ที่อยู่ในเลเซอร์ EML โมดูล E4560 100

รูปที่ 5.2 คุณลักษณะการเปล่งแสงของเลเซอร์ชนิด DFB ที่อยู่ใน EML 101

รูปที่ 5.3 คุณลักษณะของ EAM ในเลเซอร์ EML โมดูล E4560 ในหน่วย dBm 102

รูปที่ 5.4 คุณลักษณะของ EAM ในเลเซอร์ EML โมดูล E4560 ในหน่วย mW 102

รูปที่ 5.5 การวัดแผนภาพรูปตาของสัญญาณไฟฟ้าและสัญญาณแสงของตัวขับ EAM 103

รูปที่ 5.6 สัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้าจากเครื่อง BERT ณ ตำแหน่ง A 104

รูปที่ 5.7 สัญญาณนาฬิกาจากเครื่อง BERT ณ ตำแหน่ง A 104

รูปที่ 5.8 สัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้าขาออกจากชิป MAX3941 ณ ตำแหน่ง B 105

รูปที่ 5.9 แผนภาพรูปตาทางแสงเมื่อปรับค่า V_{BIAS} ของตัวขับมอดูเลเตอร์ 107

รูปที่ 5.10 ระดับสัญญาณแสงเมื่อปรับค่า V_{BIAS} 108

รูปที่ 5.11 แผนภาพรูปตาทางแสงเมื่อปรับค่า V_{MOD} ของตัวขับมอดูเลเตอร์ 109

รูปที่ 5.12 ระดับสัญญาณแสงเมื่อปรับค่า V_{MOD} 110

รูปที่ 5.13 แผนภาพรูปตาของสัญญาณขาออกของตัวส่งสัญญาณทางแสงต้นแบบ 10 Gb/s .. 111

รูปที่ 5.14 คุณลักษณะของเทอร์มิสเตอร์ขนาด 10 kΩ ที่อยู่ในเลเซอร์ EML โมดูล E4560 112

รูปที่ 5.15 วงจรควบคุมพีไอดีภายในบอร์ด MAX8521EVKIT จากบริษัท MAXIM 113

รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_{THERM} กับ λ ทั้ง 3 ช่องสัญญาณของวงจรีพีไอดีที่ออกแบบ ... 114

รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_{THERM} กับ λ ทั้ง 3 ช่องสัญญาณของวงจรีพีไอดีจากบริษัท
MAXIM 114

รูปที่ 5.18 ผลการตอบสนองของการตั้งค่าอุณหภูมิและความยาวคลื่น 115

รูปที่ 5.19 เสถียรภาพของความยาวคลื่นในแต่ละช่องสัญญาณ 116

รูปที่ 5.20 สเปกตรัมของเลเซอร์ขณะไม่มีการมอดูเลตข้อมูล ที่ตำแหน่ง A 119

รูปที่ 5.21 สเปกตรัมของเลเซอร์เมื่อมีการมอดูเลตข้อมูล ที่ตำแหน่ง A 119

รูปที่ 5.22 สเปกตรัมของ 3 ช่องสัญญาณที่ตำแหน่ง B ของสัญญาณระยะห่าง 25 GHz 120

รูปที่ 5.23 สเปกตรัมของ 3 ช่องสัญญาณที่ตำแหน่ง B ของสัญญาณระยะห่าง 50 GHz 120

รูปที่ 5.24 สเปกตรัมที่ตำแหน่ง C ของระบบ 25 GHz DWDM ที่ P_{AVG} -16 dBm 121

รูปที่ 5.25 สเปกตรัมที่ตำแหน่ง C ของระบบ 50 GHz DWDM ที่ $P_{AVG} = -16$ dBm 121

รูปที่ 5.26 การวัดสัญญาณ Interchannel Crosstalk..... 122

รูปที่ 5.27 การเชื่อมต่ออุปกรณ์เพื่อวัดอัตราบิดผิดพลาดในระบบ DWDM..... 126

รูปที่ 5.28 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดบิตกับกำลังแสงเฉลี่ยขาเข้า APD ทั้ง 3 กรณี
..... 127

รูปที่ 6.1 วงจรที่เหมาะสมสำหรับวงจรควบคุมกระแสไบแอสให้กับเลเซอร์..... 130

ดัชนีคำศัพท์

Absorption	กระบวนการดูดกลืน
Attenuation	การลดทอน
Automatic Power Control (APC)	การควบคุมกำลังแสงแบบอัตโนมัติ
Avalanche Effect	ปรากฏการณ์ถล่ม
Bias Current Circuit	วงจรจ่ายกระแสไบแอส
Bipolar Current Driver	ตัวขับกระแสสองขั้ว
Bit Error Rate (BER)	อัตราความผิดพลาดบิต
Cavity	โพรง
Channel Spacing	ระยะห่างช่องสัญญาณ
Chromatic Dispersion	การกระจายโครมาติก
Close Loop	วงรอบปิด
Coherent Light	แสงอาพันธ์
Conduction Band	ชั้นนำไฟฟ้า
Confinement Layer	ชั้นกักแสง
Conventional band (C-band)	ความยาวคลื่นแถบกลาง
De-Multiplexer	ตัวแยกสัญญาณทางแสง
Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM	การรวมแสงหลายความยาวคลื่นแบบหนาแน่น
Depletion Region	บริเวณปลอดประจุ
Dielectric	ไดอิเล็กตริก
Differential Amplifier Circuit	วงจรรขยายแบบผลต่าง
Differential Pair	สายส่งแบบคู่ต่าง
Differential Signal	สัญญาณแบบผลต่าง
Direct Modulation	การมอดูเลตแสงโดยตรง
Distributed Feedback Laser, DFB	เลเซอร์ชนิดป้อนกลับแบบกระจายตัว
Dominant Pole, DP	โพลเด่นชัด
Edge Emitting LED, ELED	ไดโอดเปล่งแสงจากขอบ
Electro Spectrum Analyzer, ESA	เครื่องมือสเปกตรัมทางไฟฟ้า
Electro-Absorption Modulation, EAM	การมอดูเลตด้วยวิธีดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า

Electro-Absorption Modulator Integrated Laser, EML	ตัวส่งสัญญาณทางแสงที่มีมอดูเลเตอร์ชนิดดูดกลืนคลื่นไฟฟ้าอยู่ใน
Electron-Hole Pair	คู่อิเล็กตรอนและโฮล
External Modulation	การมอดูเลตภายนอก
Final Value Theorem	ทฤษฎีบทค่าสุดท้าย
Forward Bias Current	กระแสไบแอสไปข้างหน้า
Forward Bias Voltage	แรงดันไบแอสไปข้างหน้า
Grating Array Waveguides	ท่อนำแสงแบบแถวลำดับเกรตติ้ง
Guard Ring	วงแหวนป้องกัน
Incoherent Light	แสงแบบอนาพันธ์
Interchannel Crosstalk	การรบกวนกันระหว่างช่องสัญญาณ
Laser Driver	ตัวขับเลเซอร์
Light Source	แหล่งกำเนิดแสง
Light-Emitting Diode, LED	ไดโอดเปล่งแสง
Long band, L-band	ความยาวคลื่นแถบยาว
Long-Haul System	ระบบระยะทางไกล
Loop Gain	อัตราขยายวงรอบ
Modulator Driver	ตัวขับมอดูเลเตอร์
Multi Wavelength Laser Array	เลเซอร์หลายความยาวคลื่น
Multiplexer	ตัวรวมสัญญาณทางแสง
Open Loop	วงรอบเปิด
Optical De-Multiplexer	ตัวแยกแสง
Optical Fiber Communication	การสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง
Optical Fiber Coupler	ตัวคู่ต่อทางแสง
Optical Modulator	มอดูเลเตอร์ทางแสง
Optical Multiplexer, MUX	ตัวรวมแสง
Optical Power Monitor	ตัววัดกำลังทางแสง
Optical Spectrum Analyzer, OSA	เครื่องวัดมีสเปกตรัมทางแสง
Optical Waveguide	ท่อนำแสง
Overdamp Response	ผลการตอบสนองแบบหน่วงเกิน

Overshoot	สัญญาณพุ่งเกิน
Phase Shift	ผลต่างเฟส
Photo Current	กระแสแสง
Photodetector	ตัวตรวจจับแสง
PID Control Circuit	วงจรควบคุมพีไอดี
Polarization Maintaining Fiber, PMF	เส้นใยนำแสงที่มีการควบคุมโพลาไรซ์
Population Inversion	ภาวะผกผันของประชากร
Printed Circuit Board, PCB	ลายวงจรบนแผ่นวงจรพิมพ์
Resonant	กำทอน
Reverse Voltage	แรงดันย้อนกลับ
Second Order System	ระบบอันดับสอง
Short band, S-band	ความยาวคลื่นแถบสั้น
Single-Ended Signal	สัญญาณแบบเดี่ยว
Single-Longitudinal Mode, SLM	แสงแบบโหมดเดี่ยว
Spontaneous Emission	การเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง
Steady State Response	ผลตอบสนองในสถานะคงตัว
Stimulated Emission	การเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น
Surface Emitting LED, SLED	ไดโอดเปล่งแสงจากผิวหน้า
Temperature Control System, TCS	ระบบควบคุมอุณหภูมิ
Temperature Setting	การตั้งค่าอุณหภูมิ
Thermistor	เทอร์มิสเตอร์
Thermo Electric Cooler, TEC	ตัวระบายความร้อน
Threshold Current	กระแสขีดเริ่ม
Time-Division Multiplexing, TDM	การรวมสัญญาณแบบแบ่งเวลา
Transfer Function	ฟังก์ชันการส่งผ่าน
Transient Response	ผลตอบสนองในสถานะชั่วขณะ
Trimpot	ตัวต้านทานปรับค่าได้
Tunable Filter	ตัวกรองแสงแบบปรับได้
Tuning	ปรับเปลี่ยน
Underdamp Response	ผลการตอบสนองแบบหน่วงขาด

Valence Band

Voltage Regulator

Wavelength Tunable Laser

ชั้นวาเลนซ์

ตัวคุมค่าแรงดัน

เลเซอร์ปรับความยาวคลื่นได้