

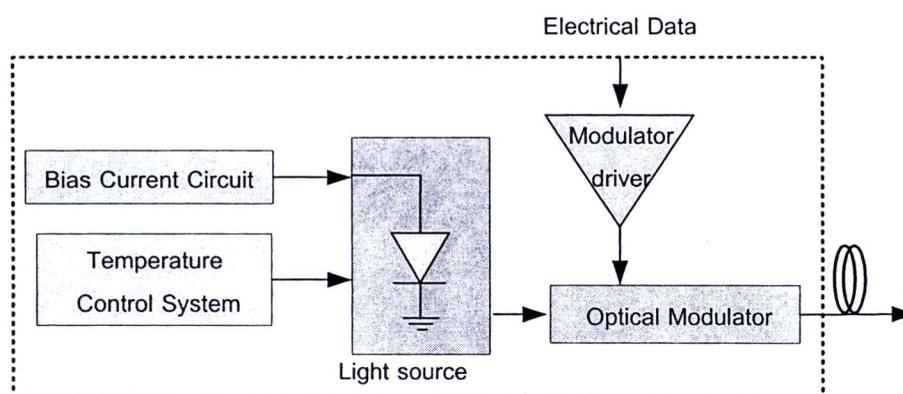
บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกี่ยวข้องกับการออกแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงต้นแบบอัตราข้อมูล 10 Gb/s พร้อมระบบควบคุมอุณหภูมิ เพื่อนำมาใช้ในการส่งข้อมูลแบบ DWDM ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาองค์ประกอบของตัวส่งสัญญาณทางแสงพร้อมระบบควบคุมอุณหภูมิ และการควบคุมความยาวคลื่นและเสถียรภาพของอุณหภูมิ ในหัวข้อที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ จากนั้นในหัวข้อที่ 2.3 จะเป็นรายละเอียดของการรับส่งข้อมูลแบบ DWDM และในหัวข้อที่ 2.4 จะศึกษาหลักการออกแบบลายวงจรพิมพ์อัตราเร็วสูง

2.1 องค์ประกอบของตัวส่งสัญญาณทางแสงพร้อมระบบควบคุมอุณหภูมิ

ตัวส่งสัญญาณทางแสงมีองค์ประกอบที่สำคัญ 5 ส่วน แสดงแผนภาพดังรูปที่ 2.1 คือ (1) แหล่งกำเนิดแสง (Light Source) ทำหน้าที่สร้างสัญญาณแสงแบบต่อเนื่อง (Continuous Wave, CW), (2) วงจรจ่ายกระแสไบแอส (Bias Current Circuit) ทำหน้าที่จ่ายกระแสไบแอส เพื่อควบคุมกำลังแสงของเลเซอร์, (3) ตัวมอดูเลเตอร์ทางแสง (Optical Modulator) ทำหน้าที่มอดูเลตข้อมูลทางไฟฟ้าเป็นข้อมูลทางแสง [17-18], (4) ตัวขับมอดูเลเตอร์ (Modulator Driver) ทำหน้าที่เพิ่มขนาดของสัญญาณข้อมูลให้มีความเหมาะสมก่อนนำข้อมูลดังกล่าวไปมอดูเลตเป็นข้อมูลทางแสง [19] , และ (5) ระบบควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Control System) ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของเลเซอร์เพื่อให้เลเซอร์สามารถเปล่งแสงได้อย่างมีเสถียรภาพ โดยแต่ละองค์ประกอบมีรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.1.1 ถึง 2.1.5 ตามลำดับ



รูปที่ 2.1 แผนภาพองค์ประกอบของตัวส่งสัญญาณทางแสงพร้อมระบบควบคุมอุณหภูมิ

2.1.1 แหล่งกำเนิดแสง (Light Source)

ในปัจจุบันแหล่งกำเนิดแสงที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อการสื่อสาร เป็นอุปกรณ์ที่ผลิตจากสารกึ่งตัวนำซึ่งสามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภท คือ ไดโอดเปล่งแสง (Light-Emitting Diode, LED) และเลเซอร์ (Laser) โดยมีรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.1.1.1 และ 2.1.1.2 ตามลำดับ

2.1.1.1 ไดโอดเปล่งแสง (Light-Emitting Diode, LED)

LED มีโครงสร้างโดยทั่วไปเป็นแบบรอยต่อระหว่างพีและเอ็น (p-n junction) เมื่อทำการจ่ายแรงดันไบแอสไปข้างหน้า ที่บริเวณ active region จะมีการฉีดอิเล็กตรอนเข้าไปยังสารกึ่งตัวนำด้านพีบนชั้นนำไฟฟ้า (conduction band) และในขณะเดียวกันที่ชั้นวาเลนซ์ (valence band) จะมีการฉีดโฮลเข้าไปยังสารกึ่งตัวนำด้านเอ็น เมื่ออิเล็กตรอนและโฮลเดินทางผ่านบริเวณรอยต่อจะเกิดการรวมตัวกันและปลดปล่อยโฟตอนที่มีความยาวเท่ากับแบนด์แกป (bandgap) ออกมา เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง (Spontaneous Emission) ซึ่งเป็นแสงแบบอนาพันธ์ (Incoherent Light) เพราะโฟตอนที่ปล่อยออกมามีเฟสแบบสุ่มและกระจายรอบทิศทาง จึงทำให้สเปกตรัมของ LED มีขนาดกว้างมาก (50 ถึง 60 nm) และกำลังแสงค่อนข้างต่ำ แต่ในปัจจุบันก็มีการพัฒนาประสิทธิภาพของ LED โดยการใช้โครงสร้างแบบ double hetero junction เข้ามาช่วยเพิ่มกำลังแสง นอกจากนั้นการนำ LEDs มาใช้สื่อสารข้อมูล มักนำมาใช้กับการมอดูเลตข้อมูลโดยตรง ซึ่งมีอัตราเร็วในการมอดูเลตอยู่ในระดับ 200-300 Mb/s

LED ที่นำมาใช้งานในการสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง มี 2 ชนิด [20] คือ ไดโอดเปล่งแสงจากขอบ (Edge Emitting LED, ELED) ซึ่งให้แสงด้านข้างของสารกึ่งตัวนำ หรือในแนวตั้งฉากกับ active region และไดโอดเปล่งแสงจากผิวหน้า (Surface Emitting LED, SLED) ซึ่งให้แสงออกทางด้านบนผิวหน้า หรือในแนวเดียวกับบริเวณรอยต่อซึ่ง LED ชนิดนี้ให้สเปกตรัมกว้างกว่าชนิดแรกเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม LED มีข้อได้เปรียบในเรื่องต้นทุนการผลิตที่ถูกลง และมีความซับซ้อนทางวงจรใช้งานร่วน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเลเซอร์ เช่น ไม่ต้องมีการควบคุมอุณหภูมิหรือวงจรเพื่อขับเคลื่อน ดังนั้นรวมทั้งมีอายุการใช้งานที่ยาวกว่า แต่เนื่องจากระดับกำลังที่ค่อนข้างต่ำรวมทั้งสเปกตรัมที่กว้าง จึงทำให้ LED เหมาะกับการสื่อสารระยะใกล้บนเส้นใยนำแสงแบบหลายโหมด

2.1.1.2 เลเซอร์ (Laser)

เลเซอร์ผลิตมาจากสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิดซึ่งมี bandgap แตกต่างกันมาต่อกัน เป็นโครงสร้างแบบ "Hetero Junction" [20] โดยสารกึ่งตัวนำด้านหนึ่งจะถูกนำมา เจือสารประเภทพี ส่วนอีกด้านหนึ่งจะเจือด้วยสารประเภทเอ็น โดยที่สารกึ่งตัวนำทั้งสอง ต้องเป็นสารประเภท direct bandgap เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเปล่งแสง เมื่อ ประกบสารกึ่งตัวนำทั้งสองเข้าด้วยกันจะเกิดบริเวณ active region ซึ่งเป็นบริเวณ สำหรับเปล่งแสง

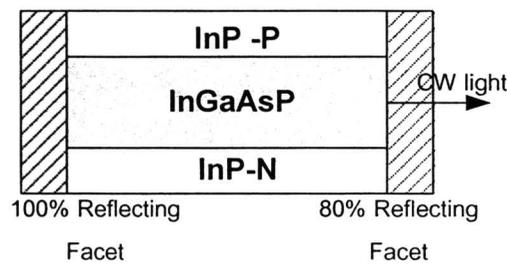
เลเซอร์มีหลักการทำงานทั้งหมด 3 กระบวนการ คือ (1) กระบวนการดูดกลืน (Absorption) เป็นกระบวนการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากชั้นวาเลนซ์ไปยังชั้นนำไฟฟ้า, (2) การเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง (Spontaneous Emission) เนื่องจากอิเล็กตรอนขึ้นมาอยู่ ในระดับพลังงานที่สูงกว่าจากกระบวนการแรก ซึ่งมีความไม่เสถียรจึงตกกลับลงมายัง ชั้นวาเลนซ์ ในขณะที่ตกกลับลงมาจะรวมตัวกับโฮลเกิดเป็นโฟตอน ซึ่งเป็นการ เปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง, และ (3) การเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น (Stimulated Emission) เมื่อมีการจ่ายกระแสไบแอสไปข้างหน้า (I_{BIAS}) ให้กับเลเซอร์เพื่อกระตุ้นให้มีการดูดกลืน มากขึ้น เมื่อเพิ่มขนาด I_{BIAS} ให้มีค่ามากกว่าระดับกระแสขีดเริ่ม (Threshold Current, I_{TH}) จะทำให้เกิดภาวะผกผันของประชากร (Population Inversion) ขึ้นที่บริเวณ active region จากนั้น เมื่อมีโฟตอน ผ่านเข้ามายังบริเวณ active region โฟตอนดังกล่าวจะ เห็นยวนาให้เกิดการรวมตัวกันของคู่อิเล็กตรอนและโฮลแล้วปลดปล่อยโฟตอนที่มี คุณสมบัติ (1) เฟส, (2) พลังงาน, และ (3) ทิศทางเดียวกัน เรียกโฟตอนที่มีคุณสมบัติ เหล่านี้ว่า แสงอาพันธ์ (Coherent Light)

เนื่องจากเลเซอร์มีโครงสร้างแบบโพรง (Cavity) และมีฟาเซต (Facet) 2 ด้านซึ่ง ทำหน้าที่เพิ่มความเข้มแสง โดยด้านหนึ่งจะเป็นฟาเซตที่สะท้อนแสงได้ 100 % ส่วนอีก ด้านหนึ่งจะสะท้อนแสงได้บางส่วน ดังนั้นแสงที่เกิดขึ้นเดินทางอยู่ภายใน cavity จะมี อัตราขยายในการเปล่งแสงมากขึ้น จนกระทั่งมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับอัตราการดูดกลืน แล้ว แสงก็จะสามารถเดินทางทะลุออกมาจาก cavity ได้ซึ่งเรียกแสงชนิดนี้ว่า แสง เลเซอร์

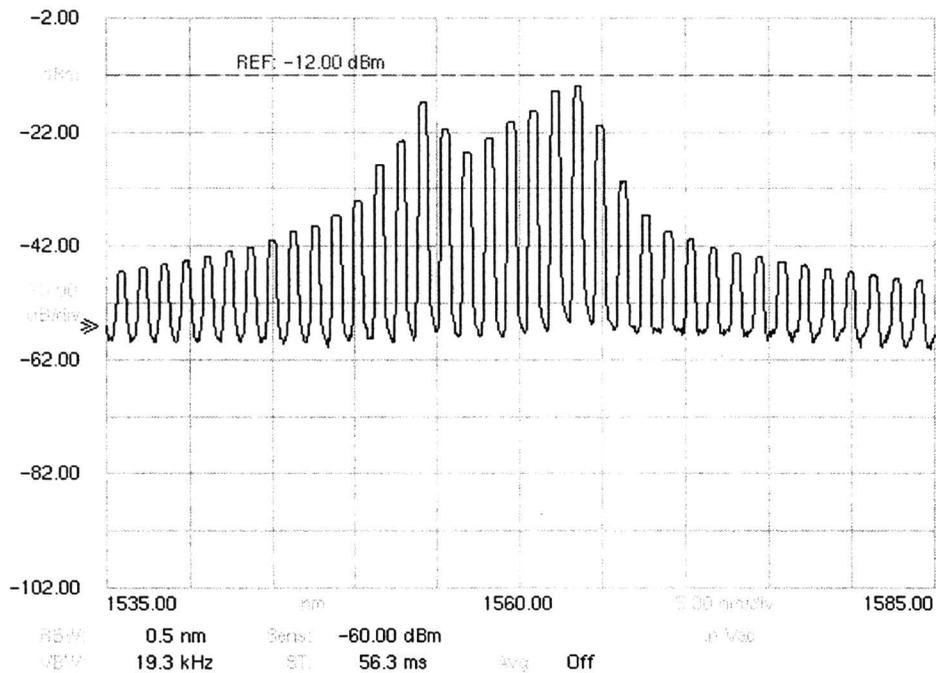
เลเซอร์ที่นำมาใช้งานในการสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงสามารถจำแนกได้เป็น 3 ชนิด คือ (1) Fabry-Perot Laser (FP laser), (2) Distributed-Feedback Laser (DFB laser), และ (3) Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser (VCSEL) โดยมีรายละเอียด ในหัวข้อที่ 2.1.1.2.1 ถึง 2.1.1.2.3 ตามลำดับ

2.1.1.2.1 Fabry-Perot Laser (FP laser)

โครงสร้างของเลเซอร์ชนิด FP ที่ใช้งานส่วนมากมีโครงสร้างเป็นแบบ double hetero junction โดยมีชั้น active layer เป็นสารประกอบ InGaAsP ประกบบน-ล่างด้วยชั้นกักแสง (Confinement Layer) ซึ่งทำมาจากสาร InP และประกบซ้าย-ขวาด้วยสารเคลือบผิวที่มีคุณสมบัติการสะท้อนแสงดังรูปที่ 2.2 (บน) โดยมีความยาวคลื่นในการเปล่งแสง 1.3 um และ 1.5 um มีสเปกตรัมแสดงดังรูปที่ 2.2 (ล่าง) ซึ่งสามารถกำหนดได้จากสัดส่วน x และ y ในสารประกอบ $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ ส่วนความยาวคลื่น 0.85 um นั้นส่วนใหญ่เลือกใช้สารประกอบ GaAs เป็น active region ประกบบน-ล่างด้วยชั้นพีและเอ็นซึ่งเป็นสารประกอบ AlGaAs [19]



FP Source Test (TrA)	Mode Spacing	1.3 nm	Total Signalize	-13.99 dBm
Mode Wavelength	Mode Spacing	166 GHz	Total Power	-8.07 dBm
Peak Wavelength	FWHM	9.60 nm	Signal	4.07 nm



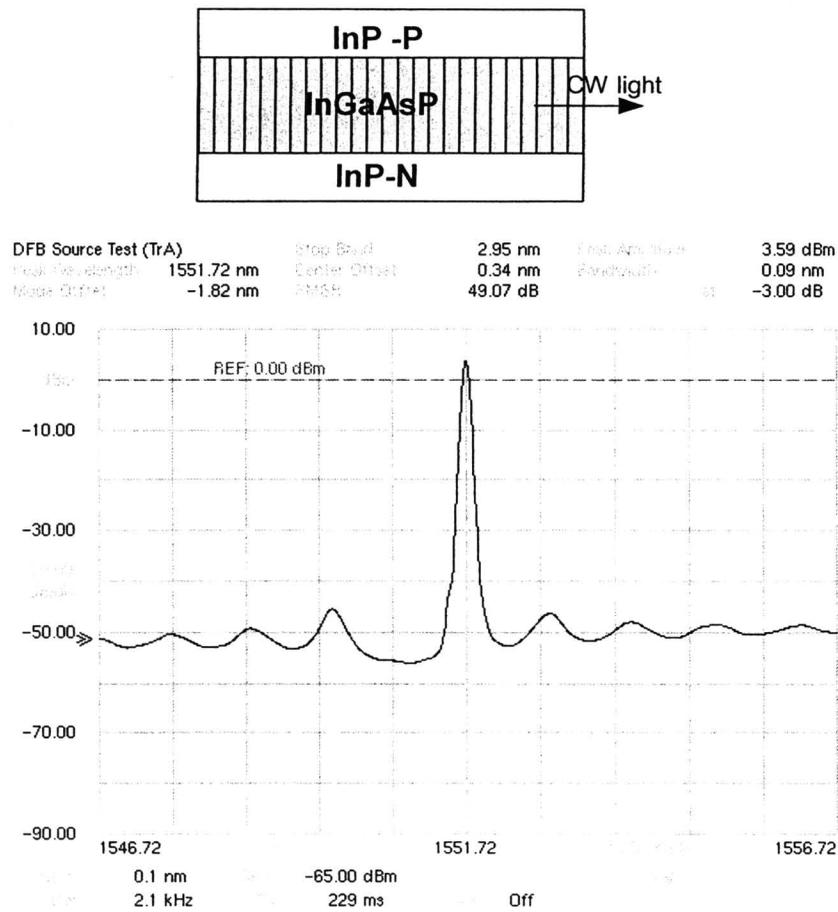
รูปที่ 2.2 (บน) โครงสร้างและ (ล่าง) สเปกตรัมของเลเซอร์ชนิด Fabry-Perot

เนื่องจากเลเซอร์ชนิด FP มีหลักการทำงานในการสะท้อนระหว่างฟาเซตทั้งสองด้าน จึงทำให้เกิดกำทอนของแสง (Resonant) หลายโหมดการทำงาน ส่งผลให้สเปกตรัมมีลักษณะเป็นยอดๆแสดงดังรูปที่ 2.2 (ล่าง) ดังนั้น FP จึงจัดอยู่ในเลเซอร์ประเภทหลายโหมด (Multimode-Longitudinal Mode, MLM) ซึ่งมีสเปกตรัมขนาดกว้างประมาณ 3 nm ดังนั้นมักจะนำเลเซอร์ชนิด FP มาใช้งานในการสื่อสารข้อมูลระยะทางไม่ไกลมากบนเส้นใยนำแสงโหมดเดียว

เลเซอร์ชนิด FP ส่วนใหญ่เป็นแบบ uncooled laser คือ ทำงานได้โดยไม่ต้องมีการควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งสามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิสูงสุดถึง 85 °C ซึ่งเหมาะกับระบบที่มีต้นทุนจำกัดและไม่สนใจเสถียรภาพของความยาวคลื่นมากนัก เช่น อุปกรณ์ Optical Network Unit (ONU) ในระบบ Fiber To The Home (FTTH) เป็นต้น

2.1.1.2.2 Distributed-Feedback Laser (DFB laser)

เลเซอร์ชนิด DFB มีโครงสร้างคล้ายกับเลเซอร์ชนิด FP แต่บริเวณ active region ภายในช่อง cavity มีโครงสร้างเกรตติง (Grating) ที่มีลักษณะเป็นระนาบลูกฟูกของดัชนีหักเหสูงต่ำอยู่ภายในเพิ่มเข้ามาแสดงดังรูปที่ 2.3 (บน) ทำหน้าที่สะท้อนแสงแทนฟาเซตที่อยู่ในเลเซอร์ชนิด FP โครงสร้างดังกล่าวมีหน้าที่เลือกความยาวคลื่นที่มีความสอดคล้องกับคาบของระนาบลูกฟูก ตามหลักการทำงานของตัวสะท้อนแบรกก (Bragg Phase-Grating Reflector) [20] โดยที่แสงความยาวคลื่นนั้นจะสะท้อนไปมาระหว่างลูกฟูก จนทำให้แสงที่เปล่งออกมา มีลักษณะเป็นแสงแบบโหมดเดียว (Single-Longitudinal Mode, SLM) มีสเปกตรัมค่อนข้างแคบ 0.09 um แสดงดังรูปที่ 2.3 (ล่าง)

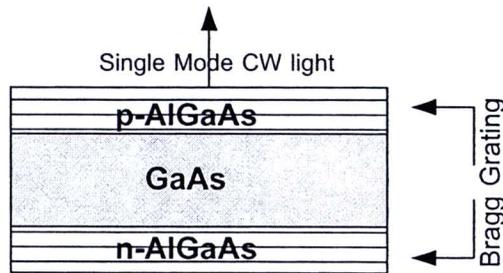


รูปที่ 2.3 (บน) โครงสร้าง และ (ล่าง) สเปกตรัมของเลเซอร์ชนิด DFB

เนื่องจากเลเซอร์ชนิด DFB มีสเปกตรัมแคบ จึงทำให้เหมาะกับการนำมาใช้ส่งแสงหลายความยาวคลื่นหรือบนระบบ WDM นอกจากนี้มักจะนำเลเซอร์ชนิดนี้มาใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงแบบต่อเนื่อง เพื่อใช้งานร่วมกับมอดูเลเตอร์ทางแสงทั้งแบบภายนอกและแบบภายใน เช่น Mach Zehnder Modulator (MZM) หรือ Electro-Absorption Modulator (EAM) เป็นต้น อย่างไรก็ตามแสงที่เปล่งออกมาจากเลเซอร์ที่ผลิตจากสารกึ่งตัวนำนั้น มีความยาวคลื่นไวต่อการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของสารกึ่งตัวนำ เช่น เลเซอร์ชนิด DFB มีความยาวคลื่นแปรผันตามอุณหภูมิประมาณ $0.1 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ ดังนั้นในการส่งข้อมูลระบบ DWDM ด้วยระยะห่างช่องสัญญาณ 0.8 nm (100 GHz grid) หรือแคบกว่า จึงต้องมีการควบคุมอุณหภูมิของเลเซอร์อย่างแม่นยำ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการรบกวนกันระหว่างช่องสัญญาณ (Interchannel Crosstalk) โดยส่วนใหญ่แล้วเลเซอร์ชนิด DFB จะทำงานร่วมกับระบบระบายความร้อน โดยเลเซอร์จะถูกวางไว้บน TEC ซึ่งถูกควบคุมด้วยระบบป้อนกลับร่วมกับเทอร์มิสเตอร์ เพื่อที่จะรักษาเสถียรภาพของอุณหภูมิให้กับเลเซอร์ เรียกเลเซอร์ประเภทนี้ว่า cooled laser ส่วนรายละเอียดของการควบคุมอุณหภูมิจะกล่าวในหัวข้อที่ 2.2

2.1.1.2.3 Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser (VCSEL)

VCSEL เป็นเลเซอร์ที่เปล่งแสงในแนวตั้งฉากกับตัวเลเซอร์ ในขณะที่เลเซอร์ชนิด FP และ DFB เปล่งแสงในแนวขนานกับตัวเลเซอร์ โครงสร้างของ VCSEL แสดงดังรูปที่ 2.4 ประกอบด้วย gain medium ซึ่งอยู่ในแนวตั้งและเป็น cavity ที่มีขนาดค่อนข้างสั้น (ประมาณ 1 μm) ดังนั้น Bragg mirror ที่นำมาใช้งานเพื่อเป็นตัวเลือกความยาวคลื่นต้องเป็นกระจกที่มีความสามารถในการสะท้อนสูง ทำให้แสงที่เปล่งออกมามีสเปกตรัมแบบโหมดเดียว แต่เนื่องจาก cavity ของ VCSEL ยังขึ้นอยู่กับขนาดในแนวขนานจึงทำให้มีสเปกตรัมในโหมดตามแนวขวางเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้มีสเปกตรัมกว้างกว่าเลเซอร์ชนิด DFB โดยมีขนาดประมาณ 1 nm



รูปที่ 2.4 แผนภาพการเปล่งแสงของ VCSEL

เนื่องจากโครงสร้างของ VCSEL มีขนาดเล็ก ทำให้มีการนำ VCSEL หลายๆตัวมาผลิตลงบน substrate เดียวกัน จึงเป็นที่สนใจในการนำแหล่งกำเนิดแสงดังกล่าวมาใช้ในระบบ WDM ในปัจจุบัน VCSEL มีการผลิตมาใช้งานในช่วงความยาวคลื่น 0.85 μm ส่วนความยาวคลื่น 1.3 และ 1.5 μm ยังอยู่ในกระบวนการพัฒนา โดยส่วนใหญ่แล้วมักจะนำ VCSEL ไปใช้ในระบบสื่อสารระยะใกล้ร่วมกับเส้นใยนำแสงชนิดหลายโหมด

2.1.2 วงจรจ่ายกระแสไบแอส (Bias Current Circuit)

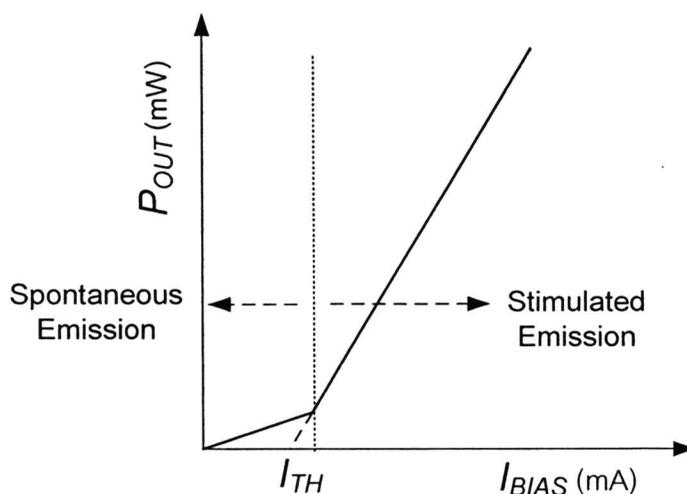
ลักษณะการเปล่งแสงของเลเซอร์สามารถอธิบายได้จากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไบแอส (I_{BIAS}) หรือแรงดันไบแอสไปข้างหน้า (Forward Bias Voltage, V_F) กับกำลังแสงของเลเซอร์ที่เปล่งออกมาแสดงดังรูปที่ 2.5 เมื่อเริ่มจ่ายกระแสให้กับเลเซอร์จะมีการเปล่งแสงเกิดขึ้น แต่แสงดังกล่าวมีกำลังต่ำ เนื่องจากเป็นแสงแบบอนาพันธ์ (Incoherent Light) และเมื่อจ่ายกระแสจนถึงระดับขีดเริ่ม I_{TH} แสงจะมีกำลังเพียงพอซึ่งมีอัตราขยายมากกว่าอัตราการสูญเสีย ตามหลักการการเปล่งแสงเลเซอร์ที่ได้กล่าวไปในหัวข้อที่ 2.1.1.2 เมื่อจ่ายกระแสไบแอสมากกว่ากระแสขีดเริ่ม จะทำให้กำลังแสงที่เปล่งออกมามีขนาดแปรผันตรงกับกระแสไบแอสที่ป้อนเข้าไป ดังนั้นเพื่อให้เลเซอร์เปล่งแสงได้คงที่ตลอดเวลา เลเซอร์จึงจำเป็นต้องมีวงจรสำหรับจ่ายกระแสเพื่อ

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่..... 22 ส.ค. 2555

เลขทะเบียน..... 246153

เลขเรียกหนังสือ.....

จ่ายกระแสไบแอสให้คงที่ ในที่นี้คือวงจรจ่ายกระแสไบแอส ซึ่งอาจใช้ตัวคุมค่าแรงดัน (Voltage Regulator) หรือใช้ทรานซิสเตอร์ ทำงานร่วมกับตัวต้านทานปรับค่าได้ในการตั้งค่ากระแสไบแอสให้กับเลเซอร์



รูปที่ 2.5 คุณลักษณะการเปล่งแสงของเลเซอร์

2.1.3 ตัวมอดูเลเตอร์ทางแสง (Optical Modulator)

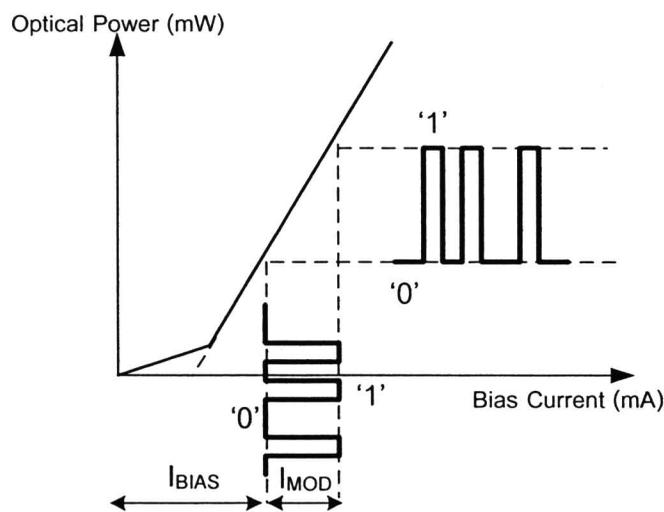
การมอดูเลตทางแสงที่นิยมใช้งานบนระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง มีอยู่ด้วยกัน 3 ชนิด คือ (1) การมอดูเลตแสงโดยตรง (Direct Modulation), (2) การมอดูเลตด้วยวิธีดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า, และ (3) การมอดูเลตภายนอก (External Modulation) ซึ่งมีรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.1.3.1 ถึง 2.1.3.3 ตามลำดับ

2.1.3.1 การมอดูเลตแสงโดยตรง (Direct Modulation)

เป็นการมอดูเลตข้อมูลที่ใช้หลักการเปิด-ปิดแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งแทนข้อมูลบิต 1 ด้วยการเปิดไฟ และปิดไฟสำหรับข้อมูลบิต 0 โดยใช้วงจรสำหรับตัวขับเลเซอร์ (Laser Driver) ซึ่งไม่ซับซ้อนมากนักและยังมีช่วงการทำงานเป็นเชิงเส้นแสดงดังรูปที่ 2.6 เนื่องจากการมอดูเลตประเภทนี้ใช้สัญญาณข้อมูล เข้าควบคุมการจ่ายกระแสไบแอสเลเซอร์โดยตรง จึงทำให้อัตราเร็วในการมอดูเลตขึ้นอยู่กับอัตราเร็วในการเปลี่ยนสถานะ (transition) ของระดับพลังงานของอิเล็กตรอน ดังนั้นอัตราเร็วในการมอดูเลตจึงถูกจำกัดอยู่ที่ 2.5 Gb/s [20] การมอดูเลตประเภทนี้จึงเหมาะกับการส่งสัญญาณแอนะล็อกหรือสัญญาณดิจิทัลอัตราเร็วไม่เกิน 2.5 Gb/s

ระดับความเข้มแสงของข้อมูลบิต 0 และบิต 1 กำหนดได้จากขนาดของกระแสไบแอส I_{BIAS} และกระแสมอดูเลต I_{MOD} โดยที่ I_{MOD} จะเป็นตัวกำหนดความต่างของระดับกำลังแสงของบิต 0 (P_0) กับบิต 1 (P_1) ในหน่วย mW คิดเป็นสัดส่วนเอ็กซ์ติงชัน (Extinction Ratio, EX) ดังสมการที่ (2.1) ซึ่งควรมีค่ามากกว่า 8.2 dB ขึ้นไป มาตรฐาน ITU-T G.691(Optical interfaces for single channel STM-64 and other SDH systems with optical amplifiers) [16]

$$\text{Extinction ratio (dB)} = 10 \log \frac{P_1(mW)}{P_0(mW)} \quad (2.1)$$



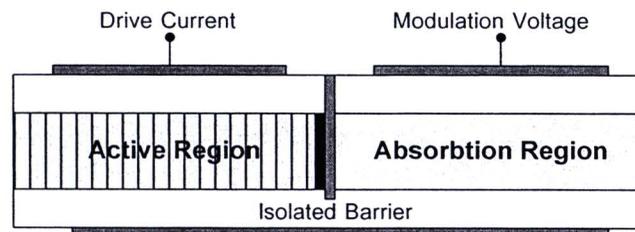
รูปที่ 2.6 การมอดูเลตแสงโดยตรง

2.1.3.2 การมอดูเลตด้วยวิธีดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า

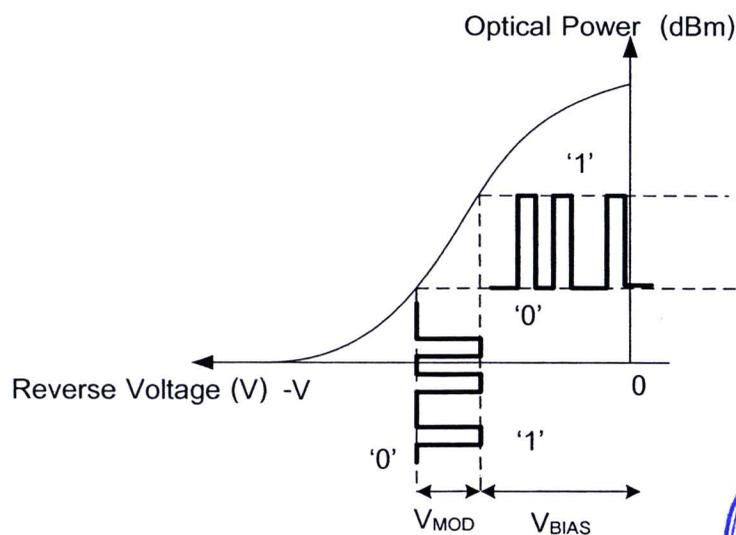
Electro-Absorption Modulator (EAM) เป็นมอดูเลเตอร์ชนิดอยู่ภายใน (Internal Modulator) ร่วมกับเลเซอร์ชนิด DFB ซึ่งใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงต่อเนื่องให้กับ EAM บน substrate เดียวกันแสดงโครงสร้างดังรูปที่ 2.7 เรียกเลเซอร์และมอดูเลเตอร์ชนิดนี้ว่า ตัวส่งสัญญาณทางแสงที่มีมอดูเลเตอร์ชนิดดูดกลืนคลื่นไฟฟ้าอยู่ภายใน (Electro-Absorption Modulator Integrated Laser, EML) โดยที่โครงสร้างของ EAM มีลักษณะเป็นรอยต่อระหว่างซัฟไฟท์กับเอ็น ต้องการแรงดันย้อนกลับ (Reverse Voltage) ซึ่งเป็นการป้อนไฟกลับซัฟเพื่อดูดกลืนแสง ดังนั้นการทำงานมีลักษณะตรงข้ามกับการมอดูเลตโดยตรง คือ จ่ายไฟให้กับมอดูเลเตอร์เพื่อดูดกลืนแสงสำหรับส่งข้อมูลบิต 0 และไม่จ่ายไฟสำหรับส่งข้อมูลบิต 1 ซึ่งมีคุณลักษณะแสดงดังรูปที่ 2.8 ส่วนระดับความเข้มแสง

ของข้อมูลบิต 0 และ 1 สามารถกำหนดได้จากขนาดของแรงดันมอดูเลต (V_{MOD}) และแรงดันไบแอส (V_{BIAS})

จากกราฟคุณลักษณะสังเกตได้ว่า EAM มีการทำงานไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจึงเหมาะกับการมอดูเลตข้อมูลดิจิทัลมากกว่า ในขณะที่การมอดูเลตข้อมูลแอนะล็อกก็สามารถทำได้เช่นกัน แต่ต้องทำการมอดูเลตในส่วนที่เป็นเชิงเส้นเท่านั้นซึ่งเป็นช่วงแคบมาก อย่างไรก็ตามเนื่องจากโครงสร้างที่เป็นหนึ่งเดียวกันระหว่างมอดูเลเตอร์กับเลเซอร์ จึงทำให้ค่า Insertion Loss ระหว่างอุปกรณ์ทั้งสองเกิดขึ้นน้อยมาก เมื่อเทียบกับการมอดูเลตภายนอกซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอีกมากมายในการพัฒนาประสิทธิภาพของ EML [21-23] ทั้งในเรื่องความเร็วมอดูเลตและปัญหา Chirp จึงทำให้ EAM มีความเร็วในการมอดูเลตสูงสุดถึง 40 Gb/s [23]



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของเลเซอร์ชนิด EML

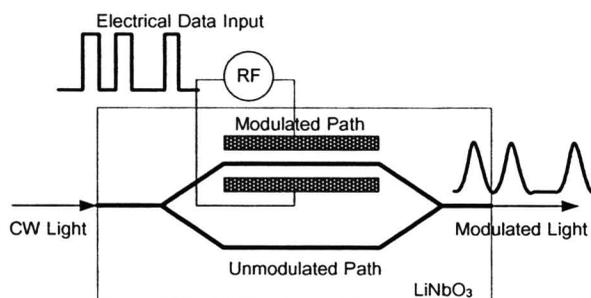


รูปที่ 2.8 คุณลักษณะการทำงานของ EAM



2.1.3.3 การมอดูเลตภายนอก (External Modulation)

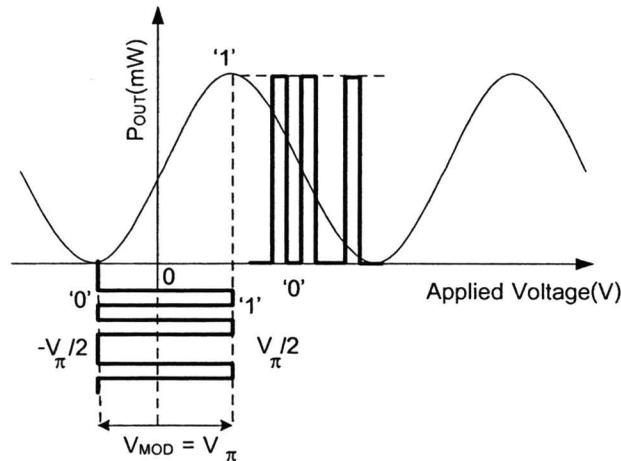
ตัวมอดูเลตแบบภายนอกที่มีการใช้งานกันมาก คือ Mach Zender Modulator (MZM) ซึ่งเป็นการมอดูเลตเชิงความเข้มแสงเช่นเดียวกับ การมอดูเลตโดยตรงและการมอดูเลตแบบดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า แต่ใช้หลักการของผลต่างเฟส (Phase Shift) ในการมอดูเลตข้อมูล โดยที่ MZM มีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.9 ภายในเป็นโครงสร้างของท่อนำแสง (Optical Waveguide) ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำประเภท piezoelectric เช่น LiNbO_3 โดยมีหลักการทำงาน คือ เมื่อมีแสงเดินทางเข้ามายังมอดูเลเตอร์แสงจะถูกแยกออกเป็น 2 เส้นทาง ได้แก่ (1) เส้นทางที่มีการมอดูเลตสัญญาณ (Modulated Path) เป็นเส้นทางที่ขนาบด้วยขั้วไฟฟ้า ถ้ามีการป้อนไฟจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ Electro Optic คือ ทำให้แสงที่เดินทางอยู่เกิดการประวิงเวลาขึ้นโดยทำให้มีเฟสแตกต่างจากเดิม 180 องศา อันเนื่องมาจากดัชนีหักเหที่เพิ่มมากขึ้นตามขนาดของสนามไฟฟ้าจากขั้วไฟฟ้า และ (2) เส้นทางที่ไม่มีการมอดูเลตสัญญาณ (Unmodulated Path) เป็นเส้นทางที่แสงเดินทางปกติ ที่ปลายทางขาออกแสงจากสองเส้นทางจะมารวมกันได้เป็นสัญญาณมอดูเลตตามความเข้มแสง



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของมอดูเลเตอร์ชนิด Mach-Zender

ในการมอดูเลตข้อมูล สัญญาณทางไฟฟ้าจากภายนอกจะถูกป้อนเข้ามาที่ขั้วไฟฟ้า ซึ่งสามารถคำนวณกำลังแสงขาออก (P_{OUT}) ได้จากสมการที่ (2.2) และมีคุณลักษณะในการมอดูเลตแสดงดังรูปที่ 2.10 จากคุณลักษณะการมอดูเลต แรงดันไบแอส V_{BIAS} ของตัวมอดูเลตจะถูกตั้งค่าไว้ที่ 0 V ในการส่งข้อมูลบิต 0 แรงดันมอดูเลต V_{MOD} ต้องมีค่าเท่ากับ $-V_{\pi}/2$ โดยที่ V_{π} เป็นแรงดันที่ทำให้แสงมีเฟสเลื่อนไปจากเดิม π rad (180 องศา) เพื่อให้กำลังแสงขาออก P_{OUT} จากสองเส้นทางหักล้างมีค่าเป็น 0 mW ส่วนการส่งข้อมูลบิต 1 แรงดัน V_{MOD} ต้องมีค่าเป็น $V_{\pi}/2$ เพื่อให้แสงทั้งสองเส้นทางมีเฟสต่างกัน 0 องศาซึ่งทำให้แสงออกมาเสริมกัน

$$P_{OUT} = \frac{P_{IN} L_{insertion}}{2} \left[1 + \sin\left(\pi \cdot \frac{V_{MOD}}{V_{\pi}}\right) \right] \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.10 คุณลักษณะการมอดูเลตตัวมอดูเลเตอร์ Mach-Zender

เนื่องจาก MZM มีโครงสร้างของท่อนำคลื่นขนาดใหญ่และใช้ substrate คนละชนิด จึงทำให้มอดูเลเตอร์ประเภทนี้ไม่สามารถนำมาผลิตรวมกับเลเซอร์เป็นชิ้นเดียวได้ ดังเช่น EAM MZM จึงเป็นตัวมอดูเลเตอร์แบบภายนอก ซึ่งมีข้อได้เปรียบในเรื่องของ อุณหภูมิ และอัตราเร็วซึ่งปัจจุบันมีค่าสูงสุดถึง 40 Gb/s เหมาะสมกับการนำมาใช้บน เครือข่ายหลัก เช่น Core Network หรือ Metro Network เป็นต้น อย่างไรก็ตามเนื่องจาก เป็นอุปกรณ์ที่ต้องเชื่อมต่อกับแหล่งกำเนิดแสงภายนอก จึงทำให้มีข้อเสียในเรื่องของ กำลังสูญเสีย (Insertion Loss)

2.1.4 ตัวขับมอดูเลเตอร์ (Modulator Driver)

ตัวขับมอดูเลเตอร์เป็นอุปกรณ์สำคัญในการเพิ่มค่าสัดส่วนของกำลังแสงบิต 1 และ บิต 0 หรือค่าสัดส่วนเอ็กซ์ติงชันซึ่งมีรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.1.3.1 ให้กับตัวส่งสัญญาณทางแสงเพื่อการส่งข้อมูลมีอัตราบิตผิดพลาดต่ำ โดยอุปกรณ์ดังกล่าวจะทำหน้าที่ขยายสัญญาณข้อมูลที่จะนำมามอดูเลตกับสัญญาณแสงจากเลเซอร์ให้มีขนาดใหญ่มากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น สัญญาณขาเข้า 0.3 ถึง 1 V_{P-P} ตัวขับเลเซอร์สามารถขยายสัญญาณข้อมูลให้มีขนาดใหญ่เป็น 2-3 V_{P-P} โดยที่ การมอดูเลตโดยตรงจะใช้เป็นตัวขับเลเซอร์ (Laser Driver) ในการขับกระแสมอดูเลต (I_{MOD}) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 10 ถึง 100 mA ซึ่งต้องมีค่ามากกว่ากระแสไบแอส (I_{BIAS}) เพื่อให้เลเซอร์ทำงานอยู่ในช่วงเชิงเส้น ส่วนในการมอดูเลตภายในและภายนอก จะใช้ตัวขับมอดูเลเตอร์ในการขับแรงดันมอดูเลต (V_{MOD}) แทน

องค์ประกอบของตัวขับมอดูเลเตอร์ประกอบด้วย ตัวขยายสัญญาณซึ่งเป็นวงจรรขยายแบบผลต่าง (Differential Amplifier) โดยมีสัญญาณขาออกเป็นสัดส่วนกับสัญญาณขาเข้าผลต่าง และตัว Retimer ดังนั้นตัวขับมอดูเลเตอร์จึงต้องการสัญญาณขาเข้าสองชนิด คือ สัญญาณข้อมูล

(Data) และสัญญาณนาฬิกา (Clock) ซึ่งเป็นสัญญาณแบบผลต่างทั้งหมด โดยที่สัญญาณนาฬิกา มีหน้าที่หลักในการปรับรูปของสัญญาณข้อมูลให้มีความถูกต้องมากขึ้น ซึ่งช่วยลดปัญหาการส่ายของสัญญาณนาฬิกา (Jitter) [19]

2.1.5 ระบบควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Control System)

อุณหภูมิมีผลกระทบต่อการทำงานของเลเซอร์ ทั้งในเรื่องของกำลังแสงและความยาวคลื่นซึ่งจะกล่าวละเอียดในหัวข้อที่ 2.2.1 ดังนั้นเพื่อเสถียรภาพในการทำงานที่ดีของเลเซอร์ จึงต้องมีระบบควบคุมอุณหภูมิมาช่วยจัดการอุณหภูมิให้คงที่ตลอดเวลา โดยที่องค์ประกอบหลักในการควบคุมอุณหภูมิของเลเซอร์ คือ เทอร์มิสเตอร์ และตัวระบายความร้อน (TEC) ซึ่งทั้งสองตัวจะถูกผลิตรวมอยู่ภายในแพ็คเกจของเลเซอร์เรียบร้อยแล้ว ดังนั้นสิ่งที่สำคัญลำดับถัดมาคือ วงจรควบคุมการใช้งานอุปกรณ์ทั้งสองซึ่งเป็นวงจรควบคุมแบบป้อนกลับ มีหลักการรักษาอุณหภูมิของเลเซอร์ให้คงที่ โดยอาศัยการวัดค่าอุณหภูมิจากเทอร์มิสเตอร์แล้วนำมาเปรียบเทียบกับอุณหภูมิตั้งค่า เพื่อควบคุมอุณหภูมิของเลเซอร์ให้คงที่ตลอดเวลาซึ่งองค์ประกอบของระบบควบคุมอุณหภูมิจะกล่าวละเอียดในหัวข้อที่ 2.2.2

2.2 การควบคุมความยาวคลื่นและเสถียรภาพของอุณหภูมิ

การที่อุณหภูมิของเลเซอร์มีการเปลี่ยนแปลง จะส่งผลโดยตรงกับแหล่งกำเนิดสัญญาณทางแสง ซึ่งได้แก่ กำลังของสัญญาณแสงและความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมาอย่างไร้เสถียรภาพ ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงนำเสนอการควบคุมความยาวคลื่นและเสถียรภาพของอุณหภูมิ โดยจะกล่าวถึง (1) ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการเปล่งแสงเลเซอร์ ซึ่งมีรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.2.1 จากนั้นจะกล่าวถึง (2) องค์ประกอบของระบบควบคุมอุณหภูมิ และสุดท้ายจะอธิบายถึง (3) หลักการควบคุมอุณหภูมิของเลเซอร์ โดยมีรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.2.2 และ 2.2.3 ตามลำดับ

2.2.1 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการเปล่งแสงเลเซอร์

เลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่นำมาใช้งานในการสื่อสาร ซึ่งผลิตมาจากสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นจึงมีการทำงานหรือการเปล่งแสงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ พารามิเตอร์สำคัญที่ได้รับผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ได้แก่ กระแสไบแอสและความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมา โดยที่ กระแสไบแอสจะส่งผลโดยตรงต่อระดับกำลังแสงซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.11[20] จะเห็นได้ว่าถ้าเลเซอร์ มีอุณหภูมิสูงขึ้นในขณะที่จ่ายกระแสไบแอสเท่าเดิมระดับกำลังแสงจะลดลง ในทางกลับกันเมื่อ อุณหภูมิลดลงกำลังแสงจะเพิ่มขึ้น ขนาดของกระแสขีดเริ่ม (I_{TH}) ที่อุณหภูมิต่างๆ สามารถคำนวณ ได้ตามสมการที่ (2.3) [20]

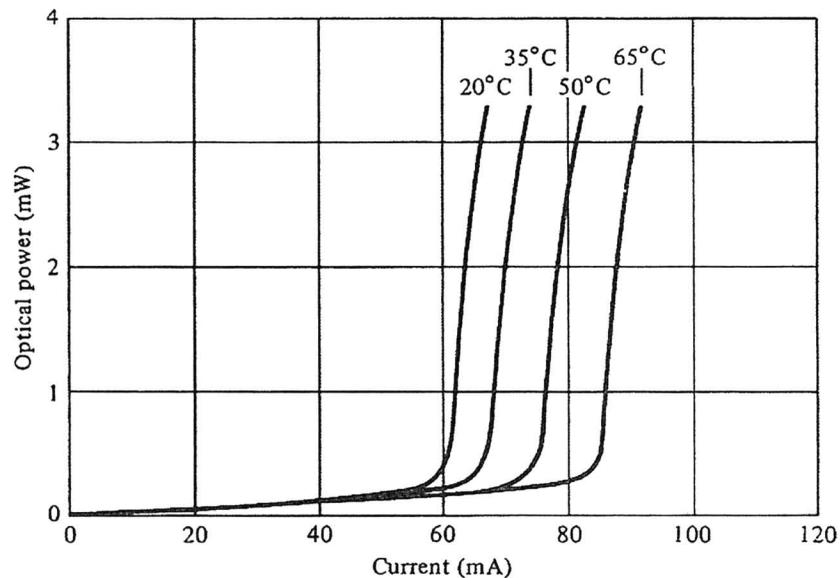
$$I_{TH} = I_{TH0} \exp\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad (2.3)$$

โดยที่

T_0 คือ อุณหภูมิอ้างอิง

T คือ อุณหภูมิของเลเซอร์ที่ต้องการวัดเทียบกับอุณหภูมิที่ T_0

I_{TH0} คือ กระแสขีดเริ่มที่อุณหภูมิ T_0



รูปที่ 2.11 ผลของอุณหภูมิต่อกำลังแสงที่เปล่งออกมาจากเลเซอร์

นอกจากอุณหภูมิจะมีผลกระทบต่อระดับกำลังแสงแล้ว ยังมีผลโดยตรงต่อความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมาเช่นกัน เพราะเนื่องจากขนาดพลังงานของแบนด์แก๊ป (Bandgap Energy) ซึ่งแปรผกผันกับอุณหภูมิตามความสัมพันธ์ของ Vashnii ดังสมการที่ (2.4) [14] เมื่ออุณหภูมิตั้งขึ้นจะทำให้แบนด์แก๊ปมีขนาดแคบลงซึ่งส่งผลให้ความยาวคลื่นที่เปล่งออกมามีค่ามากขึ้น ในทางกลับกันถ้าอุณหภูมิลดลงจะทำให้แบนด์แก๊ปมีขนาดกว้างมากขึ้น จึงทำให้ความยาวคลื่นที่เปล่งออกมามีขนาดสั้นลง โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับพลังงานแบนด์แก๊ปกับความยาวคลื่นที่เลเซอร์เปล่งออกมาได้ดังสมการที่ (2.5)

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{AT^2}{T+B} \quad (2.4)$$

โดยที่

A และ B เป็นค่าคงที่ที่ได้จากการจากการประมาณกราฟผลการทดลองของสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิด

$$\lambda = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24 \mu m}{E_g} \quad (2.5)$$

โดยที่ h คือ ค่าคงที่ของพลังก์ (Planck's Constant) มีค่า 6.6256×10^{-34} J·s

c คือ ความเร็วแสงในสุญญากาศ มีค่า 2.99793×10^8 m/s

E_g คือ ระดับพลังงานของแบนด์แก๊ปมีหน่วยเป็น eV

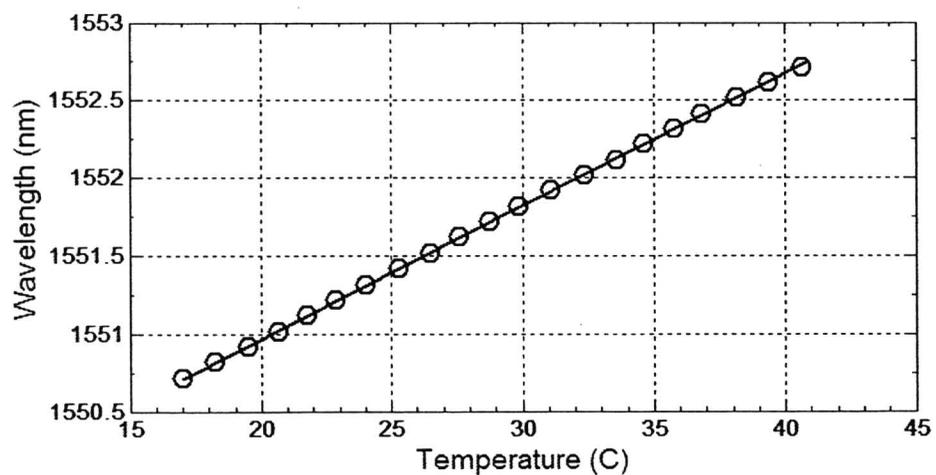
λ คือ ความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมา

ค่า A และ B ของสารกึ่งตัวนำ GaAs และ InP ที่ใช้ในสมการ Vashni มีตัวอย่างดังตารางที่ 2.1[14]

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าคงที่ A และ B ที่ใช้ในสมการ Vashni ของสารกึ่งตัวนำบางชนิด

สารกึ่งตัวนำ	$E_g(0K)$ (eV)	A (eV/K)	B (K)
GaAs	1.519	5.405×10^{-4}	204
InP	1.421	4.906×10^{-4}	327

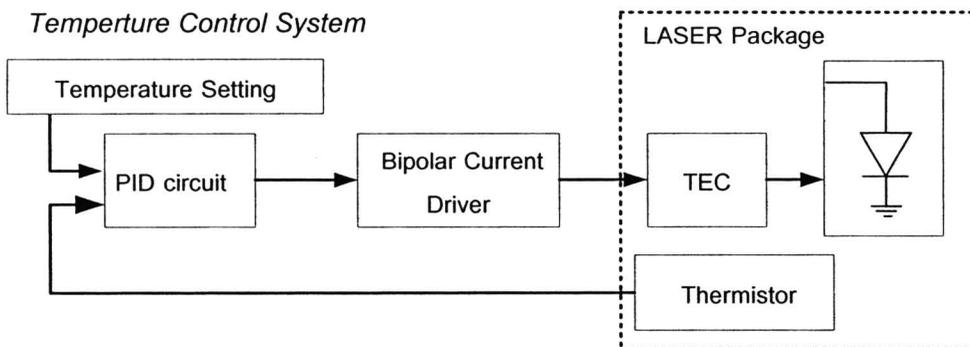
จากความสัมพันธ์ทั้งสองที่ได้กล่าวไปในข้างต้นสามารถแสดงผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อความยาวคลื่นที่เปล่งออกมาจากเลเซอร์ ได้ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งมีรายละเอียดของการวัดทดสอบในหัวข้อที่ 5.2.2 ดังนั้นการนำเลเซอร์ที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิมาใช้งานในระบบ WDM จะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนระหว่างช่องสัญญาณ ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพของข้อมูลโดยตรงต่อช่องสัญญาณข้างเคียง



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับความยาวคลื่นของเลเซอร์

2.2.2 องค์ประกอบของระบบควบคุมอุณหภูมิ

องค์ประกอบของระบบควบคุมอุณหภูมิภายในตัวส่งสัญญาณทางแสงต้นแบบในวิทยานิพนธ์นี้มี 5 องค์ประกอบหลักแสดงดังรูปที่ 2.13 คือ (1) เทอร์มิสเตอร์ (Thermistor) ทำหน้าที่วัดอุณหภูมิของเลเซอร์, (2) การตั้งค่าอุณหภูมิ (Temperature Setting) ทำหน้าที่ตั้งค่าอุณหภูมิให้กับเลเซอร์เพื่อกำหนดค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์, (3) วงจรควบคุมพีไอดีเป็นวงจรควบคุมเพื่อรักษาอุณหภูมิของเลเซอร์ให้คงที่ตลอดเวลา, (4) ตัวขับกระแสสองขั้ว (Bipolar Current Driver) ทำหน้าที่จ่ายกระแสให้กับ TEC ซึ่งควบคุมการทำงานโดยวงจรควบคุมพีไอดี, และ (5) ตัวระบายความร้อน (TEC) ทำหน้าที่ถ่ายเทอุณหภูมิให้กับเลเซอร์ โดยที่แต่ละองค์ประกอบมีรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.2.2.1 ถึง 2.2.2.5 ตามลำดับ



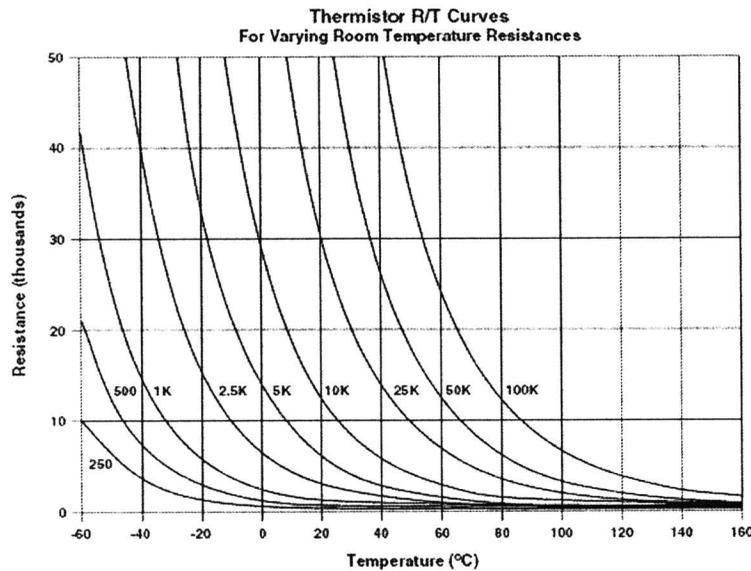
รูปที่ 2.13 องค์ประกอบของระบบควบคุมอุณหภูมิภายในตัวส่งสัญญาณทางแสง

2.2.2.1 เทอร์มิสเตอร์ (Thermistor)

เทอร์มิสเตอร์เป็นตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานแปรผกผันตามอุณหภูมิ การใช้งานในการวัดอุณหภูมิภายในเลเซอร์ไดโอดส่วนใหญ่แล้วจะผลิตเทอร์มิสเตอร์รวมมากับเลเซอร์ในแพ็คเกจเดียวกัน โดยเทอร์มิสเตอร์มีด้วยกันหลายขนาด เช่น 5 k Ω , 10 k Ω หรือ 20 k Ω เป็นต้น โดยค่าความต้านทานดังกล่าวเป็นค่ามาตรฐานที่อุณหภูมิห้อง (T_0) ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ค่าความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์เหล่านี้ จะมีขนาดเปลี่ยนแปลงไปจากค่าเดิมตามคุณลักษณะเทอร์มิสเตอร์แสดงดังรูปที่ 2.14 [24] ซึ่งสามารถคำนวณค่าความต้านทาน (R_{THERM}) ได้จากสมการที่ (2.6) [25] โดยที่ β คือค่าคงที่ของเทอร์มิสเตอร์มีค่า 4100 สำหรับเทอร์มิสเตอร์ขนาด 10 k Ω และ R_0 คือค่าความต้านทานอ้างอิงมีค่า 10,440 Ω ที่อุณหภูมิห้อง T_0 เท่ากับ 298.15 K แต่เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเทอร์มิสเตอร์จึงทำให้การคำนวณอุณหภูมิจากสมการที่ (2.6) แม่นยำเฉพาะค่าที่อยู่ใกล้ T_0 เท่านั้น มิฉะนั้นต้องใช้สมการ Steinhart-Hart ในการคำนวณหาอุณหภูมิแทนซึ่งมีความซับซ้อนกว่า

$$R_{THERM} = R_0 \exp\left(\beta\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right) \text{ [ohm]} \quad (2.6)$$

การอ่านค่าอุณหภูมิจากเลเซอร์ในวิทยานิพนธ์นี้จะอ่านออกมาอยู่ในรูปของแรงดันเทอร์มิสเตอร์ V_{THERM} ตามหลักการของการแบ่งแรงดัน โดยที่เทอร์มิสเตอร์จะถูกนำมาต่อเป็นโหนดอนุกรมร่วมกับตัวต้านทานที่มีค่า 10 k Ω ถึง 50 k Ω กับแรงดันอ้างอิง V_{REF} จากตัวจ่ายกระแสสองขั้วแสดงการต่อวงจรในหัวข้อที่ 3.2.1.1



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับอุณหภูมิของเทอร์มิสเตอร์

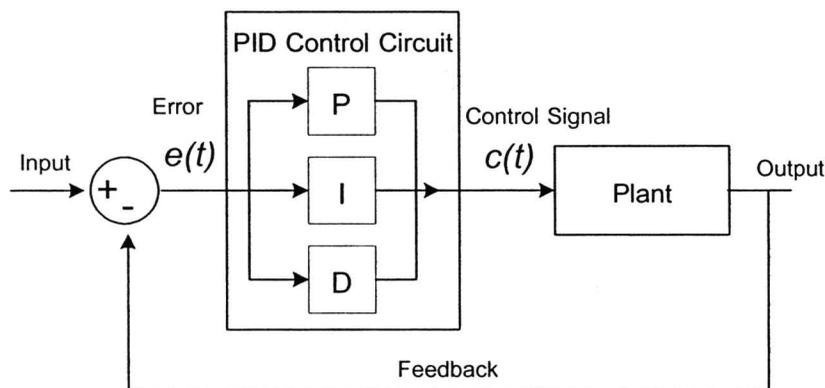
2.2.2.2 การตั้งค่าอุณหภูมิ (Temperature Setting)

การตั้งค่าอุณหภูมิในระบบการควบคุมที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการตั้งค่าอุณหภูมิในรูปของแรงดันตั้งค่า (V_{SET}) ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับแรงดัน V_{THERM} ดังที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.2.2.1 โดยตั้งค่าได้จากตัวต้านทานปรับค่าได้ (trimpot) การตั้งค่าอุณหภูมิวิธีนี้ ทำได้โดยนำตัวต้านทานปรับค่าได้มาต่ออนุกรมกับแรงดันอ้างอิง (V_{REF}) ซึ่งเป็นแรงดันเดียวกันกับที่ใช้ในวงจรของเทอร์มิสเตอร์ อาศัยหลักการแบ่งแรงดันหรือปรับตัวต้านทานปรับค่าได้ ซึ่งทำให้ได้ V_{SET} โดยแรงดันนี้จะเป็นแรงดันสะท้อนค่าอุณหภูมิที่ต้องการ จากนั้นวงจรควบคุมพีไอดี ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ 3.2.1.3 จะทำการควบคุมอุณหภูมิตามกระบวนการควบคุมป้อนกลับจนทำให้ แรงดัน V_{THERM} มีค่าเท่ากับ V_{SET} ซึ่งจะกล่าวละเอียดในหัวข้อที่ 2.2.3

2.2.2.3 วงจรควบคุมพีไอดี

วงจรควบคุมพีไอดี (PID Controller Circuit) เป็นวงจรที่ใช้กระบวนการควบคุมแบบป้อนกลับซึ่งมีการใช้ในงานควบคุมทั่วไป โดยจะนำมาใช้ควบคุมสิ่งต้องการควบคุม (Plant) ให้มีผลลัพธ์เป็นไปตามค่าที่ต้องการ หลักการทำงานของวงจรควบคุมพีไอดีแสดงดังรูปที่ 2.15 คือ วงจรจะคำนวณผลต่าง (Error, $e(t)$) ระหว่างสัญญาณขาออกจาก Plant กับสัญญาณขาเข้าซึ่งเป็นค่าที่ตั้งไว้ (set point) และจะพยายามลดผลต่างดังกล่าว โดยการชดเชยผลต่างของสัญญาณทั้งสองด้วยสัญญาณควบคุม (Control Signal, $c(t)$) เพื่อไปกำหนดสัญญาณขาออกจาก Plant ให้มีค่าตามสัญญาณที่ตั้งค่าไว้

สัญญาณควบคุมจากวงจรควบคุมพีไอดี $c(t)$ มีความสัมพันธ์ในโดเมนเวลา ระหว่างสัญญาณขาเข้า $e(t)$ ดังสมการที่ (2.7) และมีฟังก์ชันการส่งผ่าน (transfer function) บนโดเมนความถี่ดังสมการที่ (2.8) [26] ภายในวงจรควบคุมมีการควบคุมทั้งหมด 3 รูปแบบ คือ (1) การควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional control, P), (2) การควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral control, I), และ (3) การควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative control, D) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 หลักการทำงานของวงจรควบคุมพีไอดี

$$c(t) = \left[K_p e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2.7)$$

$$G_{PID}(s) = \left[K_p + \frac{K_I}{S} + K_D S \right] \quad (2.8)$$

โดยที่ K_p คือ อัตราขยายแบบสัดส่วน (Proportional gain)
 K_I คือ อัตราขยายแบบปริพันธ์ (Integral gain)
 K_D คือ อัตราขยายแบบอนุพันธ์ (Derivative gain)

P คือ การควบคุมแบบสัดส่วน จะให้สัญญาณขาออก $c(t)$ จากวงจรถวลคุม เป็นสัดส่วนกับสัญญาณขาเข้า $e(t)$ ของวงจรถวลคุมตามค่าอัตราขยายแบบสัดส่วน K_p ดังสมการที่ (2.9)

$$c(t) = K_p e(t) \quad (2.9)$$

I คือ การควบคุมแบบปริพันธ์ จะให้สัญญาณขาออกจากวงจรถวลคุม $c(t)$ เป็นการสะสมของผลต่างของสัญญาณตั้งค้ำกับสัญญาณขาออกจาก plant โดยสัญญาณ $e(t)$ ที่เกิดขึ้นในแต่ละรอบการป้อนกลับดังสมการที่ (2.10) ซึ่งผลต่างของสัญญาณทั้งสองจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ในขณะที่สัญญาณขาออกในแต่ละรอบจะมีค่าเข้าใกล้สัญญาณตั้งค้ำ ในท้ายที่สุดสัญญาณขาออกจาก plant มีค่าเท่ากับสัญญาณขาเข้า ส่วนสัญญาณผลต่างจะลดค่าเหลือศูนย์ โดยมีความเร็วในการเข้าสู่สถานะคงตัว (Steady State) ตามค่า K_i

$$c(t) = K_i \int e(t) dt \quad (2.10)$$

D คือ การควบคุมแบบอนุพันธ์ จะให้สัญญาณขาออกเป็นการลดผลต่างระหว่างสัญญาณขาเข้ากับสัญญาณขาออก ที่เกิดขึ้นในแต่ละรอบดังสมการที่ (2.11) เนื่องจากไม่มีการสะสมของผลต่างที่เกิดขึ้นดังเช่นการควบคุมแบบ I ดังนั้นการควบคุมแบบ D จึงสามารถกำจัดผลต่างเฉพาะกรณีผลตอบสนองในสถานะชั่วขณะ (Transient Response) ที่เป็นสัญญาณพุ่งเกิน (overshoot) แต่ไม่สามารถกำจัดผลต่างแบบสถานะคงตัวได้ เพราะว่า $e(t)$ ที่สถานะคงตัวเป็นค่าคงที่ซึ่งการหาอนุพันธ์ค่าคงที่ดังกล่าวจะมีค่าเป็น 0 ดังสมการที่ (2.12)

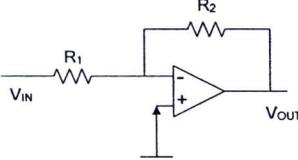
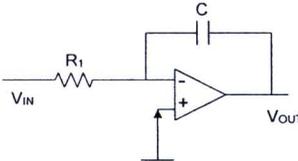
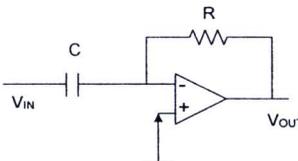
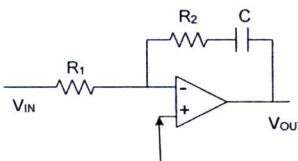
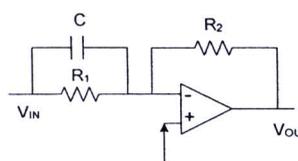
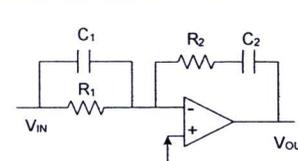
$$c(t) = K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.11)$$

$$\frac{de(t)}{dt} = 0 \quad (2.12)$$

องค์ประกอบของวงจรถวลคุมพีไอดี ได้แก่ Operational Amplifier (Op-Amp) และองค์ประกอบทางไฟฟ้า ซึ่งได้แก่ ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ โดยวงจรถวลคุมแต่ละแบบเป็นการต่อกันของตัวต้านทานและตัวเก็บประจุและ Op-Amp ซึ่งมีวงจรถวลคุมขึ้นอยู่กับรูปแบบฟังก์ชันการส่งผ่านแต่ละรูปแบบดังตารางที่ 2.2 [27] การใช้งานวงจรถวลคุมพีไอดี มีด้วยกันหลายแบบซึ่งอาจจะใช้งานเฉพาะวงจรถวลคุมแบบ PID, PI, PD, P หรือใช้เพียงแค่ว่าขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพและสมรรถนะของระบบควบคุมที่ต้องการ ซึ่งประโยชน์ของการควบคุมแต่ละแบบคือ ตัวควบคุมแบบ P และ I จะช่วยลด

ความผิดพลาดที่สถานะคงตัว แต่อาจทำให้ผลตอบสนองภาวะชั่วขณะของระบบแย่งซึ่งทำให้ระบบมีการแกว่งมากหรือไม่เสถียรมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มผลของการควบคุมแบบ P เป็นการเพิ่มอัตราขยายวงรอบของระบบ และการใส่วงจรถวลแบบ I เป็นการเพิ่มโพลให้แก่ระบบ ทำให้ระบบมีอันดับสูงขึ้น ส่วนวงจรถวลแบบ D จะช่วยแก้ไขผลตอบสนองภาวะชั่วขณะของระบบให้ดีขึ้น ทำให้ระบบมีเสถียรภาพที่ดีขึ้นเพราะการใส่วงจรถวลแบบ D เป็นการเพิ่มซีโรให้แก่ระบบ [26]

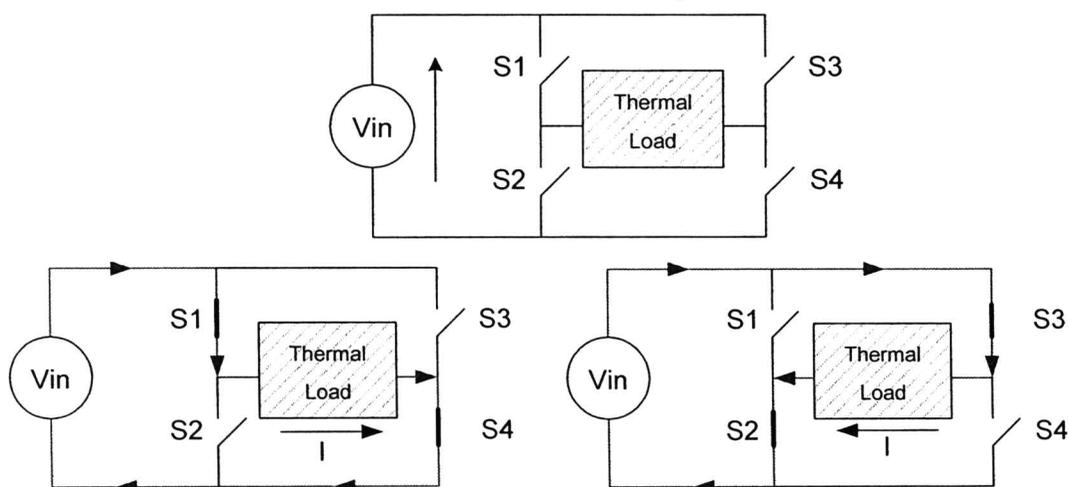
ตารางที่ 2.2 วงจรถวลรูปแบบต่างๆ

Function	Equivalent Circuit	Transfer Function
Gain		$-\frac{R_2}{R_1}$
Integration		$-\frac{1}{RCs}$
Derivation		$-RCs$
PI		$-\frac{R_2}{R_1} \left(s + \frac{1}{R_2 C} \right)$
PD		$-R_2 C \left(s + \frac{1}{R_1 C} \right)$
PID		$-\left[\left(\frac{R_2}{R_1} + \frac{C_1}{C_2} \right) + R_2 C_1 s + \frac{1}{R_1 C_2} \right]$



2.2.2.4 ตัวขับกระแสสองขั้ว (Bipolar Current Driver)

เนื่องจาก TEC ต้องการทั้งไฟกระแสบวกและลบ เพื่อช่วยในการระบายหรือสร้างความร้อนซึ่งมีรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.2.2.5 ดังนั้นตัวขับกระแสสองขั้ว จึงมีบทบาทสำคัญในการทำงานร่วมกับ TEC เนื่องจาก TEC สามารถถ่ายเทความร้อนของไหลที่เข้ามาเชื่อมต่อ ด้วยขนาดและทิศทางกระแส TEC ได้โดยตรง ดังนั้นจึงมีการนำโครงสร้างแบบ H-bridge แสดงดังรูปที่ 2.16 (บน) มาใช้ในตัวขับกระแสสองขั้ว ซึ่งมีลักษณะเป็นวงจรไฟฟ้าที่สามารถจ่ายกระแสไปยังโหลดในทิศทางใดทิศทางหนึ่งได้จากแหล่งจ่ายไฟเพียงตัวเดียว โดยทำงานร่วมกับสวิตช์ 4 ตัว ซึ่งได้แก่ S1, S2, S3 และ S4 ที่ส่วนใหญ่แล้วเป็นทรานซิสเตอร์ที่ถูกควบคุมการทำงานด้วยหลักตรรกศาสตร์จาก GATE control ซึ่งอยู่ภายในชิปเช่นกัน โดยจะควบคุมการทำงานของสวิตช์ทีละคู่ [28] ซึ่งได้แก่ การปิดสวิตช์ S1 กับ S4 สำหรับการจ่ายกระแสไปทางขวามือ หรือ ปิดสวิตช์ S3 กับ S2 สำหรับการจ่ายกระแสไปทางซ้ายมือดังรูปที่ 2.16 (ล่าง)



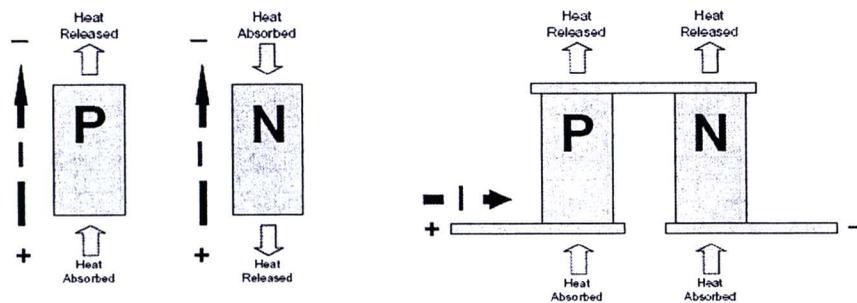
รูปที่ 2.16 (บน) โครงสร้างและ (ล่าง) แผนภาพการทำงานของ H-bridge

2.2.2.5 ตัวระบายความร้อน (TEC)

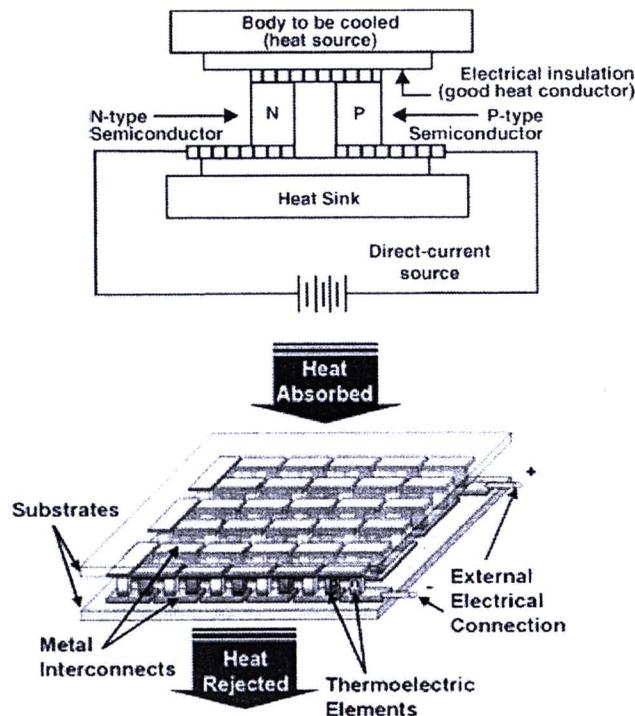
TEC เป็นอุปกรณ์สำหรับสร้างหรือระบายความร้อน ซึ่งมีโครงสร้างเป็นรอยต่อระหว่างขั้วไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2.17[29] โดยทำมาจากสารกึ่งตัวนำชนิด Bismuth Telluride ซึ่งมีการเจือด้วยสารประกอบพีและเอ็นอย่างเข้มข้น เรียกว่า คู่ต่อ TEC มีการระบายความร้อนตามปรากฏการณ์ Peltier Effect กล่าวคือ เมื่อมีการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านคู่ตอดังกล่าวจะมีการถ่ายเทความร้อนขึ้นที่บริเวณดังกล่าวได้ โดยปริมาณความร้อนในการถ่ายเทขึ้นอยู่กับขนาดและทิศทางของกระแสที่ป้อนผ่านขั้วไฟฟ้า เรียกกระแสดังกล่าวว่า กระแส TEC (I_{TEC}) โดยที่ป้อนกระแส I_{TEC} ผ่านขั้วเอ็น (I_{TEC} ลบ) เป็นการสร้าง

ความร้อนจากคู่ต่อ TEC ให้กับโหลดที่เชื่อมต่ออยู่ในทางกลับกันเมื่อป้อนกระแส I_{TEC} ผ่านขั้วพี (I_{TEC} บวก) ขั้วต่อจะดูดกลืนความร้อนออกจากโหลดที่เชื่อมต่ออยู่ไปยัง Heat sink ที่เชื่อมต่ออยู่ด้านล่างของคู่ต่อ TEC แสดงดังรูปที่ 2.18 [30]

ภายใน TEC ประกอบไปด้วยคู่ต่อ TEC จำนวนมาก จึงทำให้ TEC มีประสิทธิภาพในการระบายความร้อนได้มากถึง 60 °C อย่างไรก็ตามการทำงานของ TEC ก็มีข้อจำกัดเช่นกัน โดยยิ่งอุณหภูมิของโหลดมีค่าสูงมากขึ้น ก็ยิ่งทำให้ความสามารถในการระบายความร้อนของ TEC ลดลง จากการที่ TEC เป็นอุปกรณ์ผลิตมาจากสารกึ่งตัวนำจึงมีข้อได้เปรียบในเรื่องขนาดเล็กจึงสามารถบรรจุ TEC ให้อยู่รวมกันกับอุปกรณ์ที่ต้องการระบายความร้อนอย่างเช่น เลเซอร์ เป็นต้น

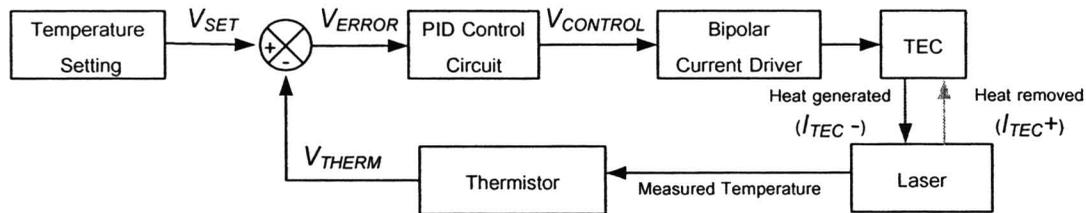


รูปที่ 2.17 คู่ต่อสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการดูดหรือคายความร้อน



รูปที่ 2.18 คู่ต่อ TEC

2.2.3 หลักการควบคุมอุณหภูมิของเลเซอร์



รูปที่ 2.19 แผนภาพการทำงานของระบบควบคุมแบบป้อนกลับในระบบควบคุมอุณหภูมิ

การควบคุมอุณหภูมิของเลเซอร์ มีหลักการควบคุมแบบป้อนกลับแสดงดังรูปที่ 2.19 ซึ่งมีองค์ประกอบต่างๆ ในหัวข้อที่ 2.2.2 โดยมีขั้นตอนในการควบคุมอุณหภูมิ เริ่มจากการตั้งค่าอุณหภูมิให้กับเลเซอร์จากวงจรตั้งค่าอุณหภูมิดังรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.2.2.2 เป็นค่าแรงดัน V_{SET} จากนั้นแรงดันดังกล่าวจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าแรงดัน V_{THERM} ซึ่งเป็นค่าอุณหภูมิของเลเซอร์ที่อ่านได้จากเทอร์มิสเตอร์ในรูปของแรงดันดังรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.2.2.1 จะได้เป็นผลต่างแรงดัน (V_{ERROR}) จากนั้นวงจรควบคุมพีไอดีจะปรับแรงดันดังกล่าวให้มีค่าที่เหมาะสมตามอัตราขยายวงรอบ (Loop Gain) ของวงจรเพื่อให้ได้แรงดันควบคุม ($V_{CONTROL}$) ในการกำหนดขนาดและทิศทางของกระแส TEC จากตัวจ่ายกระแสสองขั้ว เพื่อถ่ายเทความร้อนให้กับเลเซอร์ตามหลักการทำงานของ TEC ซึ่งมีรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.2.2.5 จากนั้นเทอร์มิสเตอร์จะวัดอุณหภูมิของเลเซอร์ที่เปลี่ยนไปเป็น V_{THERM} ค่าใหม่ ซึ่งจะถูกนำกลับไปเปรียบเทียบกับ V_{SET} เป็นวงรอบ (Loop) จนกระทั่ง V_{SET} กับ V_{THERM} มีค่าเท่ากัน ซึ่งเป็นการเข้าสู่สถานะคงตัวของระบบ

ดังนั้นสิ่งที่สำคัญสำหรับระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ได้แก่ (1) เสถียรภาพในการควบคุมของระบบซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญต่อการตอบสนองในสถานะคงตัวของระบบ (Steady State Response) และ (2) ความเร็วในการตอบสนองต่อการติดตามค่าที่กำหนดให้กับระบบ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอีกข้อหนึ่งของการตอบสนองของระบบในภาวะชั่วขณะ (Transient Response) ดังนั้นระบบควบคุมที่ดีควรมีคุณสมบัติครบถ้วนทั้งสองประการ

2.3 การรับส่งข้อมูลแบบ DWDM

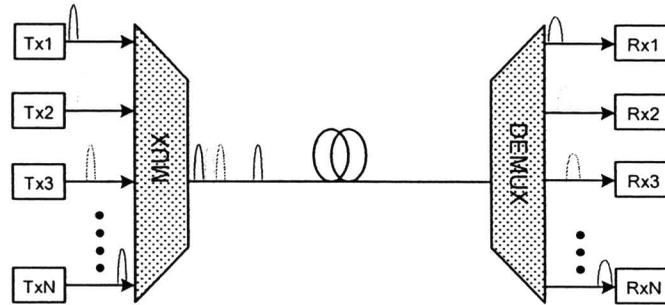
WDM เป็นเทคโนโลยีในการรับส่งข้อมูลทางแสงหลายความยาวคลื่นพร้อมกันบนเส้นใยนำแสงเส้นเดียวกัน โดยไม่สนใจรูปแบบข้อมูลที่ใช้ในการรับส่ง แต่ละช่องสัญญาณอาจมีรูปแบบของข้อมูลแตกต่างกันหรือมีอัตราเร็วไม่เท่ากันก็ได้ เนื่องจากในแต่ละช่องสัญญาณของระบบ WDM ใช้ความยาวคลื่นในการรับส่งข้อมูลแตกต่างกัน

WDM เป็นการรวมข้อมูลแบ่งตามความถี่ (Frequencies Division Multiplexing) ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดช่องสัญญาณหรือค่าความถี่ที่จะใช้ในการรับส่งข้อมูล มาตรฐาน ITU-T G.692 ได้กำหนดช่องสัญญาณดังกล่าวอ้างอิงความถี่ 193.1 THz หรือเท่ากับความยาวคลื่น 1552.524 nm ในระบบ DWDM ซึ่งมีระยะช่องสัญญาณที่แคบมากขึ้นจาก 100 GHz เป็น 50 GHz, 25 GHz และ 12.5 GHz มาตรฐาน ITU-T G.694.1 ได้กำหนดช่องสัญญาณอ้างอิงที่ระยะห่างช่องสัญญาณต่าง ๆ แสดงตัวอย่างดังตารางที่ 2.3 [8]

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างช่องสัญญาณตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1

ความถี่กลางของช่องสัญญาณ (THz) ในการส่งสัญญาณที่มีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณต่างๆ				ความยาวคลื่นกลาง โดยประมาณ (nm)
12.5 GHz	25 GHz	50 GHz	100 GHz	
193.2250	193.225	-	-	1551.52
193.2125	-	-	-	1551.62
193.2000	193.200	193.20	193.2	1551.72
193.1875	-	-	-	1551.82
193.1750	193.175	-	-	1551.92
193.1625	-	-	-	1552.02
193.1500	193.150	193.15	-	1552.12
193.1375	-	-	-	1552.22
193.1250	193.125	-	-	1552.32
193.1125	-	-	-	1552.42
193.1000	193.100	193.10	193.1	1552.52
193.0875	-	-	-	1552.62
193.0750	193.075	-	-	1552.73

การรับส่งข้อมูลแบบ DWDM มีองค์ประกอบหลักแสดงดังรูปที่ 2.20 ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ (1) ภาคส่งสัญญาณทางแสง และ (2) ภาครับสัญญาณทางแสงโดยแต่ละส่วนมีรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.3.1 และ 2.3.2 ตามลำดับ



รูปที่ 2.20 แผนภาพการรับส่งข้อมูลแบบ WDM

2.3.1 ภาคส่งสัญญาณทางแสง

ภาคส่งสัญญาณทางแสงมี 2 องค์ประกอบหลัก คือ (1) ตัวส่งสัญญาณทางแสง และ (2) ตัวรวมสัญญาณทางแสง (Multiplexer) โดยแต่ละองค์ประกอบมีรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.3.1.1 และ 2.3.1.2 ตามลำดับ

2.3.1.1 ตัวส่งสัญญาณทางแสง

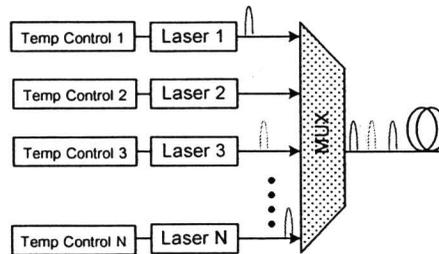
แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ภายในตัวส่งสัญญาณทางแสงสำหรับ WDM ต้องมีคุณสมบัติสำคัญ 2 ประการ คือ (1) สเปกตรัมแคบ และ (2) มีความยาวคลื่นที่ตรงกับช่องสัญญาณมาตรฐาน ITU-T G.694.1 นอกจากนี้สเปกตรัมของแต่ละช่องสัญญาณจะต้องมีความคลาดเคลื่อนจากช่องสัญญาณหลัก (Δf) ไม่เกินค่าตามมาตรฐาน ITU-T G.692 ซึ่งคำนวณได้ตามสมการที่ (2.13)[15] ยกตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการส่งข้อมูลอัตรา (B) 10 Gb/s ด้วยระยะห่างช่องสัญญาณ (f_s) 25 GHz ดังนั้นสเปกตรัมที่ใช้ต้องมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 1.25 GHz หรือ ± 10 pm ที่ความยาวคลื่นประมาณ 1550 nm

$$\Delta f \leq \frac{f_s - 2B}{4} \quad (2.13)$$

แหล่งกำเนิดแสงในระบบ WDM มีการใช้งานอยู่ 2 ประเภท คือ (1) เลเซอร์ปรับความยาวคลื่นได้ (Wavelength Tunable Laser) และ (2) เลเซอร์หลายความยาวคลื่น (Multi Wavelength Laser Array) โดยมีรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.3.1.1.1 และ 2.3.1.1.2 ตามลำดับ

2.3.1.1.1 เลเซอร์ปรับความยาวคลื่นได้ (Wavelength Tunable Laser)

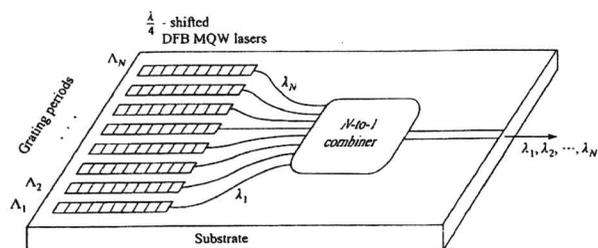
เป็นเลเซอร์ที่มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นเลเซอร์ชนิด DFB หรือ DBR ซึ่งมีรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.1.1.2.2 โดยสามารถปรับความยาวคลื่นได้จากการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของเลเซอร์ ซึ่งมีค่าประมาณ $0.1 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ โดยภายในแพ็คเกจจะมี TEC และเทอร์มิสเตอร์เพื่อช่วยในการจัดการอุณหภูมิอยู่ด้วยเสมอ การนำเลเซอร์ประเภทนี้มาใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงให้กับระบบ WDM เป็นทางเลือกที่ง่ายต่อการจัดหาใช้งานมากที่สุด เนื่องจากมีหลายค่าความยาวคลื่นแบรกก์ (Bragg Wavelength) ที่สามารถเลือกมาใช้งานและปรับค่าความยาวคลื่นแสงได้ แต่มีต้นทุนสูงเพราะราคาต่อหน่วยของเลเซอร์ที่ค่อนข้างสูง นอกจากนั้นยังต้องมีการควบคุมและติดตามอุณหภูมิให้กับเลเซอร์แต่ละตัวแสดงดังรูปที่ 2.21 เพื่อให้ความยาวคลื่นของแต่ละช่องสัญญาณไม่เลื่อนไปทับกับช่องสัญญาณข้างเคียง ซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหา Interchannel Crosstalk ได้



รูปที่ 2.21 แหล่งกำเนิดแสง WDM แบบเลเซอร์ปรับความยาวคลื่นได้

2.3.1.1.2 เลเซอร์หลายความยาวคลื่น (Multi Wavelength Laser Array)

แหล่งกำเนิดแสงชนิดนี้ผลิตมาจากเลเซอร์ชนิด Multiple Quantum Well (MQW) DFB หลายๆ ตัวบนแผ่นเวเฟอร์ (wafer) เดียวกันแสดงดังรูปที่ 2.22 [20] โดยที่เลเซอร์แต่ละตัวจะมีความยาวคลื่นแตกต่างกันทุกๆ $\lambda/4$ ดังนั้นเลเซอร์ชนิดนี้ไม่จำเป็นต้องมีการควบคุมอุณหภูมิเพื่อกำหนดความยาวคลื่น แต่ใช้การป้อนกระแสไฟเข้าไปยังเลเซอร์ที่ให้ความยาวคลื่นตามที่ต้องการแทน จากนั้นแสงที่เปล่งออกมาจากเลเซอร์แต่ละตัวจะมารวมกันที่ตัวรวมสัญญาณทางแสง (combiner) แบบ N ช่อง ต่อ 1 ช่องสัญญาณจะได้แสงแบบ WDM



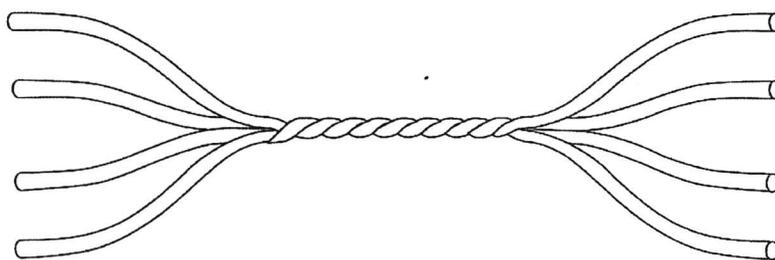
รูปที่ 2.22 โครงสร้างของเลเซอร์หลายความยาวคลื่น

2.3.1.2 ตัวรวมสัญญาณทางแสง (Multiplexer)

ในการส่งข้อมูลบนระบบ WDM ตัวรวมสัญญาณทางแสงมีหน้าที่รวมหรือมัลติเพล็กซ์สัญญาณทางแสงของแต่ละช่องสัญญาณเข้าด้วยกันลงบนเส้นใยนำแสงเพียงเส้นเดียว ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงตัวรวมสัญญาณทางแสงที่เป็นอุปกรณ์ประเภทพาสซีฟ (Passive devices) เท่านั้นซึ่งได้แก่ (1) ตัวคู่ต่อทางแสง (Optical Fiber Coupler) และ (2) Array Waveguide Grating (AWG) โดยมีรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.3.1.2.1 และ 2.3.1.2.2 ตามลำดับ

2.3.1.2.1 ตัวคู่ต่อทางแสง (Optical Fiber Coupler)

เป็นอุปกรณ์รวมสัญญาณทางแสงที่ทำมาจากเส้นใยนำแสง โดยมีโครงสร้างเป็นเส้นใยนำแสงหลายๆเส้นหลอมรวมกันแสดงดังรูปที่ 2.23[20] เงื่อนไขในการรวมแสง คือ ความยาวของเกลียวเส้นใยนำแสงที่พันกัน เมื่อป้อนสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันเข้ามาที่เส้นใยนำแสงขาเข้า แสงทั้งสองจะควบรวมจากสองเส้นขาเข้าไปเป็นแสงสองความยาวคลื่นออกมายังปลายเส้นใยนำแสงขาออกเพียงเส้นเดียว ดังนั้นตัวคู่ต่อทางแสงนี้สามารถรวมสัญญาณแสงได้ โดยไม่สนใจระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ ดังเช่น AWG ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป อย่างไรก็ตามการรวมสัญญาณทางแสงด้วยวิธีนี้จะมีการสูญเสียกำลังของแสง (Insertion Loss) ไปอย่างน้อย 3 dB ต่อการรวมแสง 2 ความยาวคลื่น

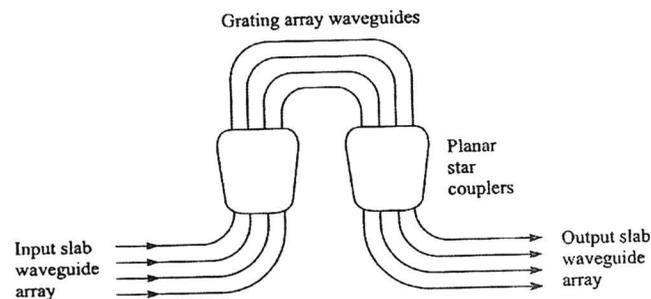


รูปที่ 2.23 โครงสร้างของ Optical Fiber Coupler

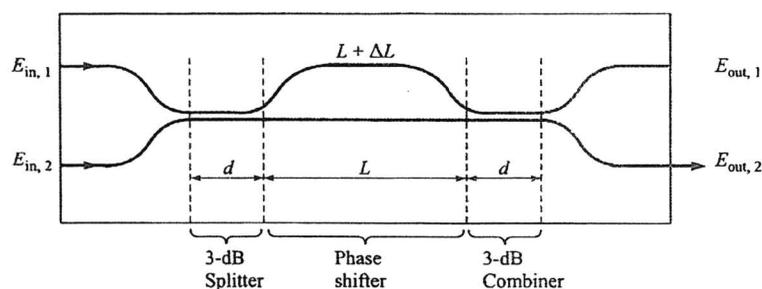
2.3.1.2.2 Array Waveguide Grating (AWG)

เป็นตัวรวมแสงที่มีโครงสร้างเป็นท่อนำแสง (Optical Wave Guide) แสดงดังรูปที่ 2.24 [20] ซึ่งสามารถรวมแสงได้ครั้งละหลายช่องสัญญาณ ภายในของ AWG มีองค์ประกอบหลัก 3 ส่วน คือ (1) ตัวแยกแสง (Splitter), (2) ท่อนำแสงแบบแถวลำดับเกรตติ้ง (Grating Array Waveguides), และ (3) ตัวรวมแสง (Combiner) มีหลักการการรวมแสงแบบ March Zehnder ดังรูปที่ 2.25 [20] กล่าวคือ แสงทุกช่องสัญญาณที่เข้ามาจะกระจายออกไปยังท่อนำแสงแบบแถวลำดับเกรตติ้งที่อยู่ใน AWG อย่างละเท่าๆกันโดยตัวแยกแสง จากนั้นแสงแต่ละช่องสัญญาณจะเดินทางผ่านท่อนำแสงแบบแถวลำดับเกรตติ้งที่ออกแบบให้มีความยาวของเส้นทางแตกต่างกันด้วยค่า ΔL เมื่อแสงทุกช่องสัญญาณเดินทางจนมาถึงปลายทางผ่านตัวรวมแสง แสงที่มีเฟสต่างไปจากเดิม 180 องศาจะหักล้างกันหมด ในท้ายที่สุดจะเหลือเส้นทางขาออกเพียงเส้นเดียวที่มีแสงครบทุกช่องสัญญาณ

ดังนั้นท่อนำแสงจะถูกออกแบบให้มีเงื่อนไขในการรวมแสง เฉพาะช่องสัญญาณที่มีระยะห่างเป็นไปตามมาตรฐาน ITU-T 694.1 ในปัจจุบัน AWG มีใช้งาน 2 ชนิด คือ (1) 100 GHz ครอบคลุมความยาวคลื่นในย่าน C และ L แบนด์ โดยรวมแสงได้พร้อมกันสูงสุด 40 ช่องสัญญาณ และ (2) 50 GHz ครอบคลุมความยาวคลื่นในย่าน C band รวมแสงได้พร้อมกันสูงสุดถึง 88 ช่องสัญญาณ [31] ข้อดีของ AWG คือ สามารถรวมสัญญาณพร้อมกันได้หลายช่องสัญญาณพร้อมทั้งมีค่า Insertion Loss ต่ำ



รูปที่ 2.24 โครงสร้างพื้นฐานของ AWG



รูปที่ 2.25 การรวมแสงแบบ March Zehnder

2.3.2 ภาครับสัญญาณทางแสง

ภาครับสัญญาณทางแสงมี 2 ประเภหลัก คือ (1) ตัวแยกสัญญาณทางแสง (De-Multiplexer) และ (2) ตัวรับสัญญาณทางแสง (Optical Receiver) โดยแต่ละองค์ประกอบมีรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.3.2.1 และ 2.3.2.2 ตามลำดับ

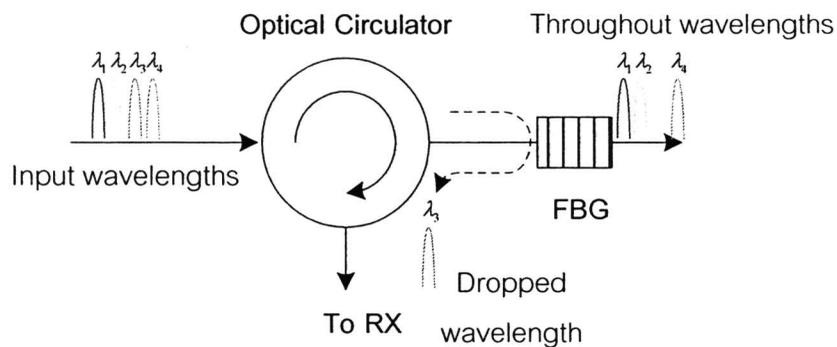
2.3.2.1 ตัวแยกสัญญาณทางแสง (De-Multiplexer)

ตัวแยกสัญญาณทางแสงทำหน้าที่แยกแสงแต่ละช่องสัญญาณออกจากกัน ซึ่งทำงานตรงข้ามกับตัวรวมสัญญาณทางแสง โดยอุปกรณ์ดังกล่าวจำแนกออกเป็น 2 ประเภท คือ (1) อุปกรณ์แพสซีฟ (Passive Devices) เป็นอุปกรณ์แยกแสงได้เฉพาะความยาวคลื่นที่กำหนดโดยโครงสร้างของอุปกรณ์ ได้แก่ Fiber Bragg Grating (FBG) และ AWG ซึ่งมีรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.3.2.1.1 และ 2.3.2.1.2 ตามลำดับ, และ (2) อุปกรณ์แอ็กทีฟ (Active Devices) มีหลักการทำงานเช่นเดียวกับอุปกรณ์แพสซีฟ แต่เพิ่มฟังก์ชันในการปรับเปลี่ยนการทำงานของอุปกรณ์แพสซีฟภายใน เพื่อแยกแสงที่ต้องการออกมาได้ ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะเป็นตัวกรองแสงแบบปรับได้ (Tunable Filter) ซึ่งมีรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.3.2.1.3

2.3.2.1.1 Fiber Bragg Grating (FBG)

FBG เป็นเส้นใยนำแสงที่มีโครงสร้างเป็นเกรตติงของดัชนีหักเหสูง-ต่ำสลับกันไป ซึ่งคาบเท่ากับระยะห่าง Bragg โดย FBG จะสะท้อนเฉพาะความยาวคลื่นที่สอดคล้องกับคาบของเกรตติงออกมามีรูปที่ 2.26 จากนั้นแสงที่สะท้อนกลับออกมาจะเดินทางผ่าน Optical Circulator ไปยังตัวรับสัญญาณทางแสงต่อไป

ดังนั้นถ้าต้องการแยกความยาวคลื่นใดออกมา เพียงเลือก FBG ให้มีค่าความยาวคลื่นสะท้อนให้ตรงตามที่ต้องการ แต่มีข้อเสียคือ FBG สามารถแยกแสงได้เพียงความยาวคลื่นเดียว ถ้าต้องการแยกความยาวคลื่นอื่นต้องเปลี่ยน FBG ใหม่ให้สอดคล้องกับความยาวคลื่นที่ต้องการ ดังนั้นจึงมีการนำ FBG ไปพัฒนาเป็นอุปกรณ์แอ็กทีฟโดยเพิ่มฟังก์ชันในการเลือกความยาวคลื่นใดๆ ออกมาซึ่งมีลักษณะเป็นตัวกรองแสงแบบปรับได้ดังรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.3.2.1.3



รูปที่ 2.26 หลักการทำงานของ FBG และ Optical Circulator

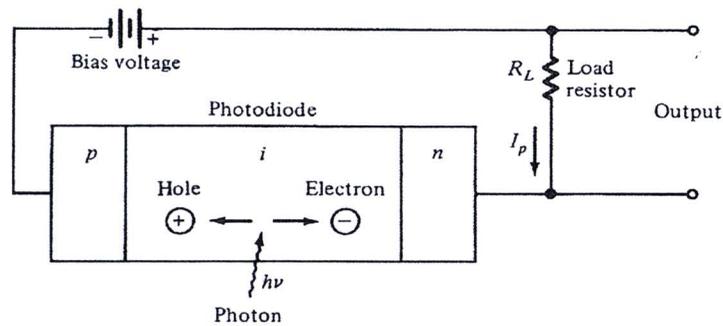
2.3.2.1.2 AWG

AWG สามารถนำมาใช้แยกแสงได้เช่นกันโดยรับแสงเข้ามาที่พอร์ตขาออกของ AWG ที่ใช้เป็นตัวรวมสัญญาณทางแสง ซึ่งแสงที่เข้ามานั้นจะต้องมีความยาวคลื่นสอดคล้องกับช่องสัญญาณของ AWG ด้วยเช่นกัน ซึ่งหลักการแยกแสงของ AWG มีลักษณะตรงข้ามกับกระบวนการรวมแสงตามที่ได้กล่าวไปในหัวข้อที่ 2.3.1.2.2 ในท้ายที่สุดจะสามารถแยกความยาวคลื่นในแต่ละช่องสัญญาณออกมาได้ ข้อดีของ AWG คือ สามารถแยกแสงได้พร้อมกันหลายช่องสัญญาณโดยที่มีค่า Insertion Loss ต่ำ

2.3.2.1.3 ตัวกรองแสงแบบปรับได้ (Tunable Filter)

ตัวกรองแสงแบบปรับได้เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแยกแสงตามความยาวคลื่นที่ต้องการได้ ซึ่งมีหลักการดังรูปที่ 2.27 กล่าวคือ แสงที่เข้ามาจะเดินทางผ่านตัวกรองสัญญาณทางแสงซึ่งสามารถเลือกความยาวคลื่นที่สนใจได้จากการปรับคุณลักษณะของตัวกรองสัญญาณทางแสง (Filter Transfer Function) ให้ตรงกับความยาวคลื่นที่ต้องการ ส่วนกระบวนการแยกแสงมีอยู่หลากหลายเทคโนโลยี ยกตัวอย่างเช่น Tunable 2X2 Directional Coupler, Fiber Fabry-Perot filter, Tunable Waveguide Array และ Tunable Multigrating Filter เป็นต้น [20] ข้อดีของตัวแยกแสงประเภทนี้ คือ สามารถแยกความยาวคลื่นใดของแสงออกมาก็ได้ตามคุณลักษณะของตัวกรองสัญญาณแสง แต่มีข้อเสียคือ ต้องใช้ไฟฟ้าควบคุมและแยกแสงออกมาได้เพียงครั้งละหนึ่งความยาวคลื่นเท่านั้น

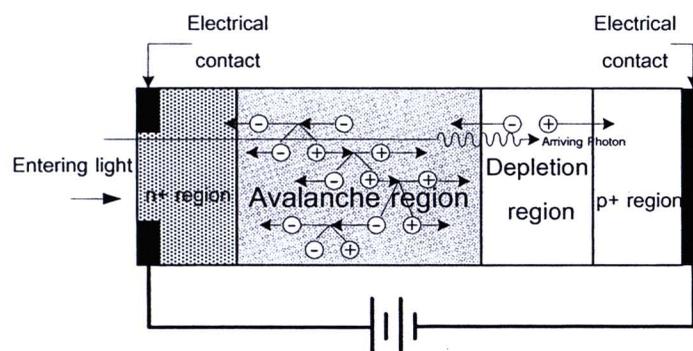
I_p) เดินทางผ่านตัวต้านทานโหลด (Load Resistor, R_L) และได้เป็นแรงดันไฟฟ้าขาออก ซึ่งมีขนาดขึ้นอยู่กับปริมาณแสงหรือจำนวนโฟตอนที่เข้ามาตรงกระทบ



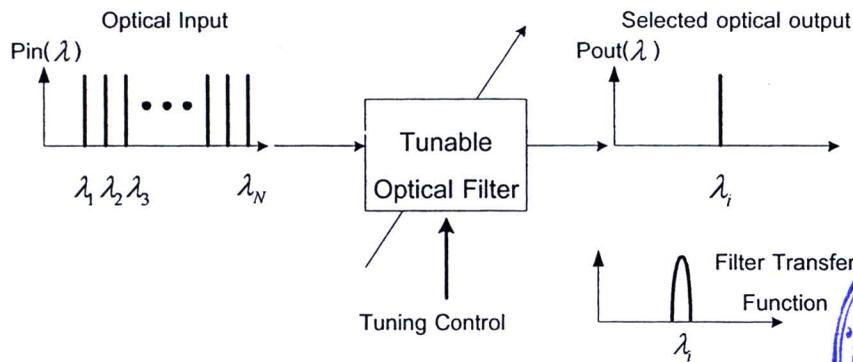
รูปที่ 2.28 โครงสร้างของตัวตรวจจับแสงชนิด PIN และวงจรป้อนแรงดันย้อนกลับ

2.3.2.2 ตัวตรวจจับแสงชนิด Avalanche Photo-Detector (APD)

APD เป็นตัวตรวจจับแสงอีกชนิดหนึ่งซึ่งมีหลักการทำงานเช่นเดียวกับตัวตรวจจับแสงชนิด PIN แต่มีการแทรกชั้น Avalanche เพิ่มขึ้นมาระหว่างชั้น n และ i แสดงดังรูปที่ 2.29 โดยชั้นดังกล่าวต้องการไฟกลับขั้วค่าสูงมาก เพื่อเร่งความเร็วของคู่อิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดจากการตกกระทบของโฟตอนในชั้น i ให้เร็วเพียงพอในการพุ่งชนกับอะตอมที่อยู่ในบริเวณ Avalanche เกิดเป็นคู่อิเล็กตรอนและโฮลคู่อื่นซึ่งมีความเร็วสูงเช่นกันจากปรากฏการณ์ Impact Ionization คู่อิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะชนกับอะตอมอย่างต่อเนื่องเป็นแบบลูกโซ่ ซึ่งเรียกว่า ปรากฏการณ์ถล่ม (Avalanche Effect) เปรียบเสมือนการคูณเพิ่มของกระแสแสง ส่งผลให้ตัวตรวจจับแสงชนิดนี้สามารถตรวจจับแสงที่มีระดับกำลังต่ำ ๆ ได้ และให้ค่าแรงดันขาออกที่สูงกว่าตัวตรวจจับแสงแบบ PIN



รูปที่ 2.29 โครงสร้างของตัวตรวจจับแสงชนิด APD



รูปที่ 2.27 กระบวนการแยกแสงด้วยตัวกรองแสงแบบปรับได้



2.3.2.2 ตัวรับสัญญาณทางแสง (Optical Receiver)

ตัวรับสัญญาณทางแสงมีองค์ประกอบหลัก คือ ตัวตรวจจับแสง (Photodetector) ทำหน้าที่แปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยสมรรถนะของตัวตรวจจับแสงพิจารณาได้จาก 3 พารามิเตอร์หลัก คือ (1) ค่า Power Sensitivity เป็นค่าระดับกำลังแสงต่ำที่สุดที่ตัวตรวจจับแสงสามารถตรวจจับได้ โดยที่ให้ค่า Signal to noise ratio (SNR) เท่ากับหนึ่ง, (2) ค่าแบนด์วิดท์ใช้งาน เป็นค่าบ่งบอกการตอบสนองของตัวตรวจจับแสงต่อสัญญาณแสงที่เข้ามา โดยที่ยังมีค่าแบนด์วิดท์สูงตัวตรวจจับแสงก็ยิ่งตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว และ (3) ค่า Responsivity เป็นค่าความสามารถในการแปลงโฟตอนเป็นอิเล็กตรอน หรือแปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าซึ่งยิ่งมีค่าสูงแสดงว่าตัวตรวจจับแสงนั้นๆ มีประสิทธิภาพที่ดี ตัวตรวจจับแสงที่นิยมใช้กันทั่วไปมีอยู่ 2 ชนิดคือ Positive-Intrinsic-Negative (PIN) และ Avalanche Photo-Detector (APD) มีรายละเอียดดังในหัวข้อ 2.3.2.2.1 และ 2.3.2.2.2 ตามลำดับ

2.3.2.2.1 ตัวตรวจจับแสงชนิด Positive-Intrinsic-Negative (PIN)

PIN เป็นตัวตรวจจับแสงที่มีความซับซ้อนน้อยที่สุด มีลักษณะโครงสร้างแสดงในรูปที่ 2.28 [20] คือ เป็นรอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่มีการเจือสารประเภทพีและเอ็น ณ บริเวณรอยต่อจะแทรกชั้น I (Intrinsic Region) ทำให้เกิดบริเวณปลอดประจุ (Depletion Region) ซึ่งใช้เป็นบริเวณสำหรับรับแสง โฟตอนที่เข้ามาตกกระทบ ดังนั้น PIN ต้องการไฟกลับขั้ว (Reversed Bias) เพื่อเพิ่มพื้นที่ I ให้มีขนาดกว้างขึ้น เมื่อมีแสงที่มีพลังงานมากกว่าระดับพลังงานแบนด์แก๊ป (Bandgap) ของตัวตรวจจับแสง เข้ามาตกกระทบบริเวณดังกล่าวจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮล (Electron-Hole Pair) โดยที่อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากชั้นวาเลนซ์ไปยังชั้นนำไฟฟ้า (Conduction Band) จากนั้นจะถูกพัดพาไปตามสนามไฟฟ้าที่เกิดจากไฟกลับขั้วเกิดเป็นกระแสแสง (Photo Current,

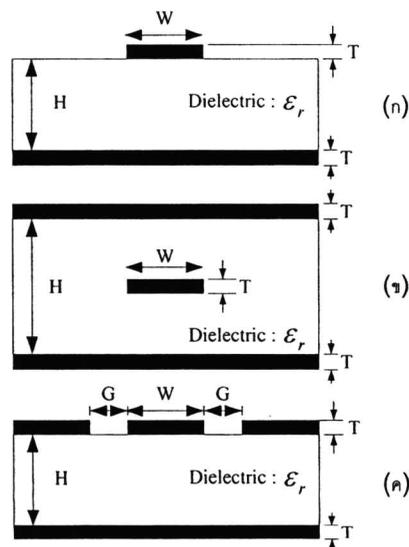
การเลือกใช้งานตัวตรวจจับแสงว่าจะเลือกใช้ชนิด PIN หรือ APD นั้นจะพิจารณาจากความเหมาะสมในการสื่อสารข้อมูลว่า จะนำตัวตรวจจับแสงนี้ไปประยุกต์ใช้เป็นตัวรับสัญญาณแสงสำหรับการสื่อสารข้อมูลระยะทางไกลมากน้อยเพียงใด ในกรณีที่นำไปใช้รับข้อมูลระยะทางสั้นตัวตรวจจับแสงชนิด PIN จะมีความเหมาะสมมากกว่า เพราะมีสัญญาณรบกวนน้อยกว่า และใช้พลังงานน้อยกว่าตัวตรวจจับแสงแบบ APD ในทางกลับกันถ้านำไปใช้รับข้อมูลระยะทางไกลตัวตรวจจับแสง APD จะมีความเหมาะสมมากกว่า เพราะสามารถรับแสงได้ในระดับกำลังต่ำๆ ได้ เนื่องจากมีค่า Power Sensivity ที่ดีกว่า

2.4 การออกแบบลายวงจรพิมพ์อัตราเร็วสูง

ในการออกแบบลายวงจรบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board, PCB) สำหรับการส่งข้อมูลความเร็วสูงอัตรา 10 Gb/s สิ่งสำคัญที่ควรคำนึงถึงมี 3 ส่วน คือ (1) ชนิดของลายวงจรพิมพ์, (2) ชนิดของสัญญาณอัตราเร็วสูง และ (3) อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของลายวงจร โดยแต่ละส่วนมีรายละเอียดในข้อ 2.4.1 ถึง 2.4.3 ตามลำดับ

2.4.1 ชนิดของลายวงจรพิมพ์

แผ่นวงจรพิมพ์ที่นิยมใช้สำหรับรับส่งข้อมูลความเร็วสูงมีโครงสร้างเป็นสายส่ง (Transmission Line) ซึ่งจำแนกออกเป็น 3 ชนิด คือ (1) สายส่งชนิดไมโครสตริป (Microstrip), (2) สายส่งชนิดสตริปไลน์ (Stripline), และ (3) สายส่งชนิดโคพลานาร์เวฟไกด์ (Coplanar Waveguide) แสดงภาพตัดขวางดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 ภาพตัดขวางของสายส่งแต่ละชนิด

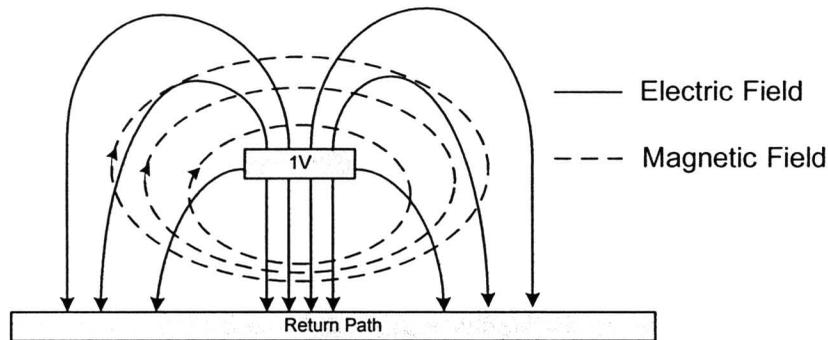
(ก) Microstrip Line (ข) Stripline (ค) Coplanar Waveguide

2.4.2 ชนิดของสัญญาณอัตราเร็วสูง

สัญญาณทางไฟฟ้าที่ใช้สำหรับรับส่งข้อมูลอัตราเร็วสูงจำแนกได้ 2 ชนิด คือ (1) สัญญาณแบบเดี่ยว (Single-Ended Signal) และ (2) สัญญาณแบบผลต่าง (Differential Signal) โดยมีรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.4.2.1 และ 2.4.2.2 ตามลำดับ

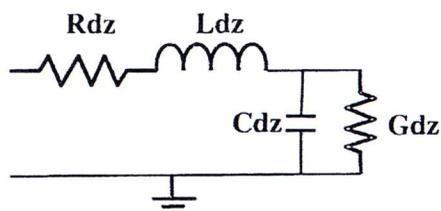
2.4.2.1 สัญญาณแบบเดี่ยว (Single-Ended Signal)

การกระจายของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าบนภาพตัดขวางของสายส่งชนิดไมโครสตริป โดยกำหนดให้สัญญาณเคลื่อนที่เข้าสู่กระดาษแสดงดังรูปที่ 2.31 เมื่อสัญญาณเดินทางเข้าสู่สายส่งจะเกิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กขึ้นบริเวณรอบตัวนำที่เป็นเส้นสัญญาณ (Signal Path) เนื่องจากการที่สัญญาณเดินทางเข้าไปนั้น ทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นระหว่างเส้นสัญญาณกับกราวด์ หรืออีกชื่อหนึ่งคือเส้นไหลกลับของกระแส (Current Return Path) จึงเกิดสนามไฟฟ้าจากเส้นสัญญาณไปยังชั้นกราวด์ และเมื่อมีการไหลของกระแสจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบตัวนำตามกฎมือขวา สัญญาณชนิดนี้เรียกว่า สัญญาณแบบเดี่ยว (Single-Ended Signal) [32]



รูปที่ 2.31 ทิศทางของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าของสายส่งแบบไมโครสตริป

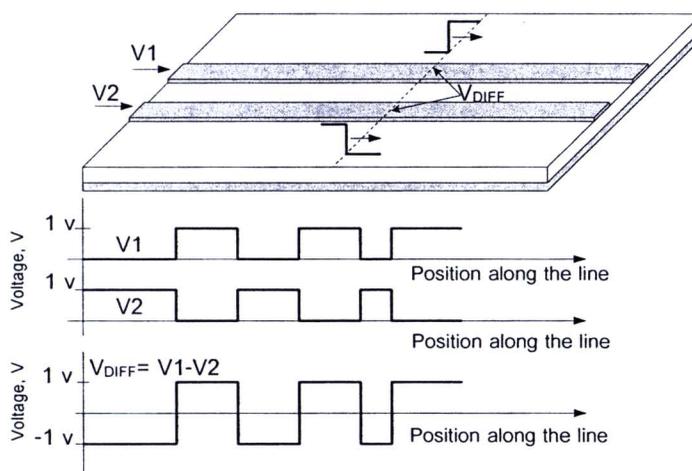
โดยทั่วไปสายส่งที่ใช้บนแผ่นวงจรพิมพ์นั้นมีความไม่เป็นอุดมคติอยู่ เนื่องจากคุณลักษณะของเนื้อตัวนำและชั้นไดอิเล็กตริก ดังนั้นแบบจำลองส่วนย่อยของสายส่งจึงถูกนำเสนอด้วยตัวต้านทานสองตัวคือ (1) ตัวต้านทานที่ต่ออนุกรม (R_{dz}) แทนการสูญเสียที่เกิดจากตัวนำ และ (2) ตัวต้านทานต่อขนาน (G_{dz}) แทนการสูญเสียที่เกิดจากชั้นไดอิเล็กตริกที่คั่นระหว่างตัวนำและชั้นกราวด์ นอกจากนี้ในแบบจำลองส่วนย่อยยังมีตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรม (L_{dz}) แทนสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น และตัวเก็บประจุที่ต่อขนาน (C_{dz}) แทนสนามไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างตัวนำและชั้นกราวด์ รวมเรียกแบบจำลองย่อยนี้ว่า หน่วยย่อย RLCG (RLCG element) แสดงรูปที่ 2.32 [32]



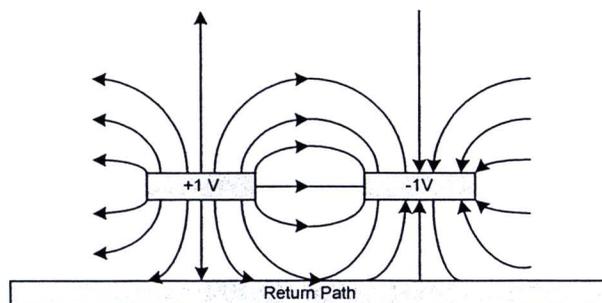
รูปที่ 2.32 แบบจำลองส่วนย่อยของสายส่ง

2.4.2.2 สัญญาณแบบผลต่าง (Differential Signal)

สัญญาณแบบผลต่างใช้แหล่งกำเนิดสัญญาณสองแหล่งที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน แต่มีเฟสของสัญญาณต่างกัน 180 องศา โดยสัญญาณดังกล่าวจะถูกขับบนสายส่งแบบคู่ต่าง (Differential Pair) ซึ่งเป็นสายส่งที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ แสดงรูปที่ 2.33 หรือเป็นสายส่งแบบเดี่ยวอยู่ใกล้กัน เมื่อสัญญาณทั้งสองเดินทางไปในสายส่งจะเกิดสนามไฟฟ้า เช่นเดียวกับสัญญาณแบบเดี่ยว แต่สัญญาณทั้งสองจะเกิดการ coupling กันแสดงดังรูปที่ 2.34 เนื่องจากมีผลต่างระหว่างแรงดันบนสายส่งทั้งสองเส้นซึ่งเรียกแรงดันนี้ว่า แรงดันผลต่าง (Differential Voltage, V_{DIFF}) [33]

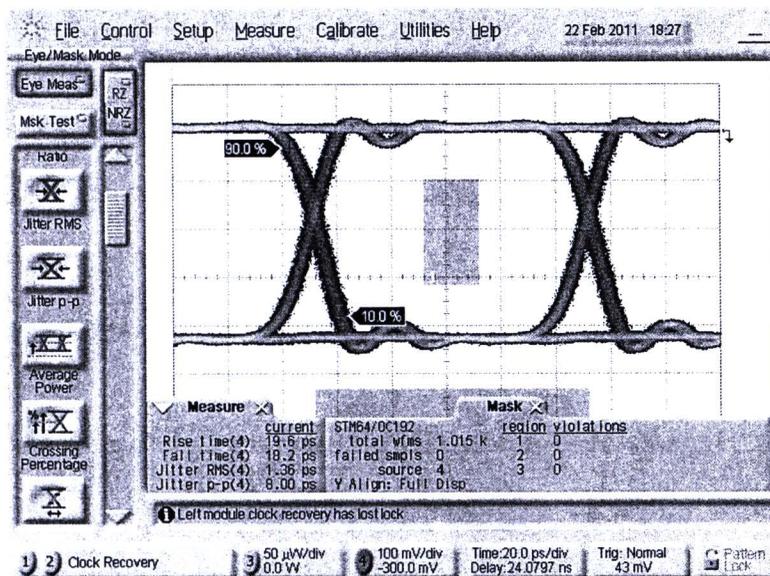


รูปที่ 2.33 การขับสัญญาณแบบผลต่าง

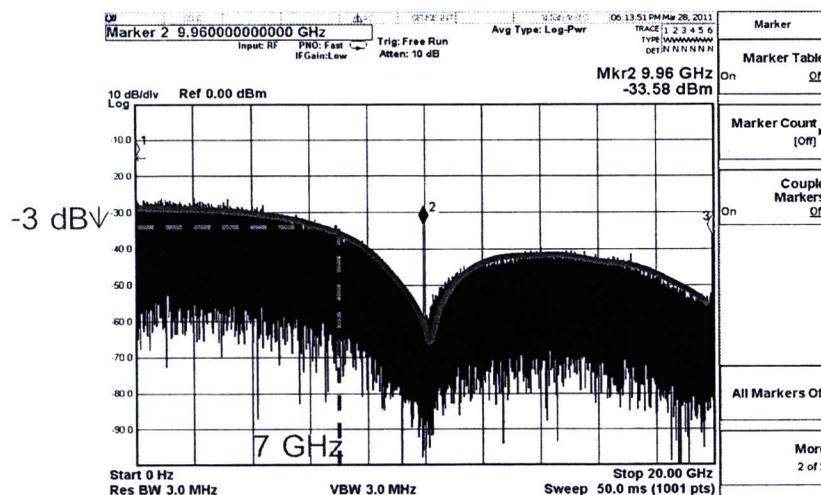


รูปที่ 2.34 ทิศทางของสนามไฟฟ้าของสัญญาณแบบผลต่าง

สำหรับสัญญาณอัตราเร็วสูง 10 Gb/s ที่ใช้งานในวิทยานิพนธ์นี้ มีทั้งสัญญาณชนิดแบบเดี่ยวและแบบผลต่าง โดยชนิดของข้อมูลบิตเป็นแบบลำดับข้อมูลสุ่มเทียม (Pseudo-Random Binary Sequence, PRBS) ของสัญญาณสี่เหลี่ยม (Square Wave Signal) ขนาด $2^{31}-1$ บิต ซึ่งมีขนาดแรงดัน Common Mode Logic (CML) V_{HI} เท่ากับ 0 V และ V_{LOW} เท่ากับ -0.4 V จากเครื่อง Bit Error Rate Rate Tester (BERT) โมดูล Pattern Generator Agilent 13.5 Gb/s serial BERT รุ่น N4901B [34] แสดงแผนภาพรูปตาของสัญญาณดังกล่าวดังรูปที่ 2.35 ด้วยเครื่อง Digital Communication Analyzer (DCA) โมดูล Agilent 20 GHz electrical module รุ่น 86105B [35] ส่วนสเปกตรัมของสัญญาณทางไฟฟ้าอัตรา 10 Gb/s แสดงดังรูปที่ 2.36 ซึ่งวัดค่าแบนด์วิดท์ประมาณ 7 GHz ด้วยเครื่อง Network Analyzer Agilent PNA-X รุ่น N5242A [36]



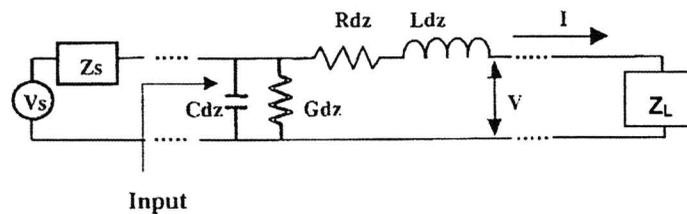
รูปที่ 2.35 แผนภาพรูปตาของสัญญาณ PRBS $2^{31}-1$ บิต อัตราข้อมูล 10 Gb/s



รูปที่ 2.36 สเปกตรัมของสัญญาณ PRBS $2^{31}-1$ บิต อัตราข้อมูล 10 Gb/s

2.4.3 อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายวงจรถ

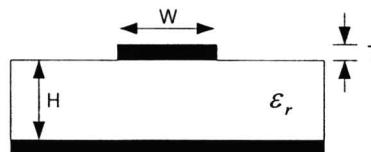
ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Z_0) คือ อัตราส่วนแรงดัน (V) ต่อกระแส (I) ของสัญญาณที่ตำแหน่งใดๆ บนสายส่ง แสดงดังรูปที่ 2.37 [32] ดังนั้นการออกแบบลายวงจรรวมความเร็วสูงต้องกำหนดให้ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งมีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดสัญญาณ (Z_s) และอิมพีแดนซ์ของโหลด (Z_L) เพื่อให้สัญญาณเดินทางได้อย่างต่อเนื่องและเกิดปัญหาการสะท้อนกลับน้อยที่สุด โดยการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งแบบไมโครสตริปมีอยู่ 2 ชนิด คือ (1) อิมพีแดนซ์ของสายส่งไมโครสตริปแบบเดี่ยว และ (2) อิมพีแดนซ์ของสายส่งไมโครสตริปแบบผลต่าง โดยมีรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.4.3.1 และ 2.4.3.2 ตามลำดับ



รูปที่ 2.37 แบบจำลองการเชื่อมต่อเส้นสัญญาณกับแหล่งกำเนิดสัญญาณและโหลด

2.4.3.1 อิมพีแดนซ์ของสายส่งไมโครสตริปแบบเดี่ยว

โครงสร้างของสายส่งไมโครสตริปแบบเดี่ยวแสดงดังรูปที่ 2.38 ประกอบด้วยส่วนบนสุดคือ เส้นทองแดงซึ่งเป็นเส้นสัญญาณ มีความกว้าง W และความหนา T วางอยู่บนแผ่นไดอิเล็กตริกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ϵ_r และมีความหนา H ส่วนชั้นล่างสุดเป็นแผ่นทองแดง ซึ่งทำหน้าที่เป็นชั้นกราวด์



รูปที่ 2.38 ภาพตัดขวางของสายส่งชนิดไมโครสตริปแบบเดี่ยว

สำหรับสัญญาณความเร็วดำ ค่า R_{dz} และ G_{dz} ในหน่วยย่อย RLCG ของสายส่งมีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์น้อย โดยค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งไมโครสตริปสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2.14) [32] ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะแปรผันตามค่าความหนาของไดอิเล็กตริก (H) แต่แปรผกผันกับค่าความกว้าง (W) และความหนาของเส้นสัญญาณ (T) และค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

$$Z_0 \approx \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1.41}} \ln \left(\frac{5.98H}{0.8W + T} \right) [\text{ohm}] \quad (2.14)$$

(Valid when $0.1 < W/H < 2.0$ and $1 < \epsilon_r < 15$)

สำหรับสัญญาณความเร็วสูง แบบจำลองของสายส่งจะต้องพิจารณาผลของค่า R_{dz} และ G_{dz} ด้วย ดังนั้นการคำนวณอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่ง จึงต้องเปลี่ยนมาใช้สมการที่ (2.15) [32] แทน ซึ่งเป็นสมการที่คำนวณโดยใช้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประสิทธิผล ϵ_e (effective ϵ) แทนค่า ϵ_r เนื่องจากสนามไฟฟ้ามีการกระจายตัวอยู่ในอากาศและในชั้นไดอิเล็กตริกของแผ่นวงจรพิมพ์ โดยที่ค่า ϵ_e นั้นคิดมาจากสัดส่วนระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของอากาศ ($\epsilon = 1$) และของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของชั้นไดอิเล็กตริก

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0 \epsilon_0}{\epsilon_e}} \frac{1}{C_a} \text{ [ohm]} \quad (2.15)$$

$$\text{โดยที่ } C_a = \begin{cases} \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(8H/W + W/4H)} & \text{when } \frac{W}{H} \leq 1 \\ \epsilon_0 \left[\frac{W}{H} + 1.393 + 0.667 \ln\left(\frac{W}{H} + 1.444\right) \right] & \text{when } \frac{W}{H} > 1 \end{cases}$$

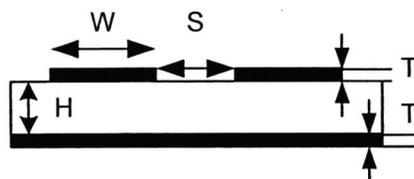
$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12H}{W} \right)^{-1/2} + F - 0.217(\epsilon_r - 1) \frac{T}{\sqrt{WH}}$$

$$\text{และ } F = \begin{cases} 0.02(\epsilon_r - 1) \left(1 - \frac{W}{H} \right)^2 & \text{when } \frac{W}{H} \leq 1 \\ 0 & \text{when } \frac{W}{H} > 1 \end{cases}$$

2.4.3.2 อิมพีแดนซ์ของสายส่งไมโครสตริปแบบผลต่าง

ในการคำนวณหาอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของเส้นสัญญาณไมโครสตริปแบบผลต่าง แสดงภาพตัดขวางดังรูปที่ 2.39 สามารถคำนวณอิมพีแดนซ์คุณลักษณะแบบผลต่างได้ดังสมการที่ (2.16) [33] โดยที่ Z_0 คือ อิมพีแดนซ์ของเส้นสายส่งไมโครสตริปแบบเดี่ยวซึ่งคำนวณจากสมการที่ (2.15), S คือ ระยะห่างระหว่างขอบเส้นสัญญาณ และ H คือความหนาของชั้นไดอิเล็กตริก

$$Z_{Diff} = 2Z_0 \left[1 - 0.48 \exp\left(-0.96 \frac{S}{H}\right) \right] \text{ [ohm]} \quad (2.16)$$



รูปที่ 2.39 ภาพตัดขวางของสายส่งชนิดไมโครสตริปแบบผลต่าง