โครงการวิจัยย่อยลำดับที่ 16

เรื่อง การเพิ่มประสิทธิภาพและปริมาณการส่งข้อมูลในระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง ปีที่ 4
(ช่วงระยะทำงานปีที่ 4 ระหว่าง 1 มิ.ย. 2549 - 31 พ.ค. 2550)

ชื่อผู้รับผิดชอบโครงการ อาจารย์ ดร. ดวงฤดี วรสุชีพ

ปัญหา และความเป็นมา

ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงเป็นเทคโนโลยีใหม่ใช้กันอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ เนื่องจากสมรรถภาพอันสูงทั้งปริมาณการส่งข้อมูลที่มากกว่าสื่อประเภทอื่นๆ และระยะทางส่งได้ไกลกว่า หากแต่ระบบนี้ยังไม่เป็นที่รู้จักดีในประเทศไทย หนึ่งในสาเหตุอาจมาจากการลงทุนสูงในการวางสายเคเบิลเส้นใยนำแสงต่อกันเป็นเครือข่าย ทำให้จำนวนเครือข่ายมีน้อยและเนื้อที่ครอบคลุมถูกจำกัดด้วยวงเงินลงทุน อีกทั้ง แต่ละเครือข่ายถูกออกแบบมาจำเพาะเพื่อการใช้งานภายในองค์กรนั้นๆ จึงขาดความสามารถในการเชื่อมโยงเข้าถึงกันเพื่อการแลกเปลี่ยนข้อมูลได้อย่างทั่วถึง ยิ่งไปกว่านั้น อุปกรณ์รับส่งสัญญาณแสงก็มีราคาแพงมากเพราะต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ส่วนใหญ่จะสั่งซื้อทั้งระบบมาติดตั้งทีละครั้งคราวไปตามความต้องการที่เพิ่มขึ้น ถ้าหากระบบที่ถูกเลือกมาดีเยี่ยมแต่กลับไม่เหมาะสมกับเครือข่ายที่ได้ลงทุนวางลงไป ก็จะทำให้ไม่ได้รับประโยชน์อย่างเต็มที่ หรืออย่างกรณีที่เครือข่ายเดิมไม่สามารถรองรับระบบใหม่ได้ จนจำเป็นต้องมีการวางเครือข่ายเส้นใยนำแสงชนิดใหม่ขึ้นมาใช้แทน อันถือว่าเป็นการสิ้นเปลืองทรัพยากร และไม่ได้ใช้ประโยชน์จากสิ่งที่ลงทุนไปแล้วให้คุ้มค่าและเต็มประสิทธิภาพมากที่สุด ดังนั้น จึงสมควรที่จะศึกษาและวิเคราะห์ระบบสื่อสารบนเครือข่ายเส้นใยนำแสงที่มีใช้งานอยู่จริงในประเทศไทย เพื่อสามารถบ่งชี้ถึงขีดจำกัดของเครือข่ายนั้นๆ และช่วยให้ข้อเสนอแนะในการเพิ่มประสิทธิภาพและปริมาณการส่งข้อมูลของระบบให้มากขึ้น

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาและวิเคราะห์ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงบนเครือข่ายเส้นใยนำแสงที่มีใช้งานอยู่จริง
2. ตรวจวัดสภาพและค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญๆ ของเส้นใยนำแสง เพื่อใช้เป็นข้อมูลในงาน simulation

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. เสนอแนะวิธีการต่างๆ ที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพและปริมาณการส่งข้อมูลของเครือข่ายเส้นใยนำแสง
4. ออกแบบและประกอบชุดสาธิตตัวส่งและตัวรับสัญญาณทางแสงอัตราความเร็วสูงถึง 2.5 Gb/s
5. ทดลองรับส่งข้อมูลความเร็วสูงผ่านช่องสัญญาณแสงแบบ WDM (Wavelength Division Multiplexing)

<u>แนวเหตุผล และทฤษฎี</u>

การเพิ่มประสิทธิภาพและปริมาณการส่งข้อมูลในระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง ได้ถูกคิดค้นขึ้นมาไว้หลากหลายวิธี ขึ้นอยู่กับความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและอุปกรณ์ที่หาได้ในแต่ละยุคสมัย แต่โดยหลักการแล้วสามารถแบ่งออกเป็นสองแนวทางหลักคือ การเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลให้เร็วขึ้น และการเพิ่มจำนวนช่องส่งสัญญาณให้มากขึ้น

สำหรับแนวทางแรก จำนวนเส้นใยนำแสงที่วางเชื่อมโยงไว้เป็นเครือข่ายยังคงเท่าเดิม แต่เพิ่มอัตราการส่งข้อมูลในแต่ละช่องสัญญาณแสงให้เร็วขึ้น ข้อจำกัดของการเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลขึ้นอยู่กับอัตราความเร็วสูงสุดในการรับส่งและประมวลผลสัญญาณของอุปกรณ์ติดตั้งในระบบ อาทิ เช่น ตัวมอดูเลตสัญญาณแสงที่สามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราความเร็วสูงสุด 10×10^9 บิดต่อวินาทีหรือ 10 Gb/s ถ้าหากต้องการความเร็วที่สูงขึ้นอีก อาจต้องใช้เทคโนโลยีอื่นที่สามารถกำเนิดแสงแบบ Ultra short pulse ปัญหาที่ตามมาเมื่ออัตราการส่งข้อมูลเร็วขึ้นคือ การเพิ่มขึ้นของสัญญาณสอดแทรกและปริมาณคลื่นรบกวน ซึ่งจะทำให้กระบวนการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์สำคัญๆ ในการออกแบบระบบจำเป็นต้องมีความละเอียดรอบคอบมากขึ้น เพื่อการคัดเลือกตัวอุปกรณ์ที่เหมาะสมมาประกอบใช้งาน อีกทั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แสงที่ความเร็วสูงก็หายากและมีราคาแพงทำให้ต้นทุนโดยรวมของระบบยิ่งสูงมากขึ้น ดังนั้น การนำแนวทางนี้มาประยุกต์ใช้งานอาจปฏิบัติได้ถึงแค่ระดับอัตราความเร็วระดับหนึ่ง ซึ่งจะไม่เพิ่มค่าการลงทุนมากจนเกินไปกว่าประโยชน์ที่จะได้รับกลับคืนมา

สำหรับแนวทางที่สอง การเพิ่มจำนวนช่องส่งสัญญาณในระบบสามารถกระทำได้หลายวิธี วิธีแรกคือการวางสายเคเบิลเส้นใยนำแสงเพิ่ม แต่วิธีนี้ไม่ได้ใช้ประโยชน์จากเครือข่ายเดิมและเป็นการลงทุนที่สูง วิธีถัดไปซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันในปัจจุบันคือเทคนิคการมัลติเพลกซ์สัญญาณตามค่าความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing, WDM) จำนวนช่องส่งสัญญาณทั้งหมดในแต่ละเส้นใยนำแสงจะเท่ากับจำนวนค่าความยาวคลื่นแสงที่แตกต่างกัน ทำให้การเพิ่มจำนวนช่องส่ง

สัญญาณทีละน้อยเพื่อตอบสนองต่อความต้องการส่งข้อมูลที่ค่อยๆ มีมากขึ้นและวงเงินในการปรับปรุงระบบที่จำกัดก็สามารถปฏิบัติตามได้ อุปกรณ์สำคัญที่ต้องติดตั้งเสริมคือตัวมัลติเพลกซ์ทางแสง (optical multiplexer) และตัวดีมัลติเพลกซ์ทางแสง (optical demultiplexer) เพื่อใช้สำหรับรวบรวมและแยกแยะสัญญาณแสงของแต่ละช่องสัญญาณแสงตามลำดับ คุณสมบัติต่างๆ ของตัวอุปกรณ์เสริมต้องมีการพิจารณาอย่างรอบคอบพร้อมไปกับปัจจัยอื่นๆ ที่คำนึงถึงในการออกแบบระบบ อาทิเช่น ระยะระหว่างความยาวคลื่น (channel spacing) ที่เกิดปัญหาสัญญาณสอดแทรกและกวนกันน้อยที่สุด จำนวนช่องสัญญาณแสงเข้าออกมากสุดที่จะเหมาะสมกับขนาดของเครือข่าย และอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณการรับส่งข้อมูลในอนาคต และท้ายที่สุด ปริมาณการสูญเสียกำลังแสงเมื่อส่งผ่านอุปกรณ์สำหรับใช้ในการวิเคราะห์งบประมาณกำลังในแต่ละช่วงต่อของเครือข่าย ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการตรวจวัดสภาพและค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญๆ ของเครือข่ายเส้นใยนำแสงก่อนที่จะสามารถนำเทคนิค WDM มาประยุกต์ใช้งานได้อย่างเหมาะสมเพื่อเพิ่มปริมาณการส่งข้อมูลให้มากที่สุด

<u>ขั้นตอนการวิจัย</u>

แผนการดำเนินงานสำหรับระยะเวลาทำงาน 2 ปีหลัง (1 มิ.ย. 2548 - 31 พ.ค. 2550) มีดังแสดงในตารางข้างล่างนี้

เดือน																							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
P1																							
P2																							
												P3											
																						P4	

Phase 1: ตรวจวัดและเก็บรวบรวมข้อมูลค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ของเส้นใยนำแสงบนเครือข่ายเส้นใยนำแสงภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยด้วยเครื่องมือวัด OTDR แล้วเชื่อมต่อเครือข่ายให้ได้ระยะทางไกลมากสุดไว้สำหรับการทดลองรับส่งสัญญาณแสงด้วยชุดสาธิตที่ประกอบขึ้นผ่านเครือข่ายจริง

Phase 2: เพิ่มอัตราการส่งข้อมูลของชุดสาธิตตัวส่งและตัวรับสัญญาณแสงที่ประกอบขึ้น ให้มีความเร็วจาก 155 Mb/s สูงขึ้นไปถึง 2.5 Gb/s ต่อจากนั้นออกแบบแผ่นวงจร

อิเล็กทรอนิกส์ความเร็วสูงเองด้วยซอฟแวร์ที่จะจัดซื้อและประกอบชุดสาธิตเพิ่มขึ้นอีกอย่างน้อย 2 ชุด และเขียนรายงานสรุปผลงานในปีแรก

Phase 3: ทดลองรับส่งสัญญาณแสงโดยไม่ให้มีบิตผิดพลาดเกิดขึ้นที่ความเร็ว2.5 Gb/s เมื่อใช้ช่องส่งสัญญาณแบบ WDM อย่างน้อย 3 ช่องสัญญาณร่วมกันในหนึ่งเส้นใยนำแสง ตรวจสอบถึงอุปสรรค ความเป็นไปได้ และวัดค่าความสัมฤทธิผลของการรับส่งสัญญาณแสง

Phase 4: ผลลัพธ์ที่ได้จากงาน simulation โดยการป้อนข้อมูลจริงลงใน Optiwave™ simulation software จะสามารถนำมาใช้คาดการณ์ถึงขีดจำกัดและประสิทธิภาพที่สูงสุดของการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายเส้นใยนำแสง ท้ายที่สุดเขียนรายงานสรุปผลโครงการ

ขอบเขต และเป้าหมาย

โครงการวิจัยนี้เน้นที่จะให้ผู้วิจัยและนิสิตได้มีโอกาสสัมผัสกับระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงที่มีใช้งานอยู่จริง เช่น เครือข่ายเส้นใยนำแสงภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ตอบรับให้ความร่วมมือมาแล้ว โดยให้มีส่วนร่วมในกระบวนการวัดค่าพารามิเตอร์สำคัญต่างๆ ของเส้นใยนำแสง ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสบการณ์การเรียนรู้แบบทำจริง (Hands-on) ส่วนขอบเขตของงานในทางปฏิบัติย่อมขึ้นอยู่กับขีดความร่วมมือของเจ้าของเครือข่ายว่าจะยอมให้กลุ่มวิจัยเข้าเก็บรวบรวมข้อมูลได้มากน้อยเพียงใดทราบที่ไม่กระทบกระเทือนถึงการบริการรับส่งข้อมูลสดบนเครือข่าย หลังจากนั้น ข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้จะถูกนำมาวิเคราะห์และใช้เป็นฐานข้อมูลจริงในงาน simulation ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะสามารถบ่งชี้ถึงข้อจำกัดและประสิทธิภาพสูงสุดของการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายเส้นใยนำแสงนั้นๆ สำหรับเป้าหมายหลักของงานวิจัยนี้คือ การเสนอแนะวิธีการและขั้นตอนที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและปริมาณการส่งข้อมูลในเครือข่าย โดยที่วิธีการเหล่านั้นสามารถนำมาทดลองปฏิบัติตามและประยุกต์ใช้งานได้จริง

ผลการศึกษาวิจัย

จากผลการศึกษาและวิเคราะห์เครือข่ายเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดี่ยว (Single Mode Fiber, SMF) ที่มีใช้งานอยู่ภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยหรือ CHULANET ด้วยเครื่องมือวัด OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) ในช่วงระยะทำงานปีก่อน พบว่า SMF ยังสามารถใช้งานได้ดีอยู่ถึงแม้ว่าคุณภาพด้านค่าการสูญเสียกำลังจะวัดได้ที่ค่า 0.49 - 0.96 dB/km ซึ่งสูงมากกว่าค่ามาตรฐานปรกติที่ 0.2 – 0.3 dB/km อยู่บ้าง สาเหตุเนื่องมาจากอายุการใช้งานที่ SMF ได้ถูกติดตั้งไว้

มากว่า 10 ปี อีกทั้งที่ปลายเส้นใยนำแสงทุกเส้นมีการเชื่อมต่อกันแบบ Splice และใช้หัวต่อชนิด ST ที่มีค่า insertion loss ที่สูงกว่าหัวต่อชนิดใหม่ๆ หากด้วยระยะทางในการรับส่งข้อมูลภายในเครือข่ายที่ไม่ไกลมากนัก จึงยังคงใช้งาน SMF เหล่านั้นได้อยู่ แต่เมื่อพิจารณาถึงความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้ในงานทดลองวิจัยก็ปรากฏว่าไม่สามารถทำได้ เนื่องจากไม่มีเครือข่าย SMF ที่เชื่อมต่อมายังชั้น 13 ของอาคารเจริญวิศวกรรม ซึ่งเป็นที่ตั้งของห้องปฏิบัติการวิจัยของทีมงานวิจัย ทำให้ต้องปรับเปลี่ยนแผนการทดลองรับส่งสัญญาณแสงไปใช้ SMF ที่ได้รับความอนุเคราะห์บริจาคให้เป็นตัวอย่างจากบริษัท ไทยไฟเบอร์ออพติคส์ จำกัด เป็นจำนวนทั้งหมด 28 ม้วน แบ่งเป็นสองประเภทคือ (1) Standard SMF ความยาวรวมประมาณ 55 กิโลเมตร และ (2) TrueWave SMF ความยาวรวมประมาณ 50 กิโลเมตร โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ระบุมาให้ด้วย ซึ่งความยาวรวมดังกล่าวมีค่ามากกว่าระยะทางรวมภายในเครือข่าย CHULANET และผลการทดลองที่ได้จากการใช้ SMF เหล่านี้ก็สามารถเปรียบเทียบได้กับการรับส่งสัญญาณแสงบนเครือข่ายจริงเพราะ SMF ประเภทแรกเป็นชนิดเดียวกันกับที่มีการติดตั้งใช้งานโดยทั่วไป

จากแนวเหตุผลและทฤษฎีที่ได้กล่าวไปแล้วว่ามีสองแนวทางหลักในการเพิ่มประสิทธิภาพและปริมาณการส่งข้อมูลในระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงคือ การเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลให้เร็วขึ้นและการเพิ่มจำนวนช่องส่งสัญญาณให้มากขึ้น ทั้งสองแนวทางนี้สามารถนำมาผสมประสานใช้งานร่วมกันได้ กล่าวคือ ทั้งเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลในแต่ละช่องสัญญาณให้เร็วขึ้นถึงระดับ Gb/s พร้อมกับเพิ่มจำนวนช่องส่งสัญญาณแสงแบบ WDM ให้มากกว่าหนึ่งช่องสัญญาณต่อหนึ่งเส้นใยนำแสง แต่จะกระทำได้ถึงแค่ระดับหนึ่งเท่านั้นจึงจะคุ้มกับการลงทุนและนำไปปฏิบัติใช้งานจริงได้ เพราะความต้องการในการรับส่งข้อมูลบนเครือข่ายภายในมหาวิทยาลัยหรือในระดับ LAN (Local Area Network) ในปัจจุบันยังมีความต้องการไม่มากถึงขนาด 10 Gb/s ต่อหนึ่งช่องสัญญาณ ที่ซึ่งจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์หายากและมีราคาแพง ด้วยเหตุผลนี้เอง ทางทีมงานวิจัยจึงเลือกแนวทางแรกคือการเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลให้เร็วขึ้นมาดำเนินการก่อนในช่วงระยะทำงานปีที่ 2 และ 3 โดยได้ตั้งเป้าในการออกแบบและประกอบชุดสาธิตตัวส่งและตัวรับสัญญาณแสงให้มีอัตราการรับส่งข้อมูลสูงสุดจากค่าทั่วไปที่ 155 Mb/s เพิ่มขึ้น 16 เท่าเป็น 2.5 Gb/s สำหรับใช้ในการทดลองรับส่งข้อมูลของแต่ละช่องส่งสัญญาณแสงแบบ WDM ซึ่งทางทีมงานวิจัยก็สามารถประกอบชุดสาธิตชุดแรกขึ้นได้สำเร็จ ถึงแม้จะประสบปัญหาและล่าช้าด้านความพร้อมของเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ชิ้นส่วนสำคัญต่างๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในกระบวนการประกอบชุดสาธิต สำหรับในช่วงระยะทำงานปีที่ 4 ซึ่งเป็นปีสุดท้าย ทางทีมงานวิจัยได้นำแนวทางที่สองคือการเพิ่มจำนวนช่องส่งสัญญาณแสงแบบ WDM มาทำการศึกษา

โดยได้ประกอบชุดสาธิตตัวส่งสัญญาณแสงเพิ่มอีก 2 ชุด เพื่อให้มีอย่างน้อย 3 ช่องสัญญาณแสงในการทดลองรับส่งสัญญาณแบบ WDM เมื่อใดที่เครือข่ายมีความต้องการส่งข้อมูลเพิ่มมากขึ้นในอนาคต ก็สามารถเสียบเพิ่มจำนวนช่องส่งสัญญาณแสงแบบ WDM ได้ทันที ซึ่งจะเป็นการใช้ประโยชน์จากเส้นใยนำแสงคู่เดิมอย่างเต็มที่ แทนที่จะต้องเปลี่ยนไปใช้คู่ใหม่หรือติดตั้งเพิ่มเติม ซึ่งจะเป็นการพิสูจน์ถึงการเพิ่มประสิทธิภาพและปริมาณการส่งข้อมูลในระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสงให้มากที่สุดนั้นเอง

<u>ส่วนงานที่ได้ดำเนินการไปในระยะทำงานปีที่ 4 (ปีสุดท้าย)</u>

1) เพื่อสามารถทดลองรับส่งสัญญาณแสงแบบ WDM โดยให้มีอย่างน้อย 3 ช่องสัญญาณแสงส่งร่วมกันไปภายในหนึ่งเส้นใยนำแสง จึงได้จัดซื้ออุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์อื่นๆ ที่จำเป็นในการทดลองสำหรับมาประกอบเป็นชุดสาธิตตัวส่งสัญญาณแสงเพิ่มเติมอีก 2 ชุด (จากเดิมที่ทำไว้ 1 ชุดเมื่อปีก่อน) ดังรายการต่อไปนี้

    1. ตัวเลเซอร์ 10 Gb/s แบบ EML (Electro-absorption Modulation Laser) รุ่น E4560H32 (1551.72 nm) และ E4560D33 (1550.92 nm) อย่างละ 1 ตัว ของบริษัท CyOptics ซึ่งเป็นชนิดที่แตกต่างไปจากตัวเลเซอร์ 2.5 Gb/s แบบ DML (Direct Modulation Laser) รุ่น D572 (1552.52 nm) ที่ใช้ประกอบในชุดสาธิตชุดแรก เหตุผลที่เปลี่ยนชนิดของเลเซอร์ก็เพราะขีดจำกัดของอัตราความเร็วสูงสุดในการมอดูเลตสัญญาณข้อมูลที่เพิ่มขึ้น เพื่อทำให้สามารถศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการส่งข้อมูลความเร็วสูงขึ้นจาก 2.5 Gb/s ไปเป็น 10 Gb/s (ถ้าเป็นไปได้ในอนาคต) แต่เนื่องจาก EML ทั้งสองตัวนี้จำเป็นต้องใช้งานร่วมกับอุปกรณ์เสริมอื่นๆ อีกหลายอย่าง เช่น Laser driver, Laser mount, Current controller และ Temperature controller จึงต้องจัดซื้อด้วย
    2. ตัวตรวจจับแสง 10 Gb/s แบบ APD (Avalanche Photo-Detector) รุ่น R195A ของบริษัท CyOptics (ซึ่งมีค่าความเร็วสูงสุดในการตรวจจับและขยายสัญญาณข้อมูลที่เร็วขึ้นกว่า 2.5 Gb/s APD รุ่น P173A ที่ใช้ประกอบในชุดสาธิตชุดแรก) สำหรับไว้ตรวจจับข้อมูลความเร็วสูงที่อาจส่งมาจากตัวเลเซอร์ 10 Gb/s EML และเนื่องจาก APD ความเร็วสูงนี้จำเป็นต้องใช้งานร่วมกับ Clock and Data Recovery จึงต้องจัดซื้อด้วย
    3. Laser driver evaluation board ชนิด EAM (Electro-Absorption Modulator) ซึ่งมีชิป MAX3941 ของบริษัท MAXIM ไว้สำหรับขยายสัญญาณข้อมูลให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและมี

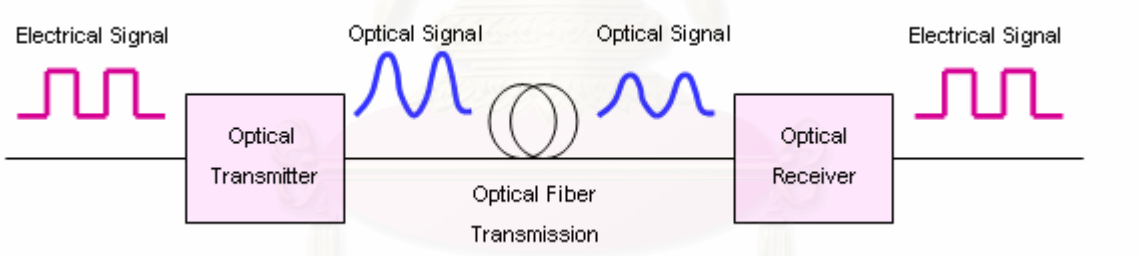
ระดับไบแอสที่พอเหมาะในการขับ EAM ที่ควบรวมอยู่ใน EML หลังจากที่ได้ศึกษาและทำการทดสอบบอร์ดแล้วว่าสามารถใช้งานสำหรับการขับข้อมูลความเร็ว 2.5 Gb/s ได้เป็นที่เรียบร้อยแล้ว (ดังมีรายละเอียดในรายงานครึ่งปี) จึงได้ทำการสั่งซื้อเฉพาะตัวชิป MAX3941 เพิ่มเติมอีก 8 ตัวเพื่อมาไว้สำหรับบัดกรีลงในชุดสาธิตตัวส่งสัญญาณทางแสงที่ประกอบอีก 2 ชุดต่อไป

4. Thermoelectric temperature controller board รุ่น LDT-5100 และ Current controller board รุ่น LDX-3100 ของบริษัท ILX Lightwave จำเป็นต้องใช้สำหรับควบคุมอุณหภูมิและระดับกระแสไบแอสของเลเซอร์ ตามลำดับ ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการใช้งานและมีค่าความยาวคลื่นแสงตรงตามที่ต้องการ โดยทั้งสองบอร์ดนี้จะต้องมีการต่อสายสำหรับเชื่อมต่อไฟเลี้ยงและสัญญาณขาเข้า-ออกที่เหมาะสมเข้าที่ขาต่างๆ ไปยังตัวเลเซอร์ ซึ่งเป็นการประกอบสายต่อชนิด interconnect cable D-7 (รุ่น CC-305S) และ D-15 (รุ่น CC-505S) เข้ากับ 7-pin butterfly laser mount รุ่น LDM-4983 ที่ใช้สำหรับติดตั้งตัวเลเซอร์ EML
5. Clock and Data Recovery (CDR) evaluation board ซึ่งมีชิป MAX3891 ของบริษัท MAXIM ไว้สำหรับกู้คืนสัญญาณข้อมูลและสัญญาณนาฬิกาออกจากสัญญาณขาออกของตัวตรวจจับแสง เพื่อให้ได้สัญญาณข้อมูลที่ดีคมชัดและมีขนาดใหญ่ขึ้นเหมาะสำหรับการตรวจวัดหาค่าอัตราบิตผิดพลาด (Bit Error Rate, BER) ต่อไป
6. WDM Multiplexer สำหรับรวมสัญญาณแสง 3 ช่องสัญญาณ ในการทดลองนี้จะใช้ตัว fiber optic coupler 2 ตัว ซึ่งได้ทำการทดสอบว่าสามารถใช้งานได้เป็นที่เรียบร้อยแล้ว (ดังมีรายละเอียดในรายงานครึ่งปี)
7. WDM Demultiplexer สำหรับแยกหนึ่งช่องสัญญาณแสงที่สนใจ ออกจากทั้ง 3 ช่องสัญญาณแสงที่ส่งร่วมกันมาในหนึ่งเส้นใยนำแสง ในที่นี้คือช่องสัญญาณแสงตรงกลางที่ค่า 1551.72 nm เพื่อทำการทดลองวัดหาค่า BER ของช่องสัญญาณนั้นๆ ว่ามีค่าได้ต่ำตรงตามมาตรฐานที่ 10^{-9} หรือไม่ หลังจากที่ได้ศึกษาหลากหลายตัวเลือกและพยายามติดต่อสอบถามราคาของดีมัลติเพล็กชนิด AWG (Arrayed Waveguide Grating) แต่ก็ไม่เป็นผลสำเร็จ จึงตัดสินใจใช้ fiber bragg grating ร่วมกับตัว optical circulator สำหรับการทดลองที่จะรายงานผลต่อไป

2) ทำการทดลองรับส่งสัญญาณแสงแบบ WDM ผ่านเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดี่ยว โดยจะทดสอบว่าไม่มีบิตผิดพลาดเกิดขึ้นที่อัตราข้อมูลความเร็ว 2.5 Gb/s ซึ่งมีรายละเอียดของการทดลองดังที่จะกล่าวต่อไปนี้

การวิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพและปริมาณการส่งข้อมูลด้วยวิธีการส่งสัญญาณข้อมูลหลายความยาวคลื่น หรือ WDM ผ่านเส้นใยนำแสงเส้นเดียวกัน เป็นการใช้ประสิทธิภาพของเส้นใยนำแสงให้คุ้มค่ามากยิ่งขึ้น ปริมาณข้อมูลถูกส่งมาจากแหล่งข้อมูลต่างๆ กัน โดยแต่ละข้อมูลจะมีความยาวคลื่นที่แตกต่างกันทำให้สามารถที่จะส่งสัญญาณข้อมูลเหล่านี้ไปด้วยกันได้

องค์ประกอบหลักของระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง โดยพื้นฐานจะประกอบด้วยตัวส่งสัญญาณทางแสง (Optical Transmitter) เป็นแหล่งกำเนิดแสงและทำการเปลี่ยนสัญญาณทางไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณทางแสง องค์ประกอบต่อมาคือ เส้นใยนำแสง เป็นตัวกลางการส่งสัญญาณ ทำมาจากแก้วหรือพลาสติก ในปัจจุบันมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน เช่น เส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดียว (Single Mode Fiber, SMF) เส้นใยนำแสงชนิดหลายโหมด (Multimode Fiber, MMF) เป็นต้น สุดท้ายที่ปลายทางมีตัวรับสัญญาณทางแสง (Optical Receiver) ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณทางแสงกลับเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าและขยายสัญญาณออกสู่ผู้ใช้ต่อไป ดังรูปที่ 1

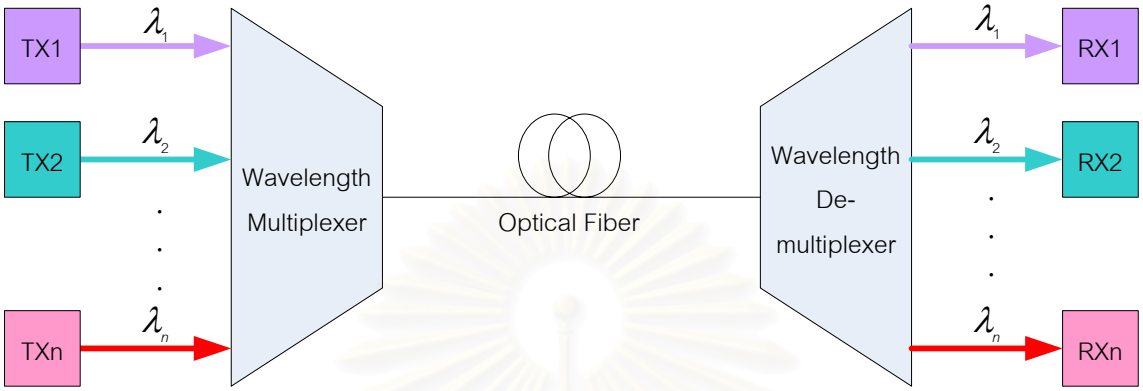


รูปที่ 1 องค์ประกอบพื้นฐานของระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง

การส่งสัญญาณแสงหลายความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing, WDM)

เนื่องจากเส้นใยนำแสงมีแบนด์วิดท์ในการใช้งานที่กว้างมาก ทำให้มีแนวความคิดที่จะส่งสัญญาณแสงหลายความยาวคลื่นสำหรับแต่ละช่องสัญญาณไปพร้อมกันบนเส้นใยนำแสง โดยจะใช้แสง 1 ความยาวคลื่นต่อ 1 ช่องสัญญาณ ในช่วงแรกเทคโนโลยี WDM นี้ถูกเรียกกันว่า Wideband WDM เนื่องจากสัญญาณข้อมูลแต่ละช่องสัญญาณจะอยู่ห่างกันมาก ต่อมาจึงได้มีการพัฒนาให้ช่องว่างระหว่างความยาวคลื่นนี้แคบลงเรียกว่า Narrowband WDM เพื่อรองรับปริมาณช่องสัญญาณได้มากขึ้นกว่าเดิม และในปัจจุบันเทคโนโลยีการส่งสัญญาณหลายความยาวคลื่นแบบหนาแน่น (Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM) ก็ได้พัฒนาขึ้น ซึ่งจะสามารถส่งสัญญาณ

ออกไปได้พร้อมกัน 16-160 ช่องสัญญาณ โดยมีระยะระหว่างช่องสัญญาณอยู่ที่ 200,100, 50, 25 และ 12.5 GHz ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1 [1]



รูปที่ 2 การส่งสัญญาณแสงหลายความยาวคลื่นบนเส้นใยนำแสง

จากรูปที่ 2 ตัวส่งสัญญาณทางแสงแต่ละช่องสัญญาณสร้างสัญญาณทางแสงความยาวคลื่นแตกต่างกัน ข้อมูลทางแสงของแต่ละช่องสัญญาณนี้จะมารวมกันด้วยตัวมัลติเพลกซ์ทางความยาวคลื่น (Wavelength Multiplexer) ทำให้ปริมาณข้อมูลสูงมากขึ้น ส่งผ่านเส้นใยนำแสงด้วยอัตราข้อมูลสูง เมื่อถึงปลายทางทำการแยกสัญญาณด้วยตัวดีมัลติเพลกซ์ความยาวคลื่น (Wavelength De-multiplexer) ก่อนออกสู่ตัวรับของแต่ละช่องสัญญาณ การส่งสัญญาณแบบ WDM นี้ ยิ่งมีระยะระหว่างความยาวคลื่นแคบมากเท่าไหร่ ก็จะทำให้สามารถส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสงได้หลายช่องสัญญาณมากขึ้นเท่านั้น ซึ่งเรียกได้ว่าเป็นการเพิ่มปริมาณการส่งข้อมูลมากยิ่งขึ้นนั่นเอง

WDM และ DWDM ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานเชื่อมโยงโครงข่ายต่างๆ ในปัจจุบันมากยิ่งขึ้น เนื่องจากปริมาณข้อมูลที่เพิ่มสูงมาก ซึ่งในประเทศไทยนั้นได้มีการนำมาใช้ในเครือข่าย Backbone สำหรับเชื่อมต่อระหว่างเครือข่ายไร้สายของผู้ให้บริการมือถือรายต่างๆ หรือโครงข่ายหลักภายในองค์กรใหญ่ๆ เช่น การไฟฟ้าต่างๆ, TOT, CAT หรือ สนามบินสุวรรณภูมิ เป็นต้น จากข้อดีในการส่งสัญญาณแบบหลายความยาวคลื่นทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพและปริมาณการส่งสัญญาณข้อมูล งานวิจัยนี้จึงได้ทำการค้นคว้าและทดลองการสื่อสารด้วยเทคโนโลยี DWDM โดยมีระยะระหว่างความยาวคลื่นเท่ากับ 100 GHz (~ 0.8 nm) ตามมาตรฐาน ITU-T G.692 โดยมีความถี่อ้างอิงที่ 193.7 THz หรือที่ความยาวคลื่น 1552.524 [2]

องค์ประกอบในการทดลองการส่งสัญญาณด้วยเทคนิค DWDM

1. ตัวส่งสัญญาณทางแสง (Optical Transmitter)

    1.1 ตัวส่งสัญญาณความยาวคลื่นที่ 2 (λ_2) สร้างสัญญาณความยาวคลื่น 1551.72 nm ซึ่งเป็นความยาวคลื่นหลักที่สนใจ ส่วนความยาวคลื่นที่ 1 และที่ 3 จะเป็นความยาวคลื่นด้านซ้ายและขวาของความยาวคลื่นที่ 2 เพื่อใช้ประกอบในการทดลอง WDM ซึ่งทั้งสามค่าความยาวคลื่นเป็นไปตามมาตรฐาน ITU Grid

    1.2 ตัวส่งสัญญาณความยาวคลื่นที่ 1 (λ_1) สร้างสัญญาณความยาวคลื่น 1550.92 nm

    1.3 ตัวส่งสัญญาณความยาวคลื่นที่ 3 (λ_3) สร้างสัญญาณความยาวคลื่น 1552.52 nm

2. ตัวมัลติเพลกซ์/ดีมัลติเพลกซ์ความยาวคลื่น (Wavelength Multiplexer/Demultiplexer)

    2.1 ตัวมัลติเพลกซ์ความยาวคลื่น การทดลองนี้ใช้ตัวคู่ต่อสัญญาณทางแสง (Fiber optic coupler) 2 ตัว

    2.2 ตัวดีมัลติเพลกซ์ความยาวคลื่น การทดลองนี้ใช้อุปกรณ์ Fiber Bragg Grating กับ Circulator

3. ตัวรับสัญญาณทางแสง (Optical Receiver)

    3.1 ตัวรับแสงชนิด Avalanche (Avalanche Photo Diode, APD)

    3.2 ตัวกู้คืนสัญญาณข้อมูลและสัญญาณนาฬิกา (Clock and Data Recovery, CDR)

1. ตัวส่งสัญญาณทางแสง (Optical Transmitter)

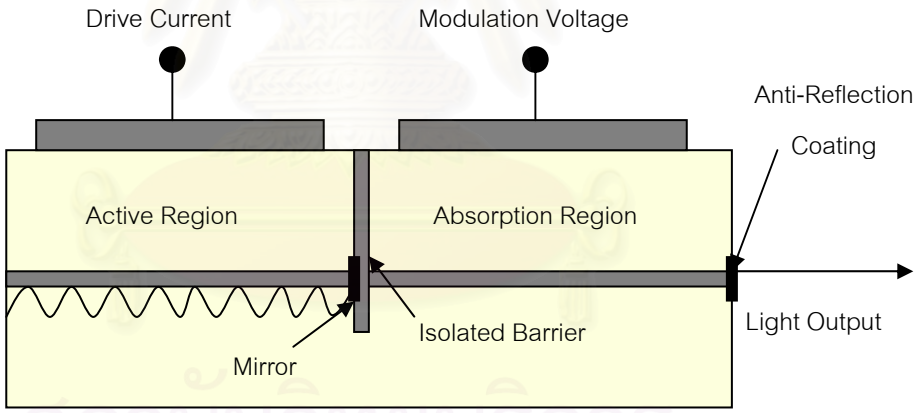
1.1 <u>ตัวส่งสัญญาณความยาวคลื่นที่ 2</u> (λ_2) สร้างสัญญาณความยาวคลื่น 1551.72 nm

มีองค์ประกอบหลักๆ ดังนี้ คือ (1) แหล่งกำเนิดแสงที่ผลิตแสงออกมาได้ตามที่ต้องการ, (2) ตัวควบคุมกระแส เพื่อไว้ควบคุมให้กำลังแสงที่ผลิตออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงมีค่าเหมาะสมและคงที่, (3) ตัวควบคุมอุณหภูมิ เพื่อให้แหล่งกำเนิดแสงมีอุณหภูมิคงที่ และให้คุณลักษณะตรงตามที่ต้องการไม่แปรผันไปตามอุณหภูมิแวดล้อม และ (4) ตัวขับ EAM ซึ่งเป็นตัวขยายสัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้าที่มีความเร็วสูงได้ถึง 10 กิกะบิตต่อวินาที สำหรับป้อนสัญญาณข้อมูลเข้ากับตัวมอดูเลตสัญญาณแสงแบบดูดกลืนไฟฟ้าที่มีควบรวมอยู่ในตัวแหล่งกำเนิดแสงแล้ว รายละเอียดของแต่ละองค์ประกอบหลักมีดังต่อไปนี้

1.1.1 แหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่นที่ 2

แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้เป็นตัวเลเซอร์ชนิดควบรวมตัวมอดูเลตดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า (Electro-Absorption Modulator Integrated Laser, EML) ซึ่งเป็นเลเซอร์ที่มีส่วนของเลเซอร์ประเภท Distributed Feedback Laser (DFB) และส่วนที่มีการมอดูเลตสัญญาณด้วยวิธีดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า (Electro-Absorption Modulator, EAM) ควบรวมอยู่ในชิปเดียวกัน

การมอดูเลตด้วยอุปกรณ์ EAM ซึ่งเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำแบบรอยต่อพีเอ็นที่ทำจากวัสดุ InGaAsP/InP จะใช้หลักการดูดกลืนแสง โดยถ้าทำการไบแอสย้อนกลับมากขึ้น ก็จะมีการดูดกลืนแสงมากขึ้น เนื่องมาจากแสงที่ผ่านนั้น ถ้ามีพลังงานมากกว่าแถบความกว้างพลังงาน (Energy band gap) ของวัสดุ ก็จะถูกดูดกลืนพลังงาน ค่าความยาวคลื่นที่ถูกดูดกลืนไปจะเป็นความยาวคลื่นที่สั้นกว่าความยาวคลื่นขีดจำกัด (Cut off wavelength) สำหรับความเร็วที่ได้จากการมอดูเลตแบบนี้จะสามารถส่งข้อมูลได้ถึง 10 กิกกะบิตต่อวินาที ซึ่งเป็นการมอดูเลตที่เร็วขึ้นกว่าการเปิด-ปิดสัญญาณแบบมอดูเลตโดยตรง (Direct Modulation) ที่ทำไว้ที่ 2.5 Gb/s ทั้งยังช่วยลดปัญหาเรื่อง Laser Chirp ได้ด้วย

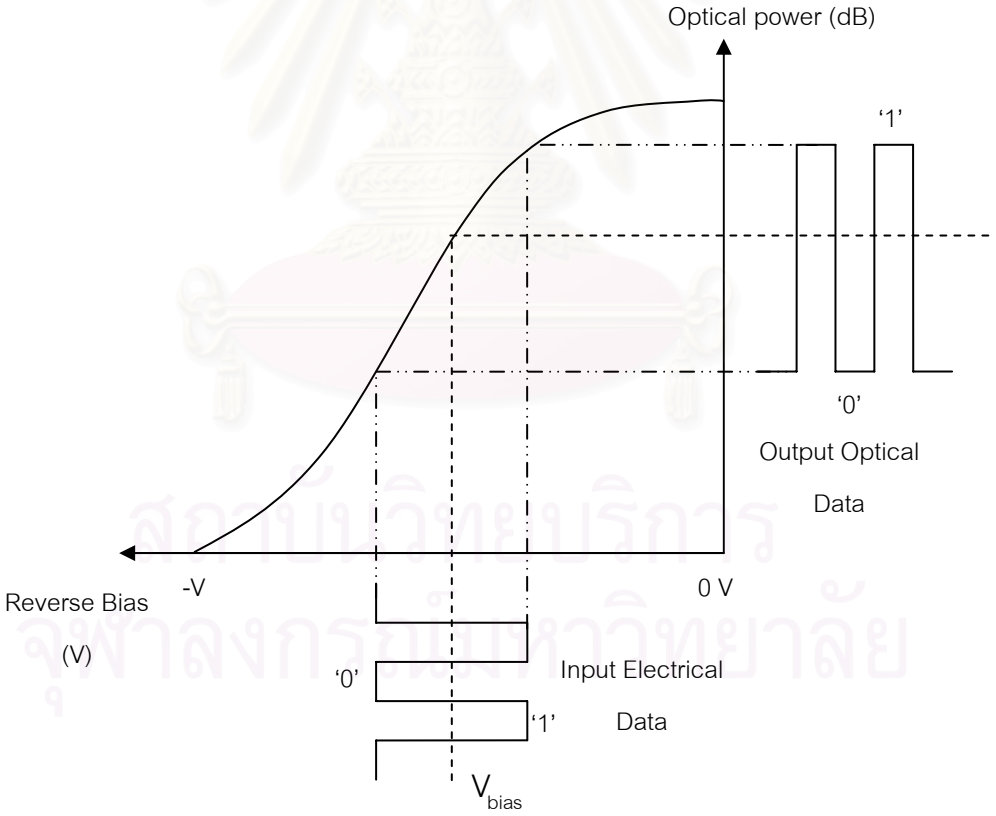


รูปที่ 3 โครงสร้างตัวมอดูเลเตอร์และ DFB laser

โครงสร้างในการมอดูเลตสัญญาณแบบดูดกลืนนั้น จะนำส่วนของ DFB laser และ EAM เข้ามารวมอยู่บนชิปตัวเดียวกัน โดยจะวางแยกจากกันด้วยตัวกั้นและกระจก โดยจะเรียกอุปกรณ์นี้ว่าเลเซอร์ที่มอดูเลตด้วยการดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า (EML) ดังรูปที่ 3 บริเวณแอคทีฟ (Active Region) ในรูปก็คือส่วนที่เป็น DFB laser เมื่อทำการจ่ายกระแสไฟเพื่อขับเลเซอร์ เลเซอร์ก็จะผลิตแสงต่อเนื่อง (Continuous Wave, CW) ส่งผ่านไปยังบริเวณดูดกลืน (Absorption Region) ถ้าไม่มีการจ่ายแรงดันมอดูเลต ลำแสงต่อเนื่องก็จะผ่านบริเวณนี้ออกสู่ภายนอก แต่เมื่อมีแรงดันมอดูเลตที่เป็นสัญญาณ

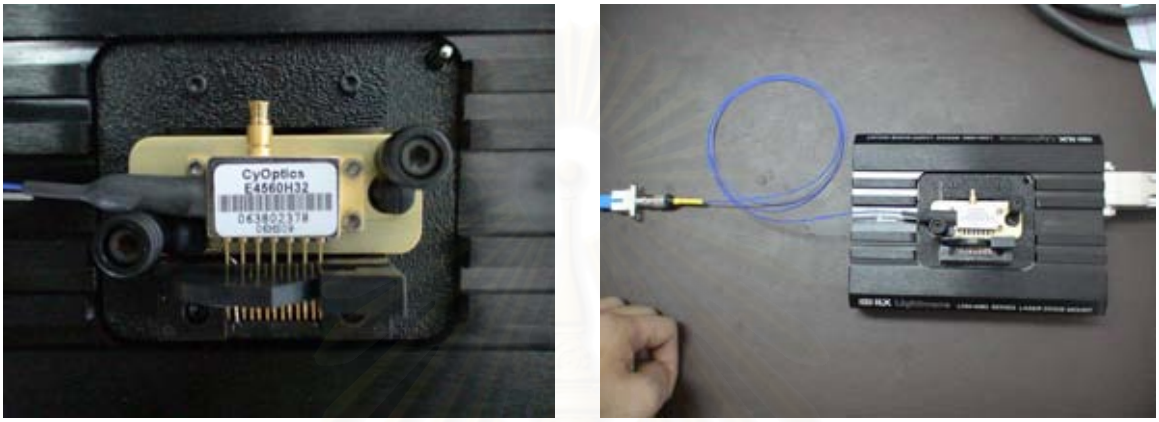
ข้อมูลเข้ามาที่บริเวณดูดกลืนนี้ แรงดันที่เข้ามาจะทำการไบแอส ถ้ามีแรงดันเข้ามามาก ลำแสงต่อเนื่องที่มาจากเลเซอร์ก็จะถูกดูดกลืนมากตามไปด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงขาออกกับแรงดันที่จ่ายให้แก่อุปกรณ์เป็น ดังรูปที่ 4 ดังนั้นถ้าบิตข้อมูลเป็น '1' ระดับแรงดันไบแอสติดลบน้อย แสงจะถูกดูดกลืนน้อย จึงเหลือแสงออกจากอุปกรณ์มาก สำหรับบิตข้อมูลที่เป็น '0' ระดับแรงดันไบแอสจะมีค่าติดลบมาก แสงจะถูกดูดกลืนมาก แสงที่เหลือออกมาจะมีกำลังน้อยกว่า จึงได้เป็นการมอดูเลตสัญญาณแสงตามความเข้มของแสง (Intensity Modulation)

การพิจารณาคุณสมบัติตัว EML ที่ใช้ในอุปกรณ์ส่งสัญญาณทางแสงพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกำลังทางแสงขาออกนี้เอง ถ้าแรงดันสูงหรือต่ำเกินกว่าช่วงทำงานอุปกรณ์จะทำงานไม่ได้ตามที่น่าจะเป็น ระดับแรงดันที่ใช้ในการไบแอสในตัว EML โดยทั่วไปสามารถปรับได้ระหว่าง 0 V ถึง 1 V ส่วนขนาดแรงดันมอดูเลตจากยอดถึงยอดสามารถปรับได้ตั้งแต่ประมาณ 1 Vp-p ถึง 2.5 Vp-p ซึ่งถ้ามีขนาดแรงดันมอดูเลตมาก ก็จะมีค่าสัดส่วนของระดับแรงดันบิตหนึ่งต่อระดับแรงดันบิตศูนย์หรือ Extinction ratio มากด้วย



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงขาออก (dB) กับแรงดันไบแอส (V)

โดยเลเซอร์ EML ที่เลือกใช้สร้างสัญญาณแสงความยาวคลื่นที่ 2 นี้ผลิตโดยบริษัท CyOptics โมดูล E4560H32 แสงที่สร้างขึ้นมีความยาวคลื่น 1551.72 nm ภายในตัวเลเซอร์ยังมีส่วนทำความเย็นโดยใช้กระแสไฟที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิ (Thermo-Electric Cooler, TEC) เพื่อใช้ระบายความร้อนที่เกิดขึ้นและให้ได้ค่าความยาวคลื่นแสงที่คงที่ ในการทดลอง ตัว EML นี้จะวางอยู่บนตัวจับเลเซอร์ (Laser mount) โมดูล LDM-4980 ของบริษัท ILX Lightwave ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 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 มีไว้สำหรับป้อนสัญญาณข้อมูลเพื่อทำการมอดูเลตแบบดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า ส่วนขา Anonde+, Phototdetector Anode- และ Photodetector Cathode+ เชื่อมต่อกับตัวควบคุมกระแสในหัวข้อ 1.1.2 ส่วน Thermiaster+, Thermister-, TEC+, TEC- จะเชื่อมต่อกับตัวควบคุมอุณหภูมิที่จะกล่าวถึงในหัวข้อ 1.1.3 ต่อไป

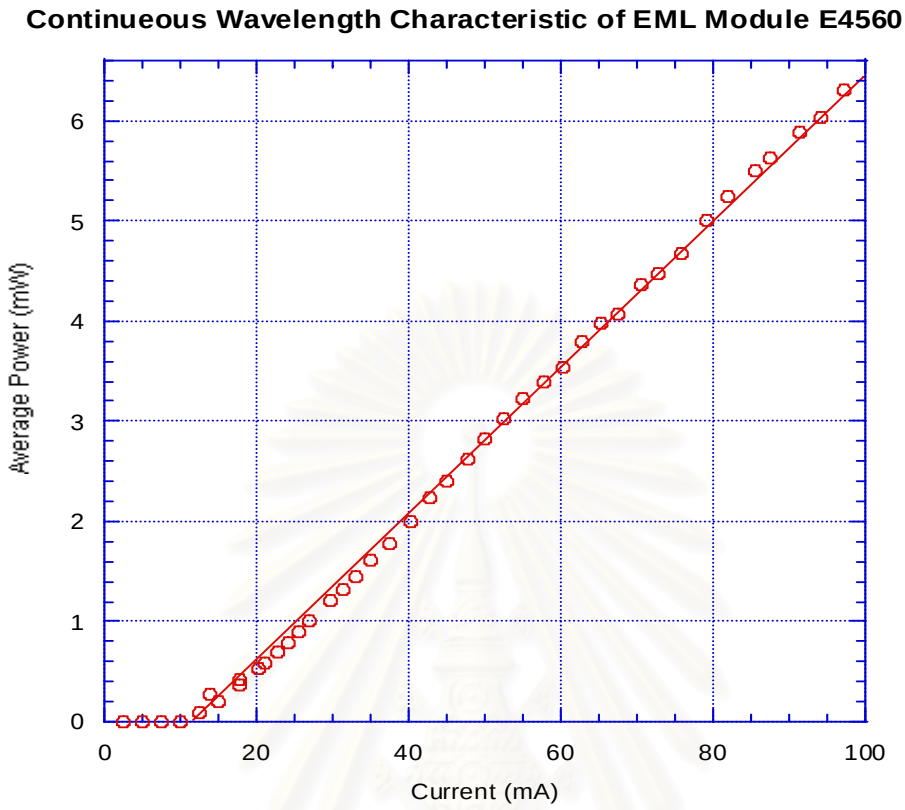
1.1.2 <u>ตัวควบคุมกระแส (Current Controller)</u>

ตัวควบคุมกระแสมีไว้เพื่อควบคุมให้กำลังแสงที่ผลิตจากเลเซอร์มีค่าคงที่ โมดูลที่เลือกใช้ คือ LDX-3100 ของบริษัท ILX Lightwave ตัวควบคุมกระแสนี้สามารถปรับค่ากระแสได้ตั้งแต่ 0 mA ถึง 270 mA สามารถควบคุมค่ากระแสขีดจำกัดได้

รูปที่ 6 ตัวควบคุมกระแส โมดูล LDX-3100 ของบริษัท ILX Lightwave

เมื่อป้อนไฟเลี้ยง +15V และ -15V ให้กับตัวควบคุมกระแส ตัวควบคุมกระแสจะมีโหมดการทำงาน 2 โหมดคือ โหมดควบคุมกระแส และโหมดควบคุมกำลังไฟฟ้า ตั้งโหมดการทำงานให้อยู่ที่การควบคุมกระแสเพื่อที่จะควบคุมกระแสที่ป้อนให้กับเลเซอร์ให้มีค่าคงที่ จากนั้นปรับกระแสขีดจำกัดให้มีค่า 100 mA ตามขีดจำกัดของ EML ถัดไปตั้งช่วงกระแสโฟโตไดโอด ให้อยู่ที่ 2 mA เมื่อตั้งค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดแล้ว ทำการเชื่อมต่อตัวควบคุมกระแสเข้ากับ EML ด้วยสายเคเบิล CC-305S Current Source Interconnect Cable จากนั้นทำการปรับค่ากระแสขับเลเซอร์ด้วยตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ที่อยู่บนบอร์ดตัวควบคุมกระแส

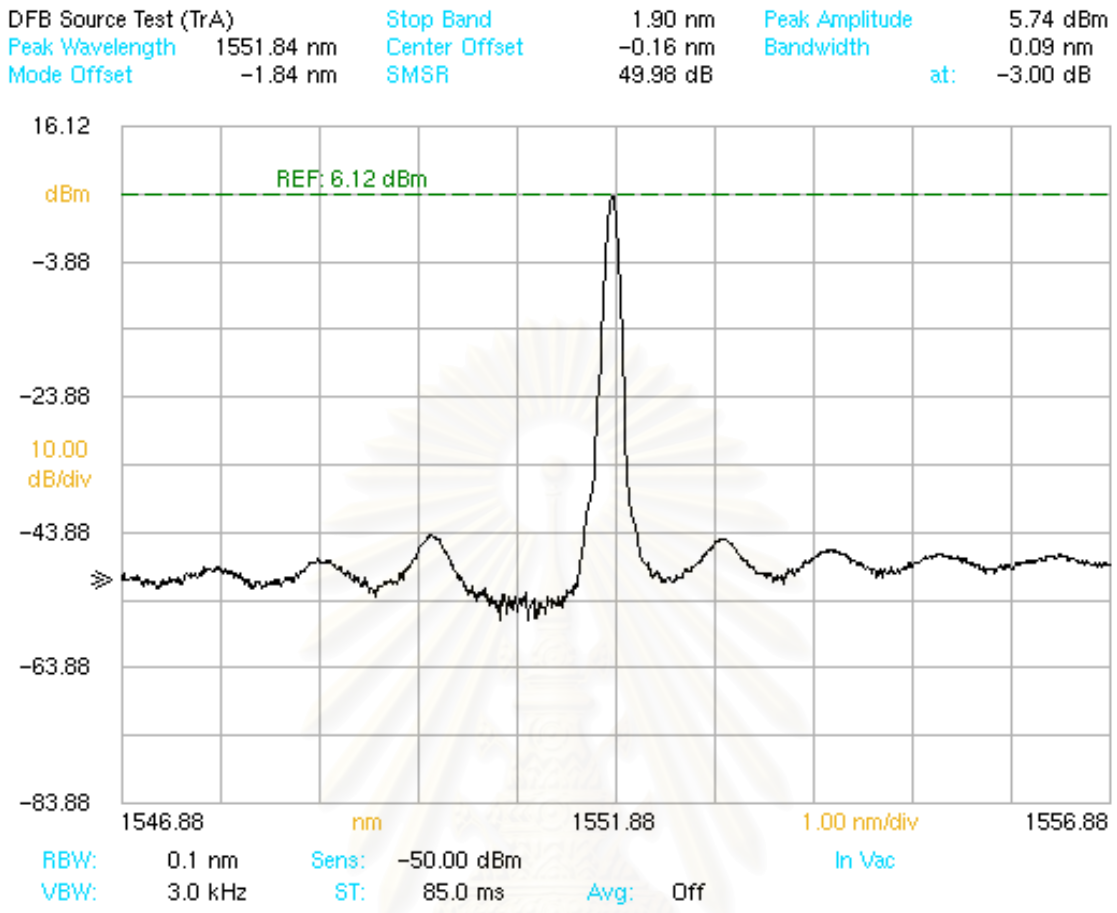
ตัว EML นั้นถ้ายังไม่มีสัญญาณข้อมูลเข้ามาที่ RF port นั้น จะมีลักษณะการทำงานเหมือน DFB ทุกประการ โดยจะผลิตแสงต่อเนื่อง ขึ้นเมื่อมีการป้อนกระแสไฟเข้าทางด้านขา Anode+ ด้วยตัวควบคุมกระแส จากนั้นทำการวัดค่ากำลังแสงขาออกด้วยตัววัดกำลังแสง (Optical Power Monitor) และวัดค่ากระแสที่ป้อนจากตัวควบคุมกระแสนี้ด้วยตัวมัลติมิเตอร์ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงขาออกจาก EML และกระแสขับเลเซอร์แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 คุณลักษณะสมบัติระหว่างกำลังแสงขาออกกับกระแสขับของเลเซอร์ DFB ภายใน EML

จากรูปที่ 6 นั้นจะพบว่าค่ากระแสขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold Current, I_{th}) ของเลเซอร์ตัวนี้อยู่ที่ 11.16 mA และคลื่นแสงต่อเนื่องที่ผลิตจากเลเซอร์นั้นมียอดความยาวคลื่นในขณะที่ยังไม่มีการมอดูเลตอยู่ที่ 1551.84 nm ซึ่งต่างตาก 1551.72 nm ที่ต้องการ และมีค่าแถบความกว้างสเปกตรัมเท่ากับ 0.09 nm ดังค่าแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งยอดของความยาวคลื่นนี้สามารถที่จะปรับจูนได้ด้วยอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิที่จะกล่าวถึงใน 1.1.3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 7 สเปกตรัมของแสงขาออกของตัวเลเซอร์ก่อนการมอดูเลตและก่อนการปรับจูนความยาวคลื่น

1.1.3 <u>ตัวควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller)</u>

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมให้อุณหภูมิของเลเซอร์มีค่าคงที่ เพราะผลของอุณหภูมิจะทำให้คุณลักษณะของเลเซอร์เปลี่ยนไป มีปัญหาเรื่อง Chirp ตัวควบคุมอุณหภูมิที่เลือกใช้นั้นคือโมดูล LDT-5100 มาจากบริษัท ILX Lightwave โดยมีหลักการควบคุมอุณหภูมิดังนี้ เริ่มต้นด้วยการวัดอุณหภูมิได้จาก Thermistor ที่มีอยู่แล้วภายในตัว EML ต่อเข้ามาที่ขา Thermistor+ และ Thermistor- ของตัวควบคุมอุณหภูมิ คุณสมบัติของ Thermistor คือ จะมีค่าความต้านทานต่ำที่อุณหภูมิสูงและมีค่าความต้านทานสูงที่อุณหภูมิต่ำ จากค่าความต้านทานที่วัดได้จะถูกแปลงเป็นฟังก์ชันของกระแส จากนั้นจะป้อนกระแสกลับไปที่ขา TEC+ และ TEC- ของเลเซอร์ โดยในกรณี กระแส TE เป็นค่าบวก จะไปทำให้อุณหภูมิของ TEC เย็นลง ส่วนถ้ากระแส TE เป็นค่าลบ จะไปทำให้อุณหภูมิของ TEC ร้อนขึ้น

รูปที่ 8 ตัวควบคุมอุณหภูมิ โมดูล LDT-5100 ของบริษัท ILX Ligthwave

ป้อนไฟเลี้ยงให้กับตัวควบคุมอุณหภูมิ +15V -15V และ +5.2V ตัวควบคุมอุณหภูมินี้จะสร้างกระแส Thermistor กับกระแส TE ซึ่งสามารถตั้งกระแสขีดจำกัด Thermistor ได้ 2 ค่า คือ 10 uA หรือ 100 uA เมื่อศึกษาคุณลักษณะของ Thermistor ในตัว EML แล้วพบว่าสามารถทนกระแสได้ถึง 100 uA ดังนั้นจึงตั้งค่ากระแส Thermistor จากตัวบอร์ดควบคุมอุณหภูมิเป็น 100 uA ออกที่ขาออก Thermistor+ และ Thermistor- เพื่อให้ได้ความละเอียดในการอ่านค่าอุณหภูมิมากขึ้นส่วนกระแส TE ที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิของเลเซอร์นั้น ตามคุณลักษณะของตัวเลเซอร์นั้นสามารถที่จะป้อนกระแสลบเพื่อทำให้เลเซอร์ร้อนขึ้นได้มากที่สุดคือ -0.5 A ซึ่งจะทำให้ค่าความยาวคลื่นแสงเพิ่มขึ้นด้วย ในทางตรงกันข้ามสามารถที่จะป้อนกระแสบวก เพื่อทำให้เลเซอร์เย็นลงได้มากที่สุด 1.3 A ซึ่งจะทำให้ค่าความยาวคลื่นแสงลดลงด้วย ดังนั้นเราสามารถที่จะปรับอุณหภูมิของตัวเลเซอร์ได้ ส่งผลให้ความยาวคลื่นของเลเซอร์มีค่าคงที่ตามที่ต้องการ

ทำการต่อสายเคเบิล CC-505 TEC Interconnect Cable ระหว่างตัวควบคุมอุณหภูมิกับตัว EML จากนั้นปรับตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้คือ R52 ที่บอร์ดตัวควบคุมอุณหภูมิพร้อมทั้งวัดค่ากระแส TE ที่ออกจากขาออก TE+ และ TE- ด้วยดิจิทัลมัลติมิเตอร์ ในขณะที่ทำการปรับค่าความต้านทานโดยจะปรับให้ช่วงของกระแส TE อยู่ระหว่าง -0.5A ถึง 1.3V ตามขีดความสามารถของอุปกรณ์ ถ้า

ป้อนกระแสไฟเพิ่มมากขึ้น ความยาวคลื่นแสงที่ออกมาจาก EML จะสั้นลงตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าช่วงของความยาวคลื่นที่ปรับได้อยู่ระหว่าง 1551.51-1551.92 nm จากนั้นปรับอุณหภูมิให้คงที่ที่ความยาวคลื่นที่ต้องการคือ 1551.72 nm เพื่อให้ตรงตาม ITU-grid ของระบบ DWDM

1.1.4 ตัวขับ EAM (EAM Driver)

EAM Driver Evaluation Kit ซึ่งมีชิปโมดูล MAX3941 ของบริษัท MAXIM มีลักษณะดังรูปที่ 9 โดยมีคุณสมบัติในการขยายสัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้าให้มีขนาดใหญ่เพียงพอในการขับตัวมอดูเลตสัญญาณทางแสงแบบดูดกลืน ที่อัตราการส่งข้อมูลความเร็วได้สูงถึง 2.5 Gbps

EAM Driver Evaluation Board รับสัญญาณขาเข้า 4 ช่องทาง คือ DATA, $\overline{DATA}$, CLK และ $\overline{CLK}$ ส่วนสัญญาณขาออกมี 1 ช่องทาง โดยที่หัวต่อเป็นชนิด SMA ทั้งหมด ใช้ไฟเลี้ยงบอร์ด -5.2V

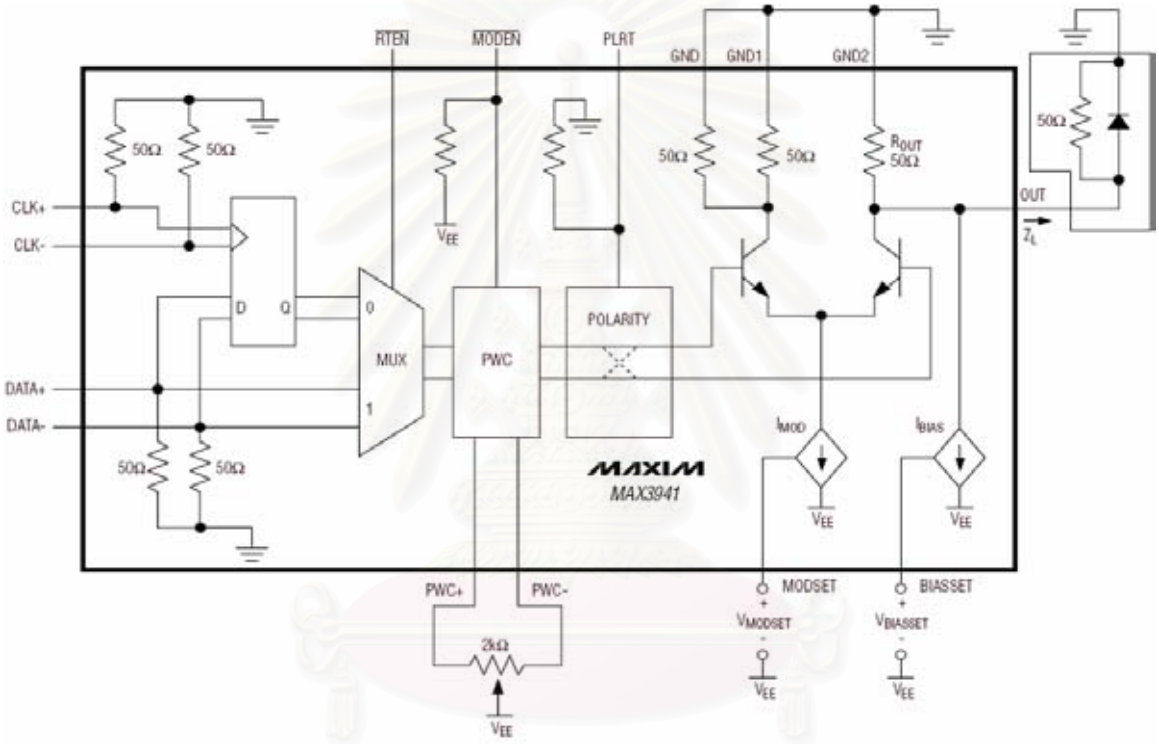
เมื่อทำการป้อนสัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้าขนาด 0.2 -1.6 V_{p-p} วงจรไบแอสภายในสามารถขยายกระแสไบแอสได้ถึง 50 mA เทียบเท่ากับแรงดันไบแอสสูงถึง 1.25 V_{p-p} ที่โหลด 50 โอห์ม นอกจากนี้วงจรสามารถปรับกระแสมอดูเลตได้ตั้งแต่ 40 mA_{p-p} ถึง 120 mA_{p-p} เทียบเท่ากับแรงดันมอดูเลตตั้งแต่ 1 V_{p-p} ถึง 3 V_{p-p}

และมีความเร็วขอบ (Edge Speed) ที่ 20% ถึง 80% ของสัญญาณมีค่าประมาณ 23-32 ps

รูปที่ 9 บอร์ดวงจร EAM Driver Evaluation Kit ของบริษัท MAXIM

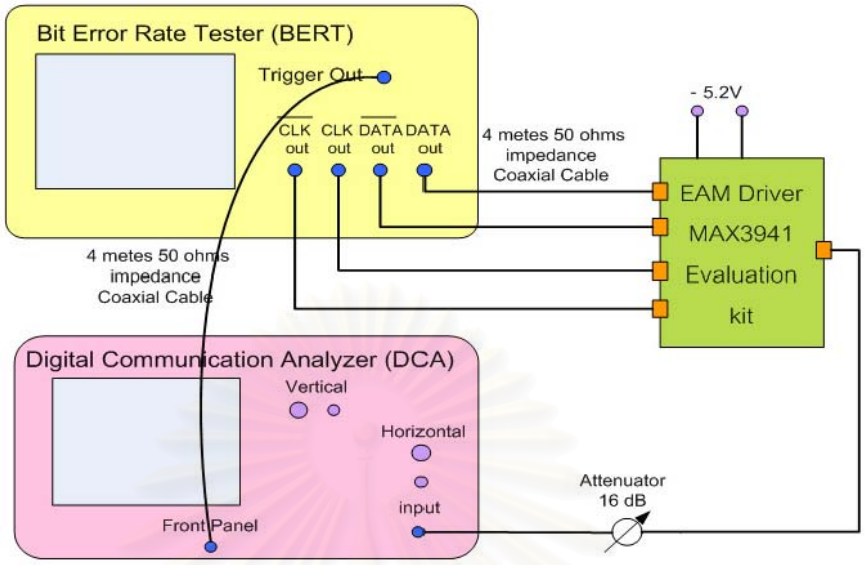
ชุดบอร์ดวงจรตัวขับ EAM นั้นจะรับสัญญาณขาเข้า 4 ช่องทาง คือ DATA, $\overline{\text{DATA}}$, CLK และ $\overline{\text{CLK}}$ ส่วนสัญญาณขาออกมี 1 ช่องทาง ภาพวงจรภายในแสดงดังรูปที่ 10 ทำการป้อนสัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้าขนาด 0.2-1.6 V_{p-p} วงจรไบแอสภายในสามารถขยายกระแสไบแอสได้ถึง 50 mA เทียบเท่ากับแรงดันไบแอสสูงถึง 1.25 V_{p-p} ที่โหลด 50 โอห์ม

นอกจากนี้วงจรสามารถปรับกระแสมอดูเลตได้ตั้งแต่ 40 mA_{p-p} ถึง 120 mA_{p-p} เทียบเท่ากับแรงดันมอดูเลตตั้งแต่ 1 V_{p-p} ถึง 3 V_{p-p} และมีความเร็วขอบ (Edge Speed) ที่ 20% ถึง 80% ของสัญญาณมีค่าประมาณ 23-32 ps



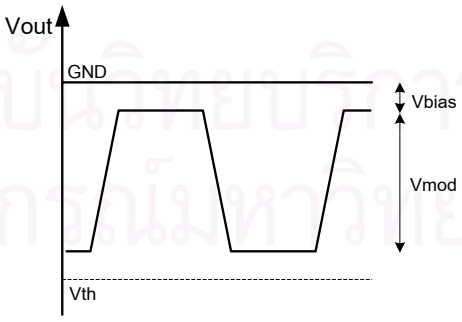
รูปที่ 10 แผนภาพวงจรภายในของตัวขับ EAM ที่ใช้ในการทดลอง [3]

ใช้อุปกรณ์ทอดสอบความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate Tester, BERT) สร้างสัญญาณข้อมูลลำดับบิตแบบสุ่มเทียม (Pseudo Random Bit Sequence, PRBS) ที่มีจำนวนบิตข้อมูล $2^{31}-1$ ด้วยอัตราการส่งข้อมูล 2.488 Gbps (OC-48/STM-16) โดยกำหนดระดับสัญญาณให้เท่ากับตรรกะโหมดปัจจุบัน (Common Mode Logic, CML) ซึ่งระดับสัญญาณอยู่ระหว่าง -400 mV ถึง 0 mV ป้อนเข้าพอร์ตขาเข้าทั้งสี่ของ EAM Driver ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 การเชื่อมต่ออุปกรณ์เพื่อวัดระดับสัญญาณขาออกของ EAM Driver

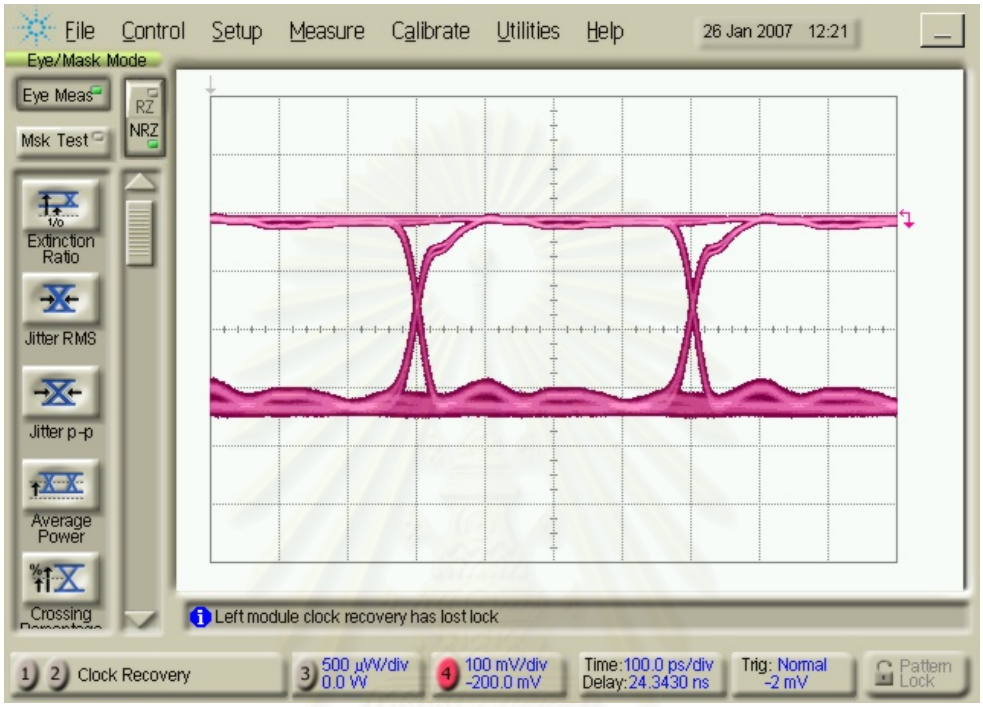
เชื่อมต่ออุปกรณ์ดังรูปที่ 11 สัญญาณไฟฟ้าออกจาก EAM Driver ที่พอร์ต DATA out ต่อเข้ากับ Attenuator 16 dB (ลดลง 6.31 เท่า) เพื่อลดทอนระดับสัญญาณลง ซึ่งการใช้อุปกรณ์ Attenuator ในวงจรนี้มีเพื่อป้องกันไม่ให้สัญญาณไฟฟ้ามีขนาดมากเกินกว่าที่เครื่องมือวัดจะสามารถทนได้ จากนั้นต่อเข้ากับ Digital Communication Analyzer (DCA) เพื่อตรวจวัดลักษณะของสัญญาณขาออกของ EAM Driver และเนื่องจากสัญญาณที่จะทำการวัดนี้มีความเร็วสูงมากจึงจำเป็นต้องต่อสัญญาณที่ออกจากพอร์ต Trigger out ของ BERT เข้ากับพอร์ต FrontPanel ของ DCA เพื่อไว้สำหรับ trigger สัญญาณข้อมูล



รูปที่ 12 ขนาดแรงดันไบแอส และแรงดันมอดูเลตขาออกของ EAM Driver

สัญญาณขาออกของ EAM Driver จะเป็นดังรูปที่ 12 โดยเราสามารถที่จะปรับขนาดแรงดันไบแอส (V_{bias})ได้ 0-1 V ด้วยตัวความต้านทานปรับค่าได้ $R_{biasset}$ และรับแรงดันมอดูเลต (V_{mod}) ได้

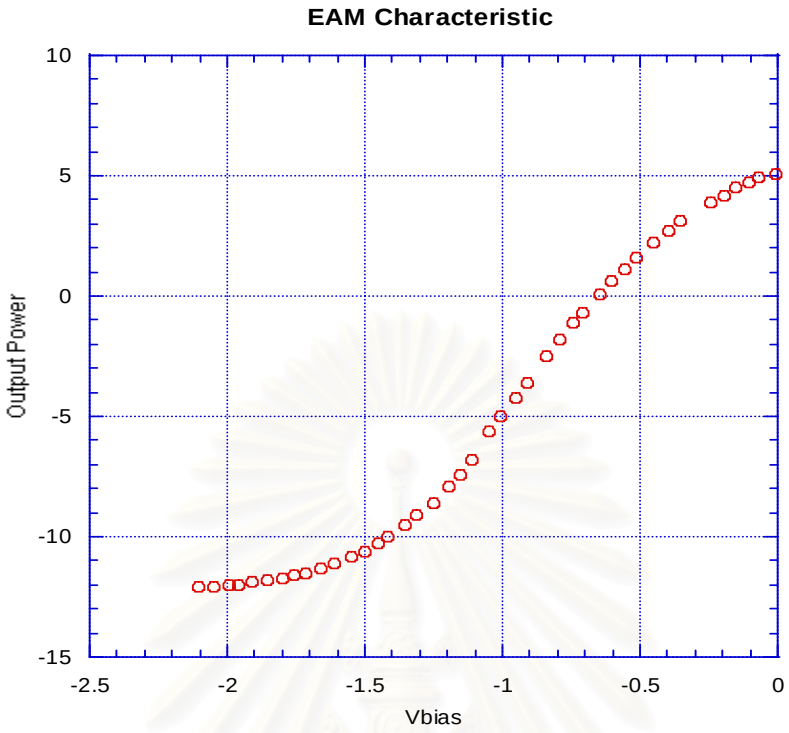
1V-3V ความต้านทานปรับค่าได้ R_{modset} ซึ่งการสร้างสัญญาณเพื่อขับตัว EML ในการทดลองจะตั้งค่า V_{bias} ไว้ที่ 0 V และตั้งค่า V_{mod} ไว้ที่ 2 V ซึ่งเป็นค่าที่ไม่เกินขีดความสามารถของตัว EML ที่จะรับได้สูงสุดคือ $V_{bias(max)}$ = 1V และ $V_{mod(max)}$ = 2.5V สัญญาณที่ได้จะเป็นดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 สัญญาณไฟฟ้าขาออกจาก EAM Driver โดยถูกลดทอนลง 16 dB

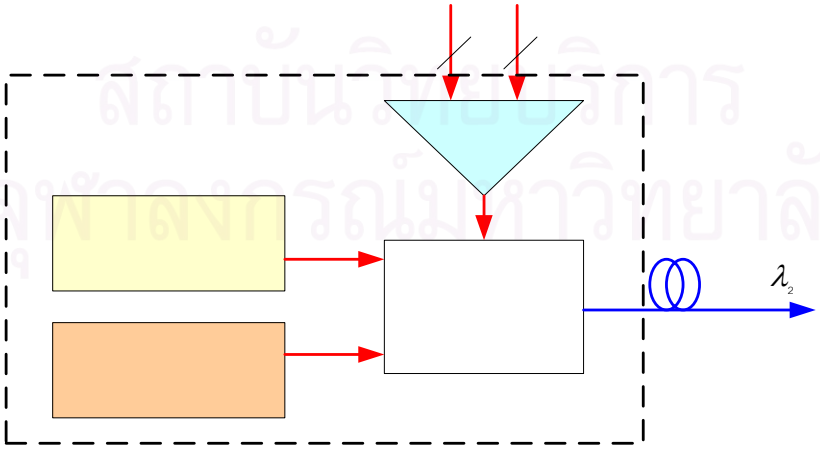
ที่ตัว EML เมื่อทำการป้อนแรงดันไบแอสที่ฝั่งตัวมอดูเลเตอร์ EAM แรงดันที่ป้อนจะทำให้แสงที่มาจากตัวเลเซอร์ถูกดูดกลืนเป็นสัดส่วนกับแรงดันที่ป้อน โดยแสงที่เหลือจะเป็นแสงขาออกจากตัวส่งสัญญาณทางแสง ซึ่งมีกำลังแสงขาออกวัดได้เป็นสัดส่วนกับแรงดันไบแอสดังรูปที่ 14 โดยทั้งนี้คงค่ากระแสขับตัว DFB ให้มีกำลังแสง CW เท่ากับ 6 dBm

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 14 กราฟคุณลักษณะสมบัติของ EAM ระหว่างกำลังทางแสงขาออกกับแรงดันที่ไบแอสที่พอร์ต RF

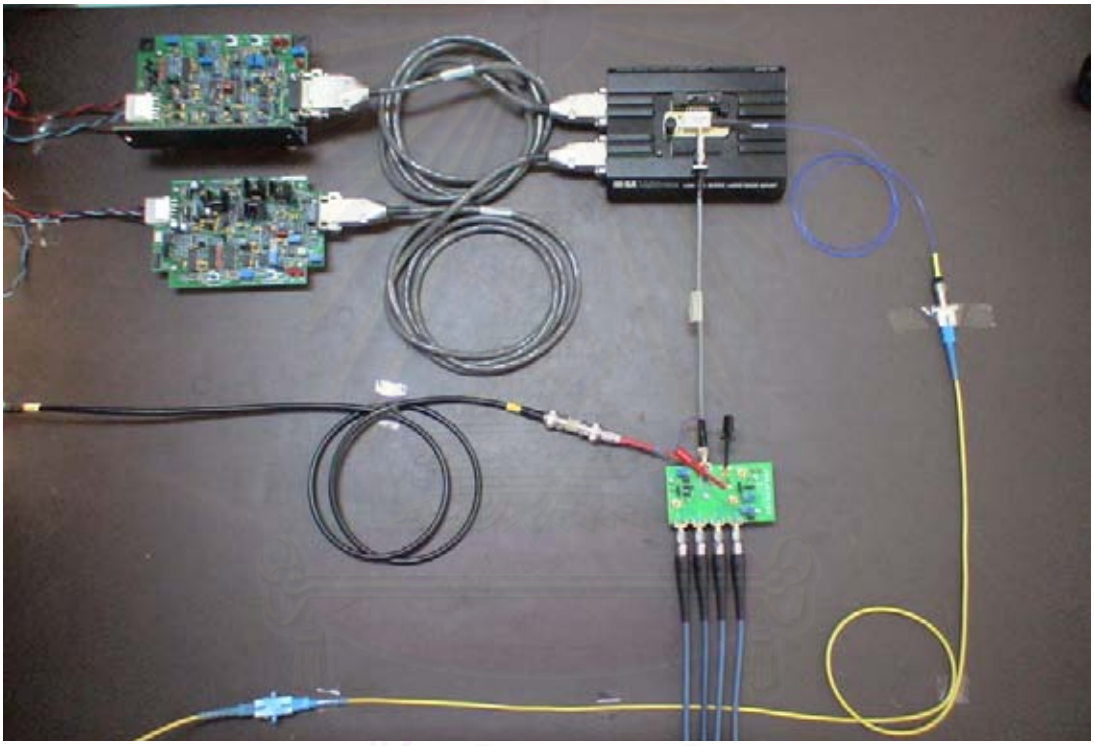
เมื่อได้กราฟคุณลักษณะสมบัติของเลเซอร์แล้ว ทำการมอดูเลตสัญญาณโดยต่อขาออกขอตัวขับ EAM เข้ากับพอร์ต RF ของ EML โดยจะมีวงจรการเชื่อมต่อดังรูปที่ 15 ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ส่งสัญญาณทางแสงความยาวคลื่นที่ 2 นั้นทั้งหมดจะประกอบไปด้วยตัวควบคุมอุณหภูมิ ตัวควบคุมกระแส ตัว EML และตัว EAM Driver



รูปที่ 15 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ตัวส่งสัญญาณทางแสงความยาวคลื่นที่ 2

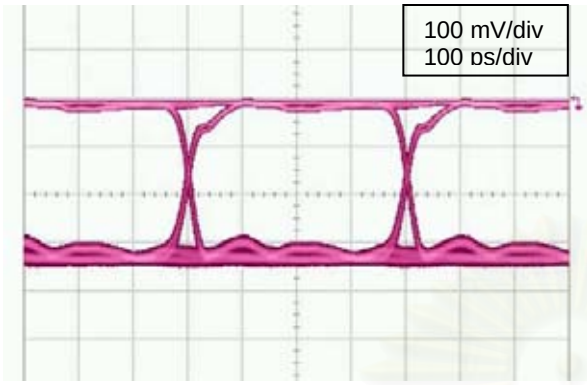
ผลการทดลองตัวส่งสัญญาณทางแสงความยาวคลื่นที่ 2

เมื่อทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์ตัวส่งสัญญาณทางแสงดังแสดงในรูปที่ 16 แล้ว สร้างสัญญาณข้อมูลลำดับบิตแบบ PRBS ที่มีจำนวนบิตข้อมูล $2^{31}-1$ ด้วยอัตราการส่งข้อมูล 2.488 Gbps (OC-48/STM-16) ด้วยเครื่อง BERT โดยมีระดับสัญญาณชนิด CML ป้อนเข้าตัว EAM Driver สัญญาณขาออกมีลักษณะดังรูปที่ 17 มีขนาดแรงดันมอดูเลตเท่ากับ 2 Vp-p นำสัญญาณนี้ต่อเข้าตัว EML เพื่อไปมอดูเลตสัญญาณทางแสงด้วยวิธีดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า สัญญาณข้อมูลทางแสงขาออกที่ได้จะมีลักษณะดังรูปที่ 18

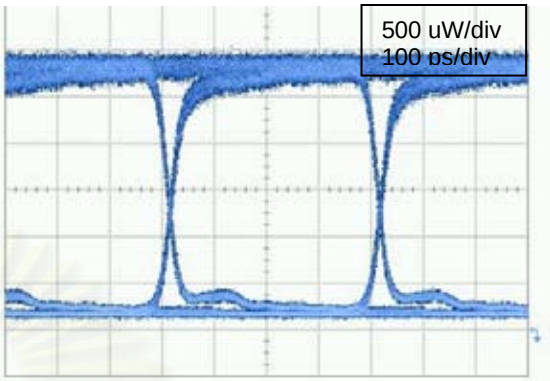


รูปที่ 16 การเชื่อมต่ออุปกรณ์จริงเพื่อส่งสัญญาณแสงความยาวคลื่นที่ 2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 17 สัญญาณข้อมูลไฟฟ้าขาเข้าตัว EML

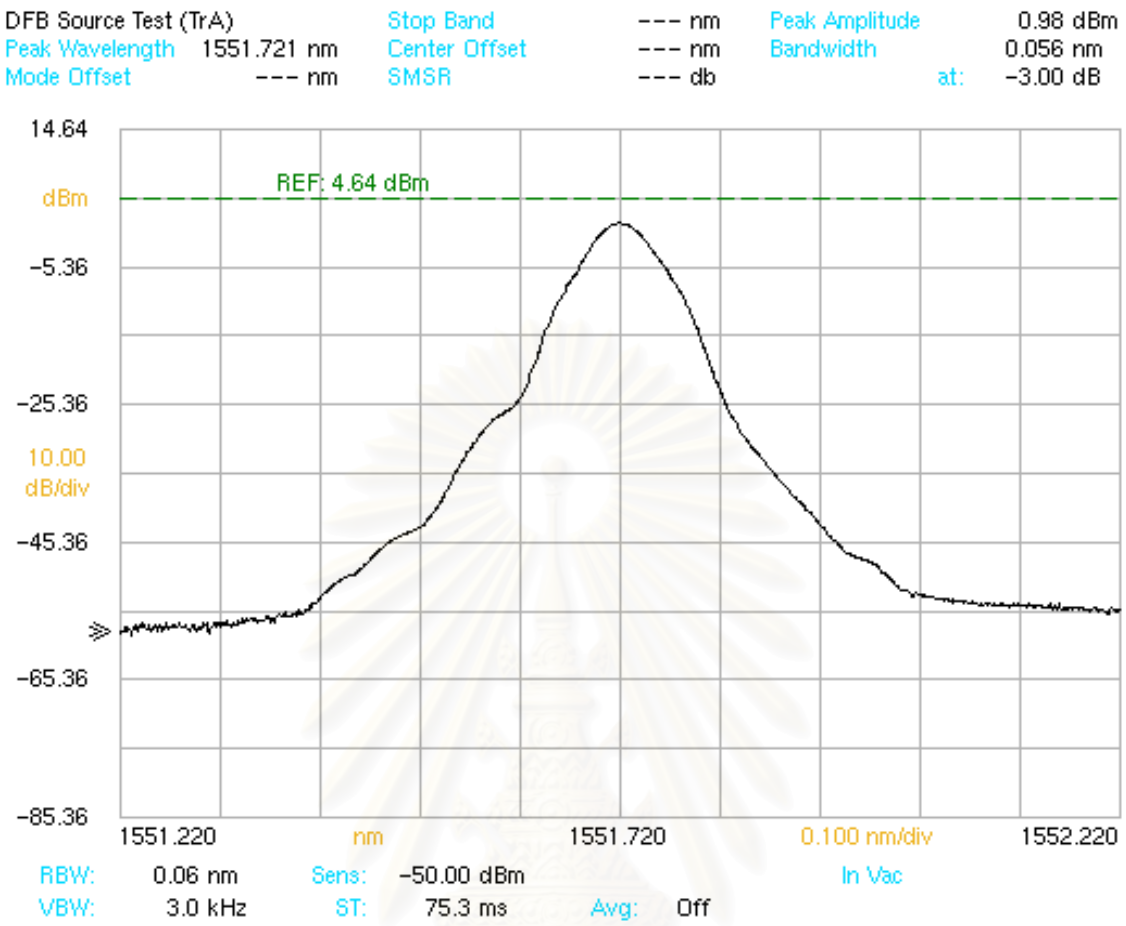


รูปที่ 18 สัญญาณข้อมูลทางแสงขาออกจาก EML

แผนภาพรูปตา(Eye diagram) ของสัญญาณทางแสงขาออกจาก EMLอัตราข้อมูล 2.5 Gb/s ที่วัดโดยอุปกรณ์ DCA นั้นมีอัตราส่วนระหว่างบิต '1' ต่อบิต '0' หรือ Extinction Ratio เท่ากับ 11.44 dB ซึ่งมากกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ว่าควรมีค่าเกิน 8.2 dB ตาม ITU-T G.693 [4] โดยมีกำลังแสงเฉลี่ย 1.2 mW ส่วนช่วงเวลาขาขึ้นมีค่า 42.2 ps และช่วงเวลาขาลงมีค่า 28.9 ps ซึ่งตรงตามคุณลักษณะสมบัติของ EML ตัวนี้

จากนั้นทำการวัดสเปกตรัมสัญญาณแสงขาออกด้วยเครื่องวัดสเปกตรัมทางแสง (Optical Spectrum Analyzer, OSA) หลังทำการมอดูเลตแล้วยอดสเปกตรัมทางแสงเปลี่ยนไปเล็กน้อยทางด้านความยาวคลื่นที่สูงขึ้น จึงปรับตัวความต้านทานปรับค่าได้อ้างอิง R52 ที่ตัวควบคุมอุหณภูมิเพื่อให้ได้ค่ายอดสูงสุดที่ 1551.72 nm ดังรูปที่ 19

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



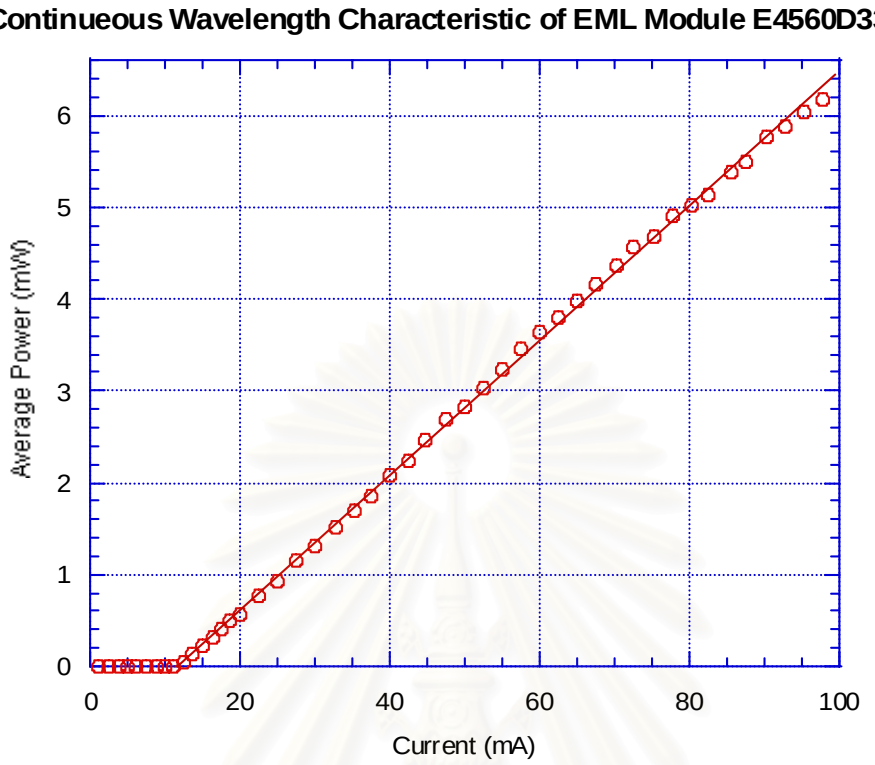
รูปที่ 19 สเปกตรัมทางแสงของสัญญาณขาออกตัว EML ตัวที่ 2

1.2 ตัวส่งสัญญาณความยาวคลื่นที่ 1 (λ_1) สร้างสัญญาณความยาวคลื่น 1550.92 nm

1.2.1 แหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่นที่ 1

แหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่นที่ 1 เป็นเลเซอร์ชนิด EML เช่นเดียวกับแหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่นที่ 2 โดยใช้หลักการมอดูเลตแบบดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า ตัว EML ตัวที่ 1 นี้เลือกใช้โมดูล E4560D33 บริษัท CyOptics ซึ่งเป็นเลเซอร์ที่มีคุณลักษณะเช่นเดียวกันกับ EML ตัวที่ 2 แต่แสงที่สร้างขึ้นจะมีความยาวคลื่น 1550.92 nm ซึ่งห่างจากความยาวคลื่นแสงตัวที่ 2 เป็นระยะ 0.8 nm หรือ 100 GHz โดยเลเซอร์จะนำมาบักรีประกบติดกับบอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสงที่จะกล่าวถึงในหัวข้อ 1.2.4 และควบคุมอุณหภูมิด้วยตัวควบคุมอุณหภูมิภายนอกในหัวข้อ 1.2.2

ทดสอบคุณลักษณะของ EML ที่ใช้ในการทดลองเพื่อส่งความยาวคลื่นที่ 2 พบว่าคุณลักษณะของ DFB ที่อยู่ภายในนั้นกำเนิดกำลังทางแสงต่อเนื่อง CW เป็นสัดส่วนกับกระแสที่ขับเลเซอร์ดังรูปที่ 20 ซึ่งจะพบว่ามีกระแสขีดเริ่มเปลี่ยนอยู่ที่ 11.39 mA



รูปที่ 20 กราฟคุณลักษณะสมบัติของ DFB ภายใน EMLตัวที่ 2 ระหว่างกำลังทางแสงขาออกกับกระแสที่ขับเลเซอร์

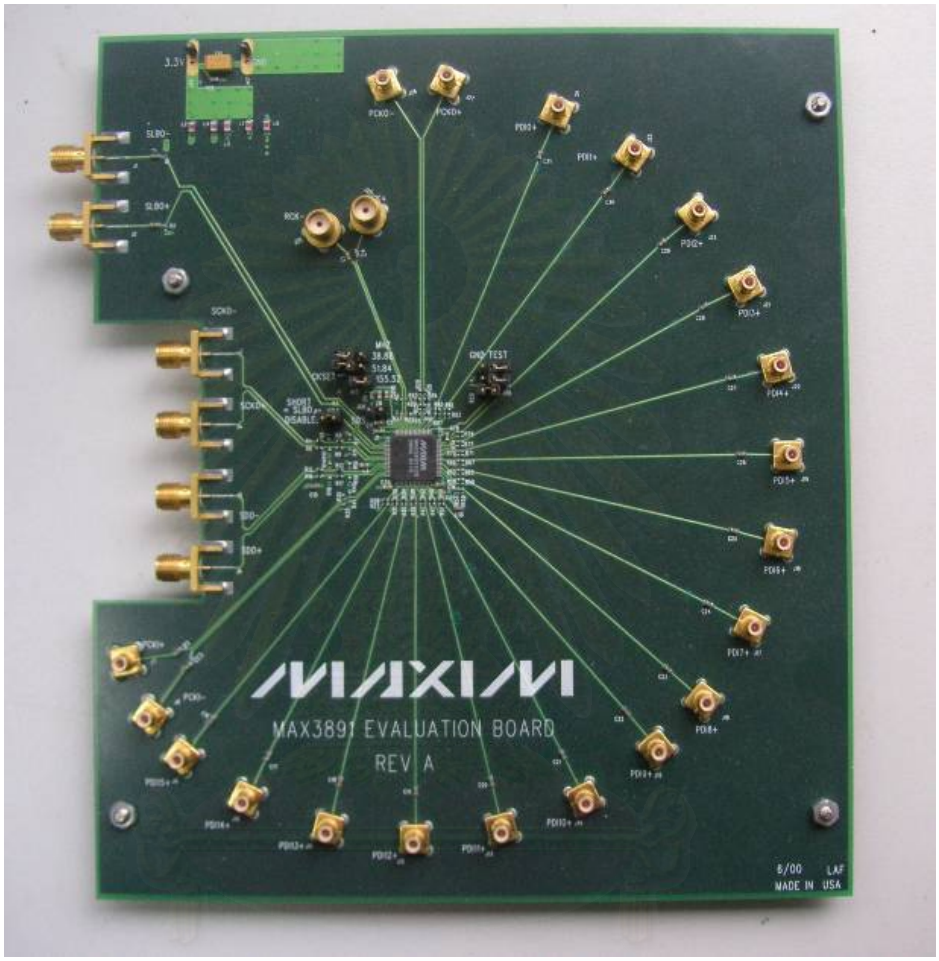
1.2.2 ตัวควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller)

ตัวควบคุมอุณหภูมิที่เลือกใช้ในการสร้างสัญญาณความยาวคลื่นที่ 1 นี้เป็นตัวควบคุมอุณหภูมิอีกตัวที่โมดูลเดียวกันกับการสร้างสัญญาณความยาวคลื่นที่ 2 ดังที่กล่าวในหัวข้อ 1.1.3 นั่นคือโมดูล LDT-5100 จากบริษัท ILX Lightwave พอร์ตขาออกของอุปกรณ์ตัวนี้จะใช้สายเคเบิลชนิด CC-505 TEC Interconnect Cable ต่อเข้ากับบอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสงที่จะกล่าวถึงถัดไปในหัวข้อ 1.2.4 เพื่อไปควบคุมอุณหภูมิของเลเซอร์ที่ประกอบบนบอร์ดนั้น

1.2.3 ตัวซิเรียลไลเซอร์ (Serializer)

ตัวซิเรียลไลเซอร์ถูกเลือกใช้เพื่อรวมสัญญาณข้อมูลความเร็วต่ำจากหลายช่องสัญญาณให้เป็นสัญญาณอนุกรมเพียง 1 ช่องสัญญาณ เนื่องจากแหล่งกำเนิดข้อมูลในการทดลองเพื่อสร้างสัญญาณความยาวคลื่นที่ 2 นี้จะใช้ตัว Field-Programmable Gate Array (FPGA) สร้างสัญญาณอัตราข้อมูลที่ความเร็ว 155 Mb/s จำนวน 16 ช่องสัญญาณ ตัวซิเรียลไลเซอร์จึงจำเป็นที่จะต้องใช้ในการรวมสัญญาณข้อมูลแบบอนุกรมให้มีอัตราข้อมูลที่สูงขึ้นเป็น 2.5 Gb/s

ตัวซิเรียลไลเซอร์ที่เลือกใช้เป็นชุดบอร์ดวงจร Serializer Evaluation Board โมดูล MAX3890EVKIT ซึ่งจะมีชิปโมดูล MAX3890 อยู่ภายใน ของบริษัท MAXIM โดยตัววงจรรวมนี้จะทำการคูณเพิ่มความถี่ของสัญญาณนาฬิกาอ้างอิงไปด้วย แสดงรูปตัวซิริเรียลไลเซอร์ดังรูปที่ 21



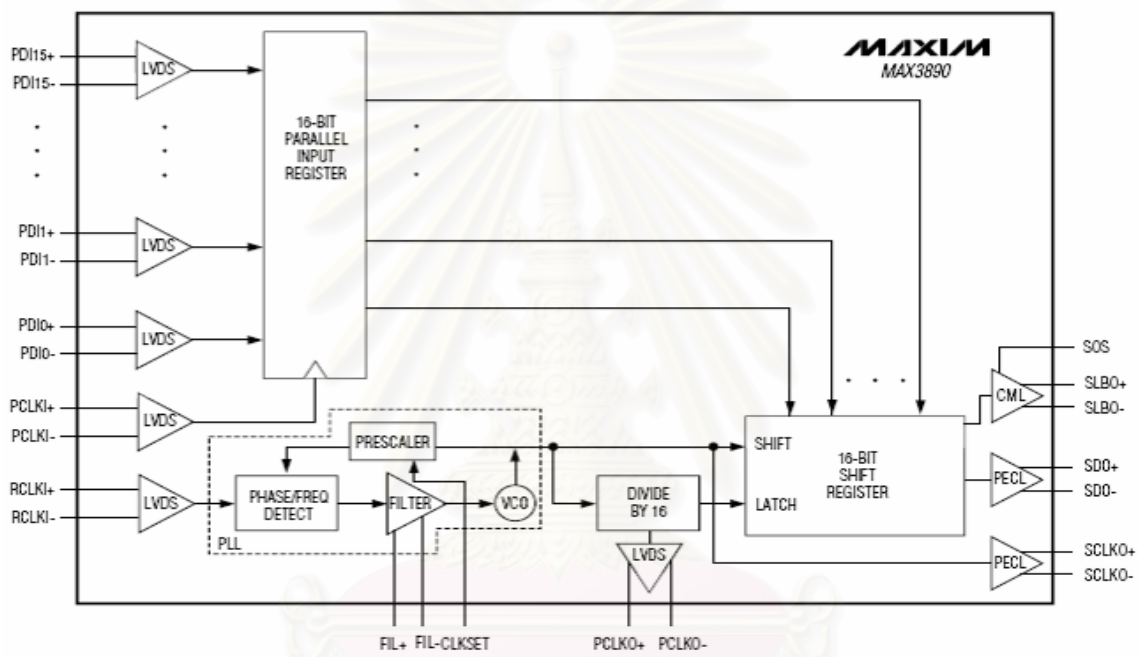
รูปที่ 21 ตัวซิเรียลไลเซอร์โมดูล MAX3890EVKIT ผลิตโดยบริษัท MAXIM

การทำงานของตัวซิเรียลไลเซอร์ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 22 เริ่มต้นจากสัญญาณนาฬิกาและข้อมูลจำนวน 16 สัญญาณที่สร้างจาก FPGA ที่ความเร็ว 155 Mb/s จะถูกป้อนเข้าไปยัง RCLK และ PDI0-PDI15 ตามลำดับในลักษณะของสัญญาณแบบผลต่าง (Differential Signal) โดยจะมีระดับสัญญาณแบบ Low Voltage Differential Signal (LVDS) ทั้งหมด ซึ่งมีระดับแรงดันจาก 1.075V-1.425V หรือประมาณ 350 Vp-p

ในส่วนของสัญญาณนาฬิกานั้นจะผ่านกรรมวิธี 2 ขั้นตอน ภายในตัวซิเรียลไลเซอร์ขั้นตอนแรกคือสัญญาณนาฬิกาถูกคูณขึ้นออกมาเป็นสัญญาณนาฬิกาที่มีความถี่ 2.5 GHz ก่อนจะทำการ

หารความถี่แล้วส่งออกมาที่ PCLKO สัญญาณนาฬิกาที่ถูกหารจะมีความถี่เท่าเดิมคือ 155 MHz ที่มีเฟสตรงกับสัญญาณนาฬิกา 2.5 GHz ซึ่งจะถูกป้อนไปยัง PCLKI เพื่อไปสั่งให้รีจิสเตอร์ขาเข้าแบบขนาน (Parallels Input Register) ทำการเลื่อนข้อมูลขนานที่เข้ามาทาง PDI0 ถึง PDI15 ไปยังรีจิสเตอร์แบบเลื่อน (Shift Register)

ขั้นตอนที่ 2 คือสัญญาณนาฬิกาถูกคูณขึ้นออกมาเป็นสัญญาณนาฬิกาที่มีความถี่ 2.5 GHz ซึ่งเกิดจากสัญญาณนาฬิกาอ้างอิงถูกส่งเข้าไปยัง Phase Lock Loop (PLL) เพื่อทำการทำให้เฟสของสัญญาณนาฬิกาที่คูณ



รูปที่ 22 วงจรภายในของตัวซิเรียลไลเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง โมดูล MAX3890 ของบริษัท MAXIM [3]

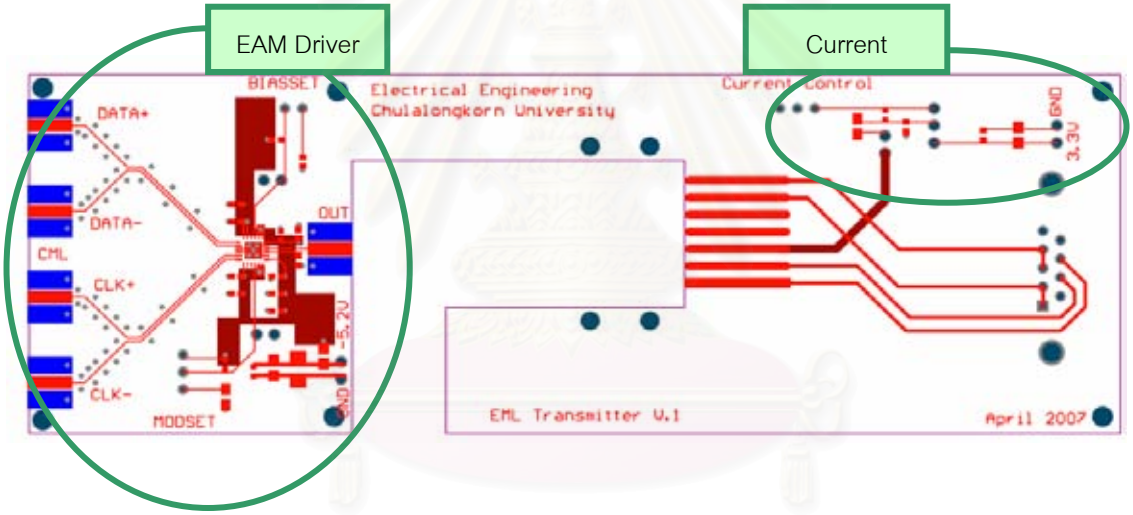
ออกมานั้นตรงกับสัญญาณนาฬิกาอ้างอิง สัญญาณนาฬิกาที่ถูกคูณขึ้นมาได้นี้จะมีหน้าที่ไปสั่งรีจิสเตอร์แบบเลื่อน ให้เลื่อนสัญญาณขนานจากรีจิสเตอร์เข้าแบบขนาน ออกมาเป็นสัญญาณอนุกรมที่ SDO และให้สัญญาณนาฬิกา 2.5 GHz ออกทาง SCLKO โดยมีระดับสัญญาณแบบ Low Voltage Positive Emitter Coupled Logic (LVPECL) ซึ่งมีระดับแรงดันอยู่ระหว่าง1.075 - 2.35 V หรือแรงดันจากยอดถึงยอด 1.275 V

1.2.4 <u>บอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสง EML</u> (EML Optical Trasmitter)

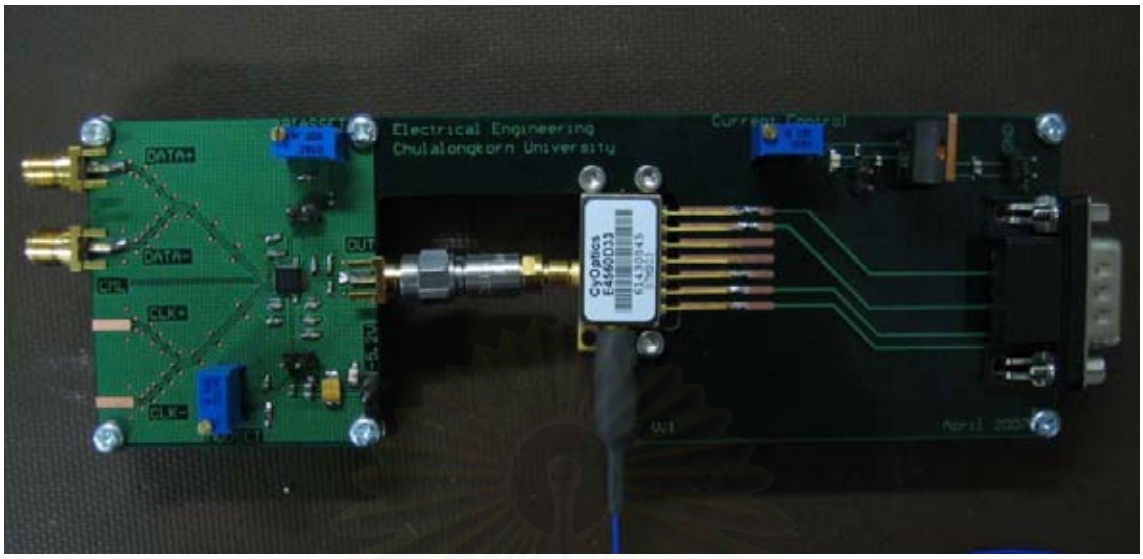
บอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสงมีหน้าที่เป็นตัวจับเลเซอร์ EML สามารถควบคุมกระแสขับเลเซอร์ตั้งแต่ช่วง 0-100 mA พร้อมทั้งสามารถขยายสัญญาณข้อมูลก่อนป้อนสู่ตัวเลเซอร์อีกด้วย ทำ

การออกแบบตัวส่งสัญญาณทางแสงโดยแบ่งลายวงจรออกเป็นสองส่วนสำคัญด้วยกันคือ ลายวงจรสำหรับควบคุมกระแสที่ขับตัว EML และลายวงจรอีกส่วนคือวงจรขยายสัญญาณทางไฟฟ้าเพื่อให้สัญญาณข้อมูลมีขนาดเพียงพอที่จะมอดูเลตตัว EML ที่ความเร็วสูง 2.5 Gb/s

ในส่วนของลายวงจรควบคุมกระแสนั้น อาศัยหลักการทำงานของตัว Regulator โมดูล LM317 เพื่อควบคุมกระแสป้อนเข้าสู่ขา Cathode+ ของ EML ส่วนการออกแบบลายวงจรความเร็วสูงของวงจรขยายสัญญาณข้อมูลนั้นต้องมีการคำนวณค่าอิมพิแดนซ์ของลายวงจรให้เหมาะสมกับวงจรรวม (Integrated Circuits, ICs) ที่เลือกใช้ ซึ่งบอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสงนี้ได้ทำการเลือกใช้วงจรรวมของตัวขับ EAM โมดูล MAX3941 ของบริษัท MAXIM วงจรที่ออกแบบนั้นประยุกต์มาจากคำแนะนำในการออกแบบลายวงจรใน datasheet และผ่านการทำ Simulation ลายวงจรด้วยโปรแกรม Sonnet 9.52 ซึ่งลายวงจรที่ออกแบบทั้งสองส่วนนั้นเป็นดังรูปที่ 23

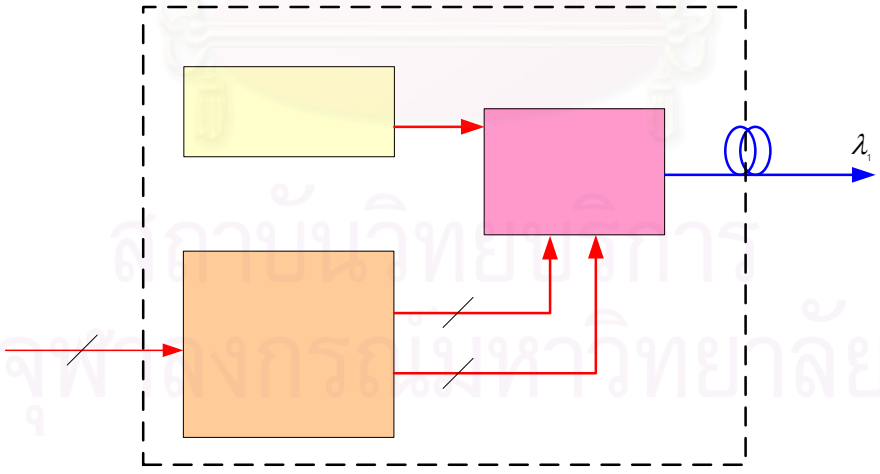


รูปที่ 23 ลายวงจรตัวส่งสัญญาณทางแสงความเร็ว 2.5 Gb/s



รูปที่ 24 ตัวส่งสัญญาณทางแสงความยาวคลื่นที่ 1

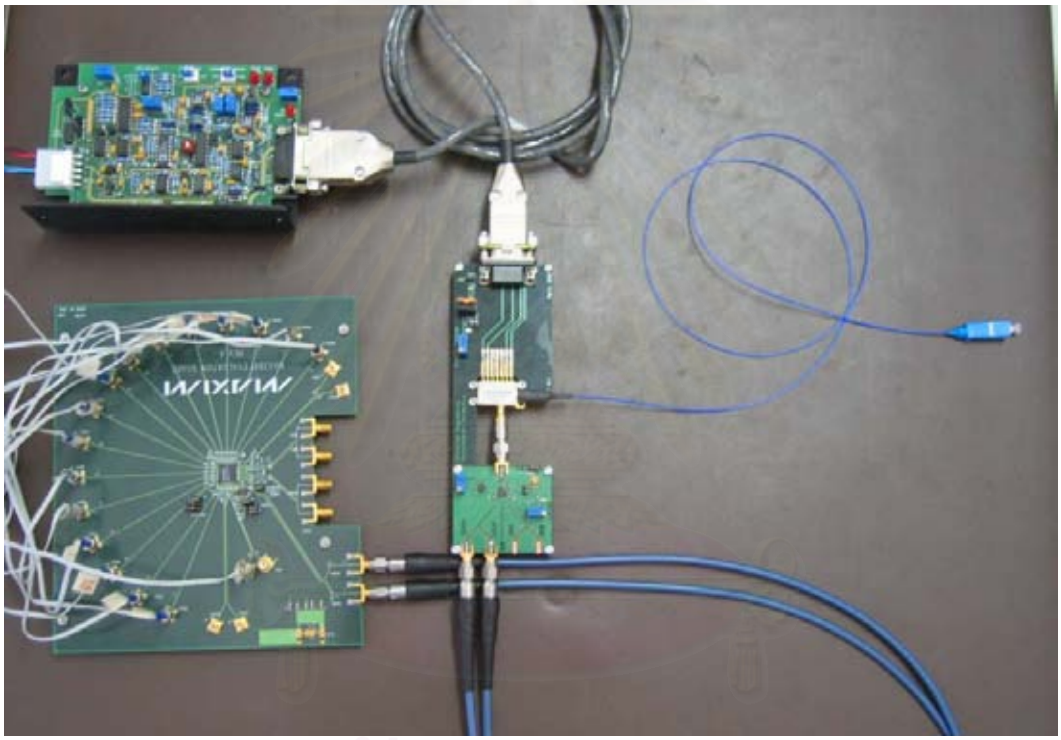
ประกอบตัว EML จากหัวข้อ 1.2.1 เข้ากับบอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสงดังรูปที่ 24 สัญญาณทางแสงขาออกจากเลเซอร์ ป้อนไฟเลี้ยงบอร์ดตัวส่งสัญญาณทางแสง -5.2 V และ 3.3 V ป้อนสัญญาณข้อมูลอัตราบิต 2.5 Gb/s จากตัวซิเรียลไลเซอร์ด้วยระดับแรงดัน CML นอกจากนั้นจะต้องต่อสายเคเบิลระหว่างตัวควบคุมอุณหภูมิและตัวส่งสัญญาณทางแสงด้วย เพื่อใช้ในการควบคุมอุณหภูมิเลเซอร์ให้มีค่าคงที่ ซึ่งการเชื่อมต่ออุปกรณ์เพื่อส่งสัญญาณทางแสงความยาวคลื่นที่ 1 แสดงดังรูปที่ 25



รูปที่ 25 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ในการทดลองสร้างสัญญาณความยาวคลื่นที่ 1

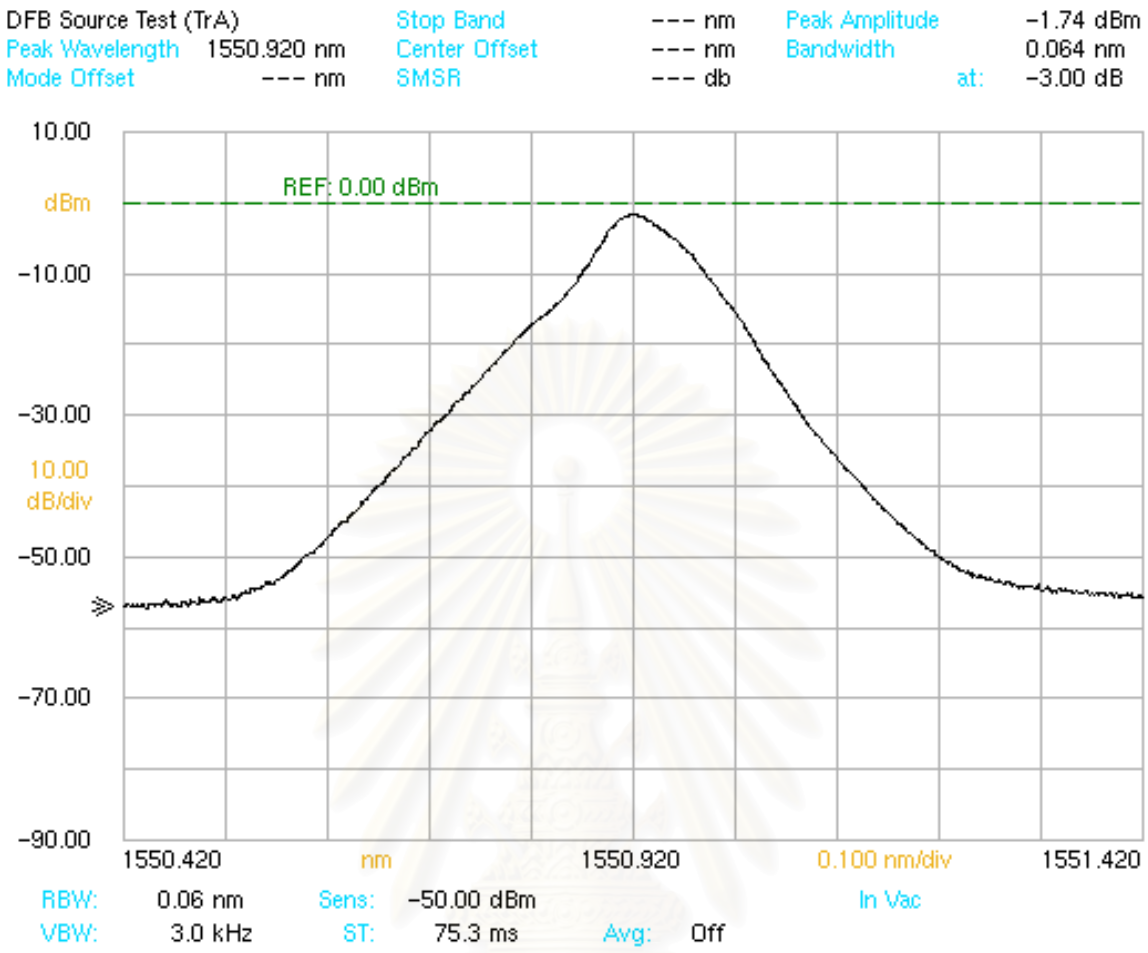
ผลการทดลองตัวส่งสัญญาณทางแสงความยาวคลื่นที่ 2

เมื่อทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์ตัวส่งสัญญาณทางแสงดังรูปการเชื่อมต่อจริงที่ 27 แล้ว สร้างสัญญาณข้อมูลลำดับบิตแบบ PRBS ที่มีจำนวนบิตข้อมูล $2^7 - 1$ ด้วยอัตราการส่งข้อมูล 155 Mb/s ด้วย FPGA โดยมีระดับสัญญาณชนิด LVDS ป้อนเข้าตัว Serializer เพื่อรวมสัญญาณให้มีอัตราข้อมูลเป็น 2.5 Gb/s ระดับ CML นำสัญญาณนี้ต่อเข้าตัวบอร์ดตัวส่งสัญญาณ จากนั้นปรับค่ากระแสขับเลเซอร์ด้วยตัวความต้านทานปรับค่าได้บนบอร์ด ตั้งแรงดันไบแอสให้มีค่า 0 V และแรงดันมอดูเลตให้มีค่า 2 V วัดลักษณะสัญญาณทางแสงขาออกจากเลเซอร์ด้วยเครื่อง DCA



รูปที่ 26 การเชื่อมต่ออุปกรณ์จริงเพื่อส่งสัญญาณแสงความยาวคลื่นที่ 2

ทำการปรับจูนความยาวคลื่นด้วยตัวควบคุมอุณหภูมิให้มีความยาวคลื่นตรงตามต้องการคือ 1550.92 nm โดยสเปกตรัมสัญญาณทางแสงที่ได้มีลักษณะดังรูปที่ 27



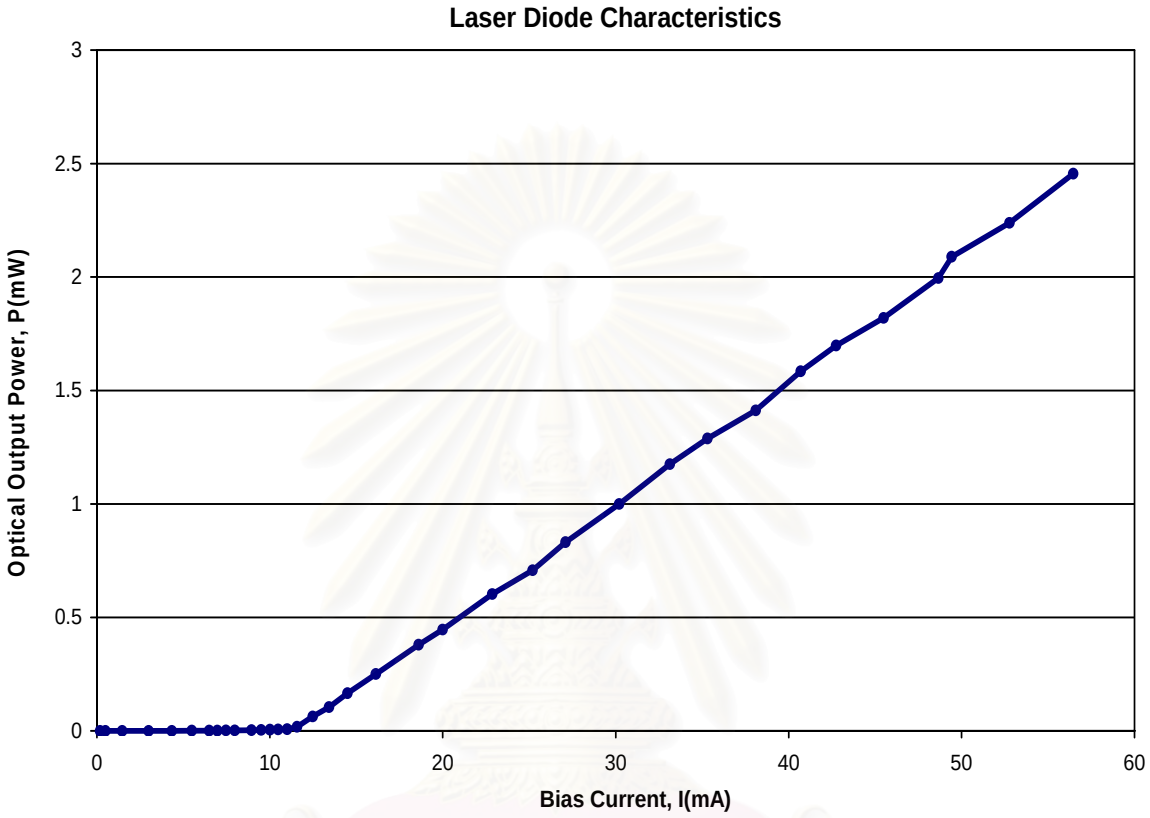
รูปที่ 27 สเปกตรัมทางแสงของสัญญาณขาออกตัว EML ตัวที่ 1

1.3 ตัวส่งสัญญาณความยาวคลื่นที่ 3 (λ_3) สร้างสัญญาณความยาวคลื่น 1552.52 nm

1.3.1 แหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่นที่ 3

เลเซอร์ที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่นที่ 3 เป็นเลเซอร์ชนิด Distributed Feedback Laser (DFB) ซึ่งใช้เทคนิคการมอดูเลตโดยตรง (Direct Modulation) ในการมอดูเลตสัญญาณ ตัวเลเซอร์ที่เลือกใช้เป็นชนิด Uncooled ซึ่งจะมีขนาดเล็กและมีวงจรที่ซับซ้อนน้อยกว่าแบบที่มี Thermo Electric Cooler (TEC) อย่างเช่นเลเซอร์ในหัวข้อ 1.1.1 และ 1.2.1 โดยเลเซอร์ที่เลือกใช้ในการทดลองคือ โมดูล D572 ของบริษัท Triquint Semiconductor ซึ่งสร้างสัญญาณแสงที่ความยาวคลื่น 1552.52 nm

เมื่อทำการทดสอบคุณลักษณะของเลเซอร์ชนิดนี้ด้วยการวัดค่ากำลังทางแสงด้วยตัว Optical Power Monitor และวัดค่ากระแสป้อนเข้ากับเลเซอร์ด้วยตัวมัลติมิเตอร์ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงขาออกกับกระแสขับเลเซอร์แสดงดังรูปที่ 28

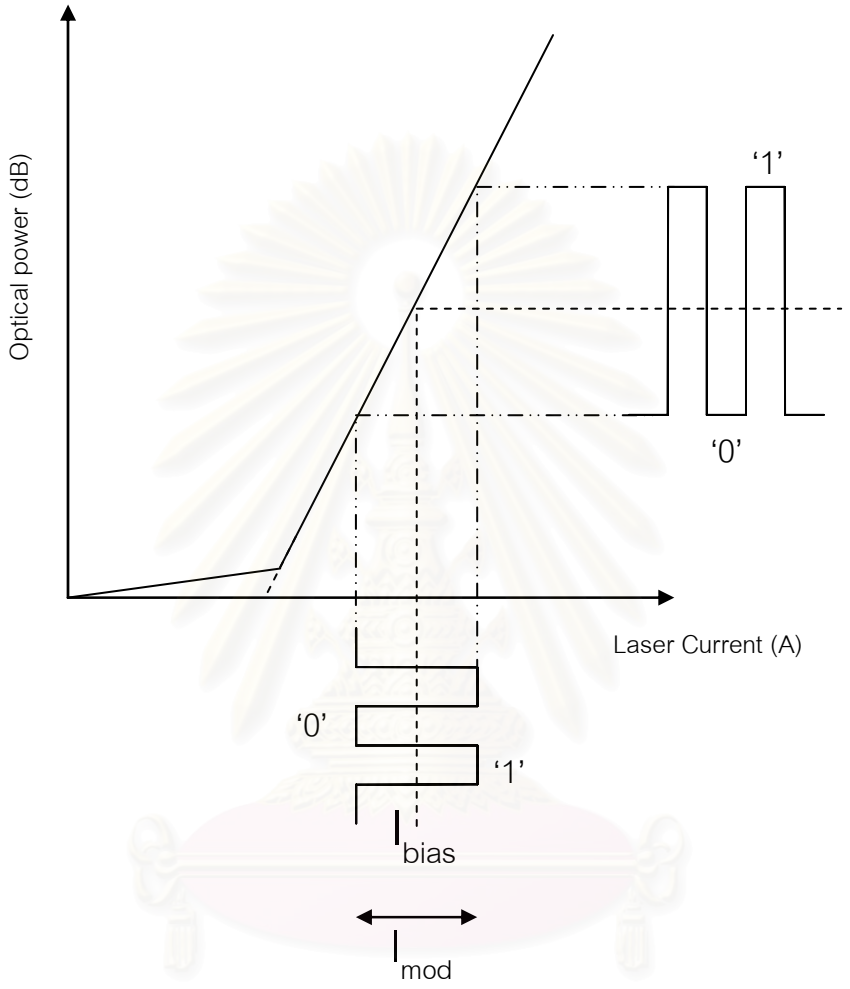


รูปที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังทางแสงและกระแสขับเลเซอร์ DFB

จากรูปที่ 28 คุณลักษณะสมบัติของเลเซอร์ที่เลือกใช้ได้ค่ากระแสขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold Current, I_{th}) เท่ากับ 11.55 mA ค่าความชันของเส้นกราฟซึ่งหมายถึงประสิทธิภาพในการแหลงกระแสเป็นพลังงานแสงซึ่งเท่ากับ 0.0538 W/A ค่าสัดส่วน Extinction มากที่สุดที่เป็นไปได้เท่ากับ 13.01 dB ซึ่งเกินกว่า 8.2 dB ที่กำหนดไว้ เลเซอร์ตัวนี้สามารถให้พลังงานทางแสงสูงสุด 2.5 mW และมีค่าความกว้างของ Spectrumแสงเท่ากับ 0.09 nm

เทคนิคการมอดูเลตโดยตรงเป็นวิธีการมอดูเลตที่ง่ายที่สุด ไม่ยุ่งยากซับซ้อนอย่างวิธีอื่นๆ และไม่จำเป็นต้องใช้ตัวมอดูเลเตอร์และตัวขับมอดูเลเตอร์ แต่จะมีตัวขับเลเซอร์ (Laser Driver) แทน หลักการทำงานของการมอดูเลตโดยตรงนั้นจะทำการป้อนสัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้าเข้าตัวขับเลเซอร์ ซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณข้อมูลให้เพียงพอที่จะไบแอสเดินหน้ากับตัวเลเซอร์ ตัวขับเลเซอร์จะทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณบิต ‘1’ และบิต ‘0’ เหมือนเดิม แต่จะอยู่ในโดเมนกระแสไฟฟ้าที่มากเพียง

พอที่จะขับเลเซอร์ให้ได้ระดับกำลังทางแสงขาออกสูงตามที่ต้องการ ดังรูปที่ 29 สัญญาณข้อมูลบิต ‘1’ เมื่อทำการมอดูเลตแล้วจะถูกแทนที่ด้วยระดับกำลังทางแสงค่าหนึ่ง ส่วนสัญญาณข้อมูลบิต ‘0’ จะถูกแทนที่ด้วยระดับกำลังทางแสงอีกค่าหนึ่งซึ่งน้อยกว่า ในการปรับระดับกำลังทางแสง

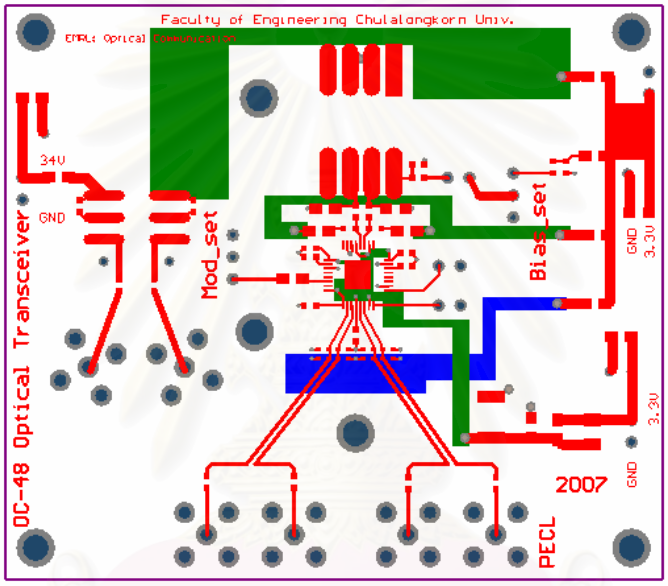


รูปที่ 29 หลักการมอดูเลตโดยตรง

กระแส 2 ชนิดที่มีความจำเป็นในการมอดูเลตสัญญาณคือ กระแสไบแอส (I_{bias}) เป็นกระแสคงที่ที่ใช้ตั้งช่วงการทำงานของตัวเลเซอร์ให้อยู่เหนือค่าขีดเริ่มเปลี่ยนและเป็นตัวกำหนดระดับกำลังทางแสงขาออกของเลเซอร์ ส่วนกระแสอีกชนิดคือกระแสมอดูเลต (I_{mod}) ซึ่งเป็นกระแสสลับที่ใช้ในการกำหนดระดับกำลังทางแสงของสัญญาณข้อมูลบิต ‘1’ และบิต ‘0’ ซึ่งถ้าความต่างของระดับกระแสสัญญาณบิต ‘1’ และบิต ‘0’ มีค่าแตกต่างกันมากก็จะทำให้ต้องใช้กระแสในการขับมาก แต่จะส่งผลดีกับการรับ-ส่งข้อมูลทำให้มีอัตราความผิดพลาดลดลง

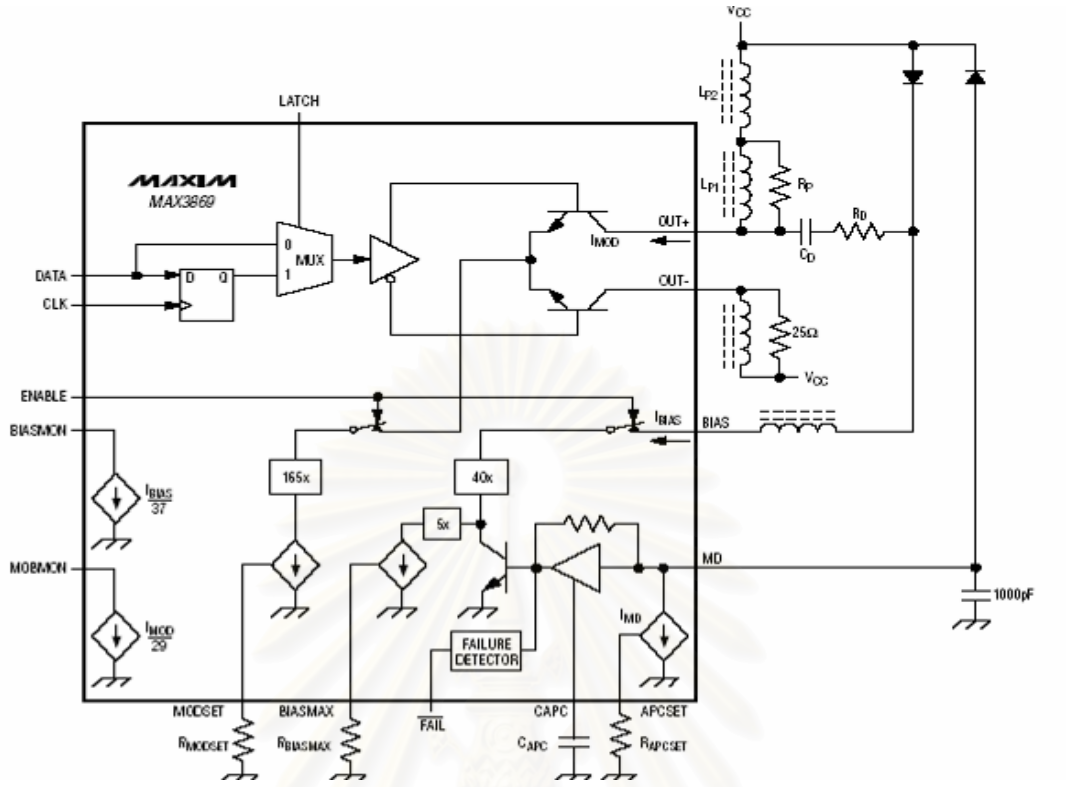
1.3.2 บอร์ดตัวรับ-ส่งสัญญาณทางแสง (Optical Transceiver)

ใช้บอร์ดตัวรับ-ส่งสัญญาณทางแสงในการสร้างสัญญาณทางแสงความยาวคลื่นที่ 3 โดลย ลายวงจรของบอร์ดตัวรับ-ส่งสัญญาณทางแสงเป็นดังรูปที่ 30 จะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นฝั่งส่งซึ่งใช้เทคนิคการมอดูเลตสัญญาณทางแสงโดยตรงจากสัญญาณข้อมูลที่ป้อนเข้าไป และมีวงจรสำหรับชิปตัวขยายสัญญาณโมดูล MAX3869 ของบริษัท MAXIM ใช้ในการขยายสัญญาณเพื่อขับเลเซอร์ (Laser Driver) โดยวงจรภายในของตัวขับเลเซอร์ที่ใช้เป็นดังรูปที่ 31 อีกส่วนหนึ่งของบอร์ดคือส่วนของฝั่งรับสัญญาณทางแสงซึ่งในการทดลองนี้จะไม่ได้ใช้



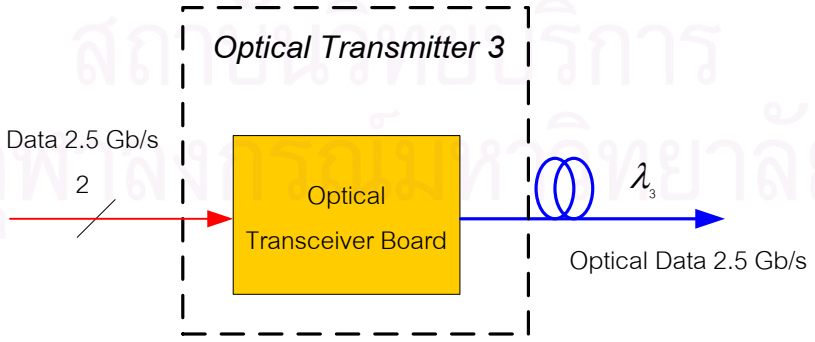
รูปที่ 30 ลายวงจรตัวรับ-ส่งสัญญาณทางแสง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 31 วงจรภายในของตัวขับเลเซอร์ที่ใช้ในบอร์ดตัวรับ-ส่งสัญญาณทางแสง โมดูล MAX3869 [3]

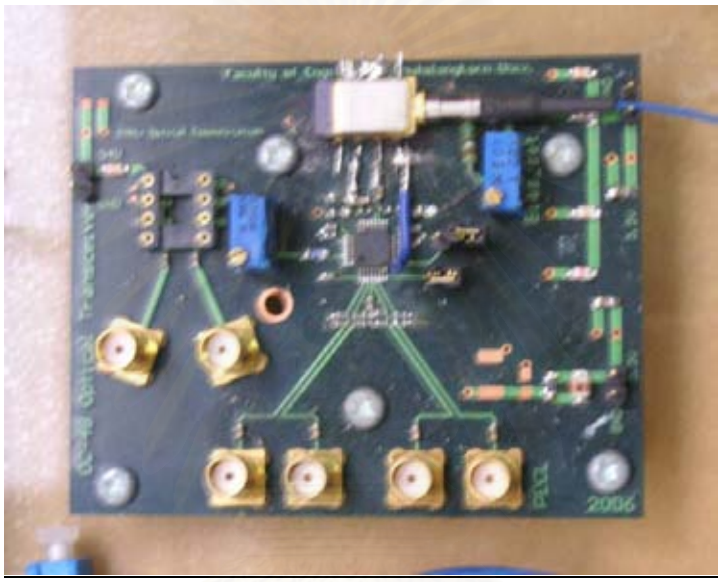
ทำการประกบตัวเลเซอร์ด้วยการบักรีลงบนบอร์ดตัวรับ-ส่งสัญญาณทางแสง ป้อนไฟเลี้ยงบอร์ด 3.3 V ทางฝั่งตัวส่งสัญญาณทางแสง ซึ่งคุณลักษณะของบอร์ดนี้สามารถส่งสัญญาณด้วยอัตราบิตที่สูงถึง 2.5 Gb/s สัญญาณแสงขาออกนั้นสามารถปรับกำลังของแสงได้ด้วยตัวความต้านปรับค่าได้ในการปรับกระแสมอดูเลต ลักษณะการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในการส่งสัญญาณทางแสงความยาวคลื่นที่ 3 เป็นดังรูปที่ 32



รูปที่ 32 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ในการทดลองสร้างสัญญาณความยาวคลื่นที่ 2

ผลการทดลองตัวส่งสัญญาณทางแสงความยาวคลื่นที่ 3

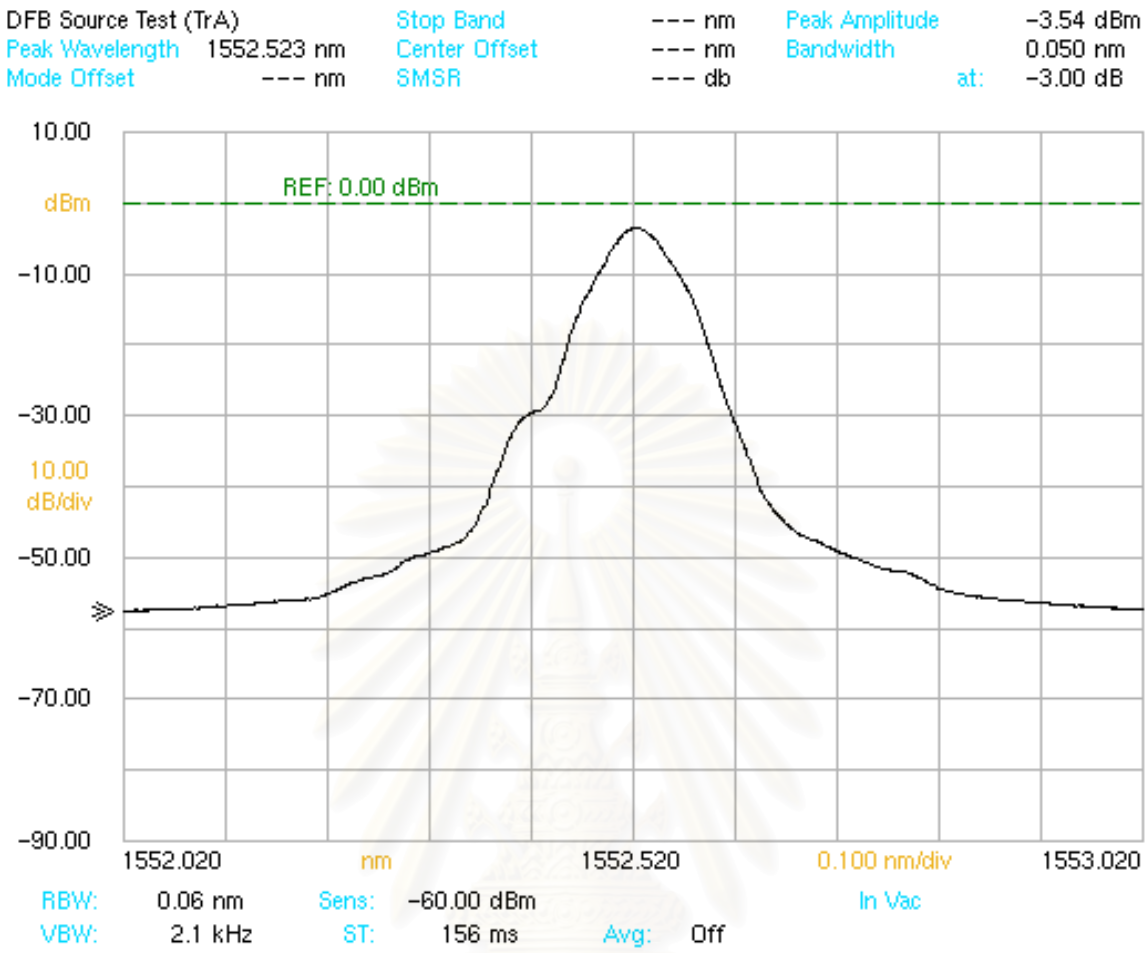
เมื่อทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์ตัวส่งสัญญาณทางแสงดังรูปการเชื่อมต่อจริงที่ 33 แล้ว สร้างสัญญาณข้อมูลลำดับบิตแบบ 2.5Gb/s โดยมีระดับสัญญาณชนิด LVDS ป้อนเข้าตัวบอร์ดตัวรับ-ส่งสัญญาณที่พอร์ต Data+ และ Data- จากนั้นปรับค่ากระแสขับเลเซอร์ด้วยตัวความต้านทานปรับค่าได้บนบอร์ด ตั้งแรงดันไบแอสให้มีค่ามากกว่ากระแสขีดเริ่ม ปรับให้กำลังทางแสงมีกำลังทางแสงขาออกประมาณ -7 dBm



รูปที่ 33 การเชื่อมต่ออุปกรณ์จริงเพื่อส่งสัญญาณแสงความยาวคลื่นที่ 3

จากนั้นทำการวัดสเปกตรัมสัญญาณแสงขาออกด้วยเครื่องวัดสเปกตรัมทางแสง (Optical Spectrum Analyzer, OSA) สเปกตรัมทางแสงที่วัดได้มีค่ายอดสูงสุดที่ประมาณ 1552.52 nm ตามมาตรฐาน ITU-grid ซึ่งห่างจากความยาวคลื่นที่ 2 ประมาณ 0.8 nm หรือ 100 GHz ดังรูปที่ 34

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



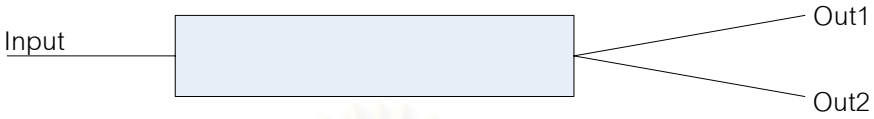
รูปที่ 34 สเปกตรัมทางแสงของสัญญาณขาออกตัว EML ตัวที่ 3

2. ตัวมัลติเพลกซ์/ดีมัลติเพลกซ์ความยาวคลื่น (Wavelength Multiplexer/Demultiplexer)

2.1 ตัวมัลติเพลกซ์ความยาวคลื่น

การทดลองนี้ใช้ตัวคู่ต่อสัญญาณทางแสง (Fiber optic coupler) เป็นอุปกรณ์ทางแสงใช้สำหรับมัลติเพลกซ์หรือดีมัลติเพลกส์สัญญาณทางแสง เมื่อพิจารณาพอร์ตของ coupler สามารถแบ่ง coupler ออกเป็น 2 ชนิด ถ้ามีพอร์ตขาเข้า 1 พอร์ตและขาออก N พอร์ต เรียกว่า Tee couplers (1*N) ถ้าพอร์ตขาเข้า N พอร์ต และพอร์ตขาออก N พอร์ต จะเรียกว่า Star couplers (N*N) เมื่อพิจารณาความยาวคลื่นแสงที่ coupler ทำงาน ชนิดของ coupler จะแบ่งออกเป็น 3 ชนิดด้วยกันคือ single window, dual window และ wideband ชนิด single window coupler มีไว้สำหรับแสงความยาวคลื่นเพียงความยาวคลื่นเดียวและหน้าต่างของความยาวคลื่นแคบอีกด้วย dual wavelength coupler จะถูกออกแบบให้ใช้ได้สองความยาวคลื่นโดยหน้าต่างมีความกว้างขึ้น ส่วน wideband coupler

ออกแบบมาเพื่อให้ให้ความยาวคลื่นเดียว แต่หน้าต่างความยาวคลื่นจะกว้างกว่าชนิดแรก ความยาวคลื่นที่นิยมใช้กันคือ 633 nm, 830 nm, 1060 nm, 1300 nm และ 1550 nm ตัว Coupler แบบ 1*2 นั้นจะมีลักษณะการทำงานดังรูปที่ 35



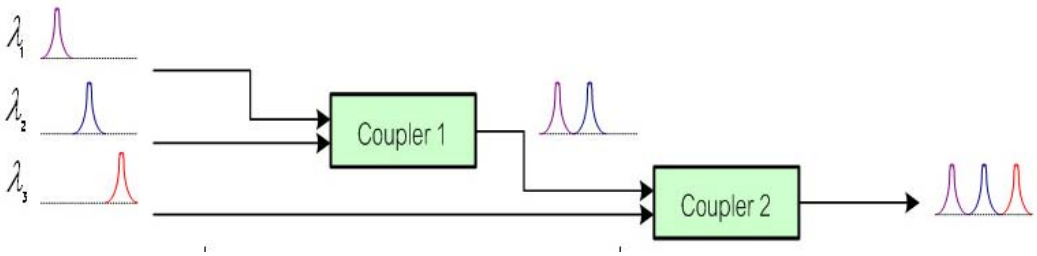
รูปที่ 35 ลักษณะตัวคู่ต่อสัญญาณทางแสง (Fiber optic coupler)

Coupler ที่จะใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 2 ตัว เป็นตัวคู่ต่อสัญญาณทางแสงชนิด Dual Wavelength Coupler ทำงานที่ความยาวคลื่น 1310/1550 nm มีพอร์ตเป็นชนิด 1*2 Tee coupler ซึ่งมีลักษณะยอมให้แสงเดินทางได้ทั้งไปและกลับ (bi-directional) โดยเส้นใยแก้วที่ทำการเชื่อมต่อเป็นเส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดี่ยว (Single Mode Fiber, SMF) คุณสมบัติของ coupler ตัวนี้เมื่อป้อนแสงที่พอร์ตขาเข้า สัญญาณขาออกจะแบ่งออกพอร์ต Out 1 และพอร์ต Out 2 ประมาณข้างละ 50%

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของ Coupler ตัวที่ 1 และ 2

Lead mark	Operating Wavelength(nm)	Coupling Ratio	Insertion Loss(dB)
Out1	1310 (+/- 40 nm)	48.27%	3.40
Out2		51.73%	3.10
Out1	1550 (+/- 40 nm)	48.10%	3.45
Out2		51.89%	3.12

ในการทดลองจะใช้คุณสมบัติ Bi-directional ของตัวคู่ต่อสัญญาณเพื่อทำการรวมแสงสองความยาวคลื่นเข้าด้วยกัน จากการวงจรการส่งสัญญาณความยาวคลื่นที่ 1 และ 2 นำสัญญาณข้อมูลแสงที่มีความยาวคลื่นที่แตกต่างกันนี้ป้อนเข้าพอร์ต Out1 และ Out2 ของตัวคู่ต่อสัญญาณตามลำดับ ข้อมูลจะถูกรวมเข้าด้วยกันออกที่พอร์ต Input ของตัวคู่ต่อสัญญาณ จากนั้นนำสัญญาณที่ได้จากตัวคู่ต่อสัญญาณและสัญญาณความยาวคลื่นที่ 3 มารวมกันอีกครั้งด้วยตัวคู่ต่อสัญญาณตัวที่ 2 ท้ายที่สุดสัญญาณข้อมูลขาออกจะเป็นสัญญาณข้อมูลที่มีความยาวคลื่น 3 ความยาวคลื่นไว้ด้วยกันบนเส้นใยนำแสงเส้นเดียว ดังรูปที่ 36



รูปที่ 36 การรวมสัญญาณหลายความยาวคลื่นด้วยตัวคู่ต่อสัญญาณ

2.2 ตัวดีมัลติเพลกซ์ความยาวคลื่น การทดลองนี้ใช้อุปกรณ์ Fiber Bragg Grating กับ Circulator

2.2.1 Fiber Bragg Grating (FBG)

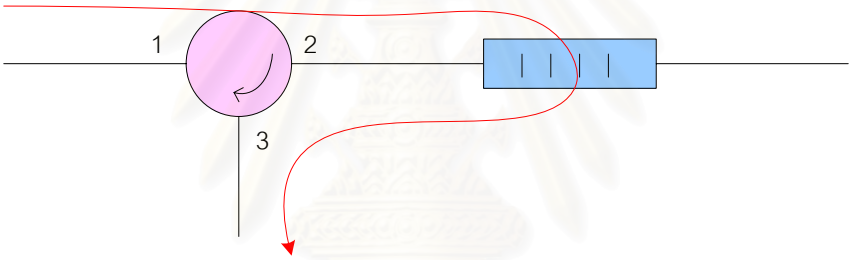
อุปกรณ์ Fiber Bragg Grating เป็นเส้นใยนำแสงที่นำมาผ่านกรรมวิธีการฉายแสงเพื่อให้ดัชนีหักเหของเส้นใยแก้วนำแสงมีค่าเปลี่ยนไป ทำให้แสงบางความยาวคลื่นที่มาตกกระทบสะท้อนกลับไป แสงที่มีความยาวคลื่นอื่นที่ไม่สัมพันธ์กับค่าดัชนีหักเหบริเวณที่ฉากแสงก็จะสามารถเดินทางผ่านออกไปได้ เปรียบเสมือนตัว FBG นั้นเป็นตัวกรองสัญญาณบางความยาวคลื่นออกนั่นเอง

ตัว FBG ที่เลือกใช้ในการทดลองมาจากบริษัท Photonixm สามารถกรองสัญญาณทางแสงที่ความยาวคลื่นกลาง 1551.72 โดยมีความกว้างของช่วงการกรองสัญญาณประมาณ 0.5 nm ตัว FBG ที่ใช้งานมีลักษณะดังรูปที่ 37

รูปที่ 37 Fiber Bragg Grating ที่ใช้ในการทดลอง

2.2.2 Circulator

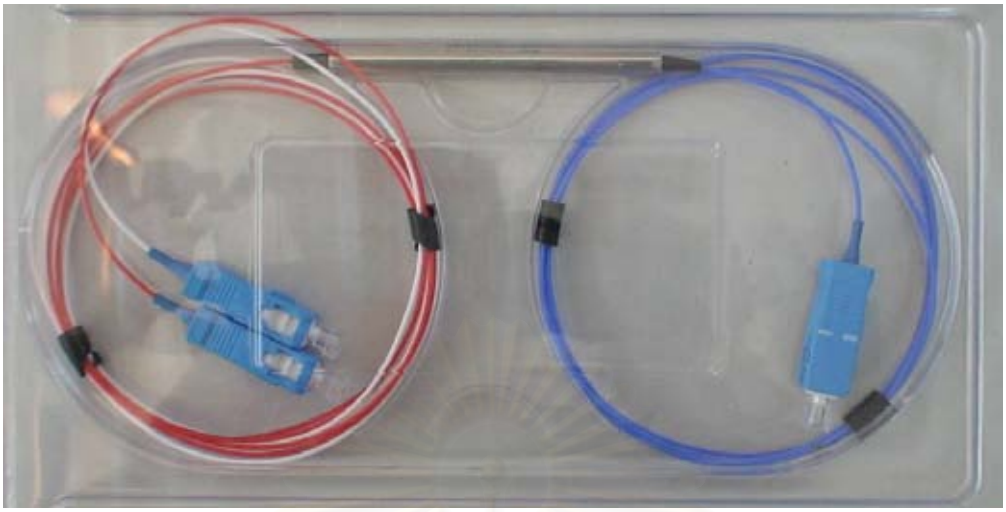
ตัว Circulator เป็นอุปกรณ์ช่วย FBG ในการกรองสัญญาณ แสง แสงที่มีความยาวคลื่นตรงกับ FBG จะทำให้สะท้อนกลับ แสงที่จะสะท้อนกลับนี้จะไม่มีพอร์ตขาออก จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ Circulator เข้าช่วย หลักการทำงานของตัว Circulator จะใช้การส่งผ่านพอร์ตถัดไป โดยตัว Circulator จะประกอบด้วยพอร์ตขาเข้า 3-4 พอร์ตเป็นส่วนมาก ยกตัวอย่างกรณีที่ Circulator มีพอร์ตทั้งหมด 3 พอร์ตนั้น แสงที่เข้ามาที่พอร์ต 1 จะส่งผ่านไปออกที่พอร์ตที่ 2 ส่วนแสงที่เข้ามาพอร์ตที่ 2 ก็จะส่งผ่านออกไปยังพอร์ตที่ 3 นั่นเอง ดังนั้นเมื่อประกอบเข้ากับตัว FBG แล้ว แสงขาเข้าที่พอร์ตที่ 1 ของ Circulator แล้วจะไปออกที่พอร์ตที่ 2 ผ่านไปยังตัว FBG แสงที่ไม่ตรงกับความยาวคลื่นของ FBG ก็จะส่งผ่านออกจาก FBG ออกไป ส่วนแสงที่ความยาวคลื่นตรงกับ FBG จะสะท้อนกลับเข้าพอร์ตที่ 2 ของตัว Circulator ซึ่งจะส่งผ่านสัญญาณต่อออกไปที่พอร์ต 3 ดังแสดงในรูปที่ 38



รูปที่ 38 การกรองสัญญาณด้วยอุปกรณ์ FBG และ Circulator

อุปกรณ์ Circulator ที่ใช้ในการทดลองกรองสัญญาณ ผลิตโดยบริษัท Agiltron ทำงานที่ความยาวคลื่น 1550 nm มีค่าสูญเสีย (Insertion Loss) จากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2 เท่ากับ 1 dB และจากพอร์ต 2 ไปพอร์ต 3 เท่ากับ 0.5 dB ตัว Circulator ที่ใช้งานมีลักษณะดังรูป 39

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

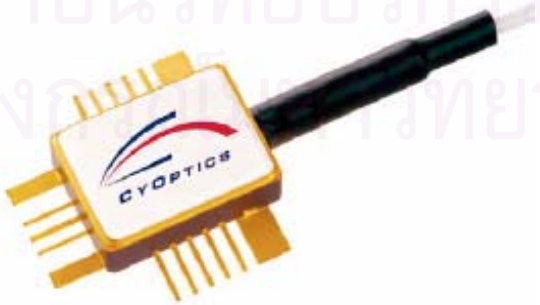


รูปที่ 39 Circulator ที่ใช้ในการทดลอง

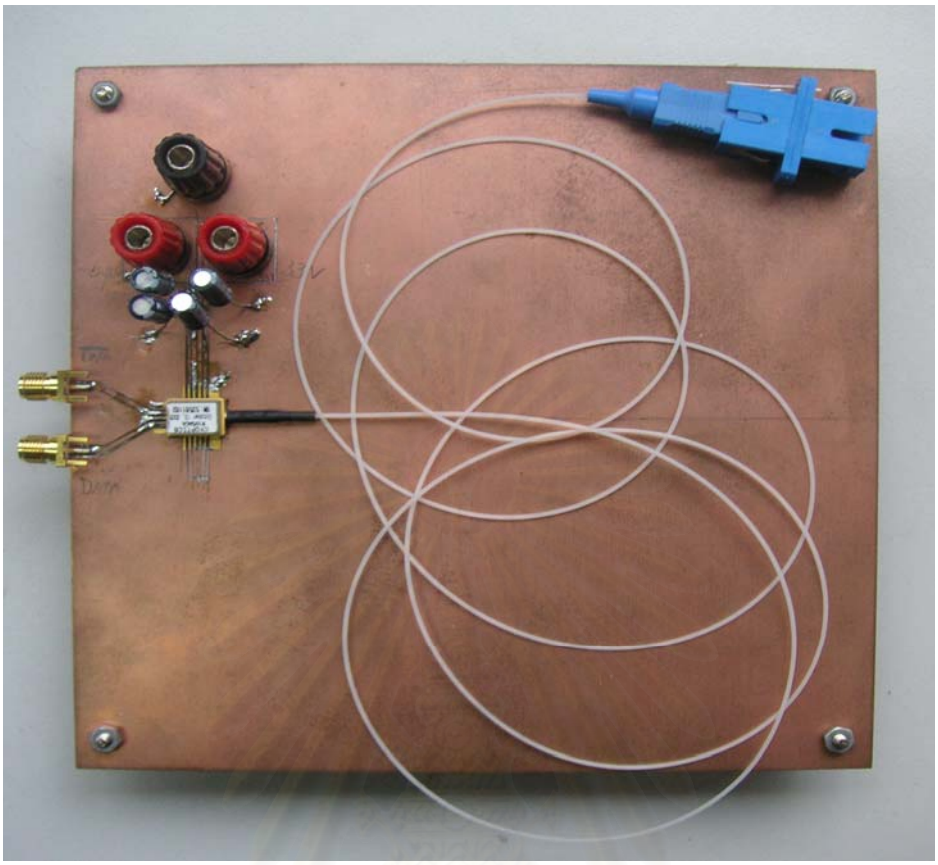
3. ตัวรับสัญญาณทางแสง (Optical Receiver)

3.1 ตัวรับแสงชนิด Avalanche (Avalanche Photo Diode, APD)

ตัวรับสัญญาณทางแสงที่เลือกใช้ในการตรวจรับสัญญาณข้อมูลปลายทางคือชนิด APD โมดูล R195A ของบริษัท Cyopics ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 40 ภายในตัวอุปกรณ์นี้จะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นตัวรับแสงและตัวขยายสัญญาณ (Transimpedance Amplifier, TIA) อยู่ภายในตัวเดียวกัน โดย APD จะมีค่า Sensitivity เท่ากับ -26 dBm ใช้ไฟเลี้ยงป้อนเท่ากับ -5.2 V และส่วนของ TIA ใช้ไฟเลี้ยงป้อน 27 V สัญญาณข้อมูลทางแสงขาเข้าจะถูกแปลงให้เป็นสัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้าแบบ Differential ซึ่งจะมีพอร์ตขาออกเป็น DATA+ และ DATA- พร้อมทั้งมีการขยายสัญญาณไฟฟ้านี้ให้มีขนาดประมาณ 700-1000 mVp-p นำอุปกรณ์มาใช้งานโดยบัดกรีประกอบ APD ลงบนบอร์ดทองแดง ดังรูปที่ 41



รูปที่ 40 APD โมดูล R195A ที่ใช้ในการทดลอง เพื่อรับสัญญาณข้อมูลทางแสง (บริษัท Cyoptics)

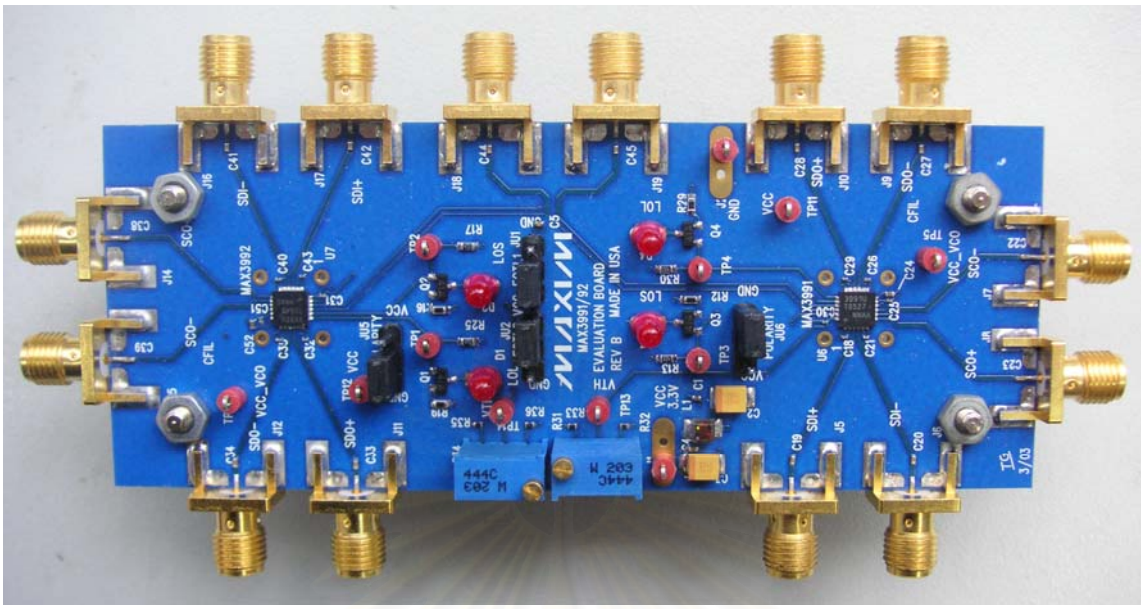


รูปที่ 41 บอร์ดตัวรับสัญญาณข้อมูลทางแสง

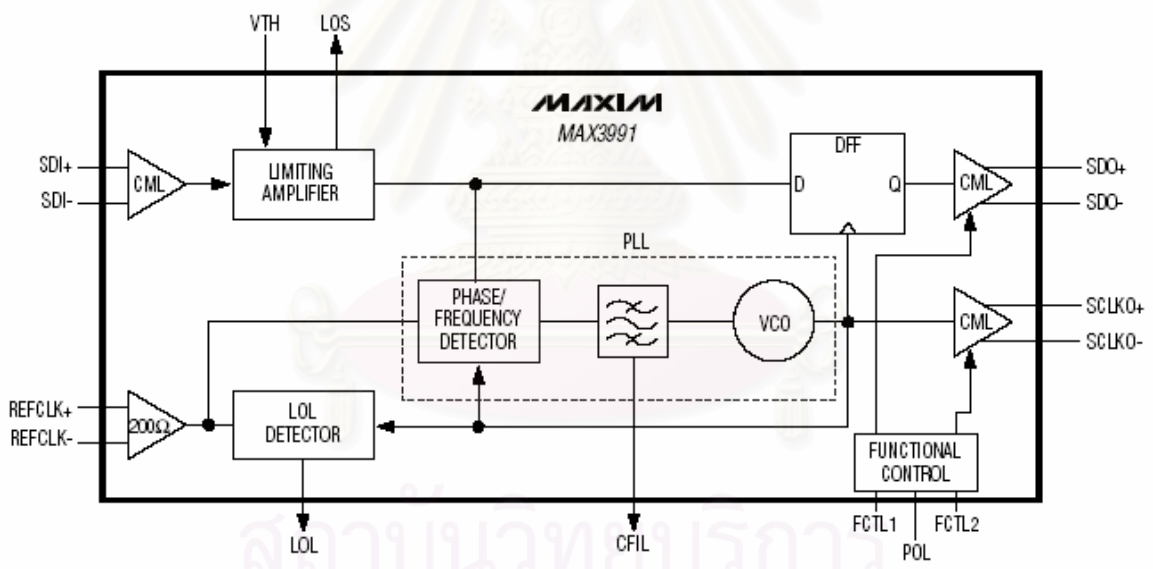
3.2 ตัวกู้คืนสัญญาณข้อมูลและสัญญาณนาฬิกา (Clock and Data Recovery, CDR)

ตัวกู้คือสัญญาณข้อมูลและสัญญาณนาฬิกามีหน้าที่ในการกู้คืนสัญญาณไฟฟ้าขาออกของตัว APD โดยการทดลองนี้ได้เลือกใช้ตัว CDR ที่เป็น Evaluation Kit Board โมดูล MAX3891EVKIT ของบริษัท MAXIM ดังรูปที่ 42 โดยบอร์ดจะมีชิป MAX3891 ซึ่งมีหน้าที่ในการกู้คืนสัญญาณข้อมูลและสัญญาณนาฬิกาซึ่งภายในชิปจะมีวงจรดังรูปที่ 43

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 42 CDR โมดูล MAX3991EVKIT ที่ใช้ในการทดลอง (บริษัท Maxim)

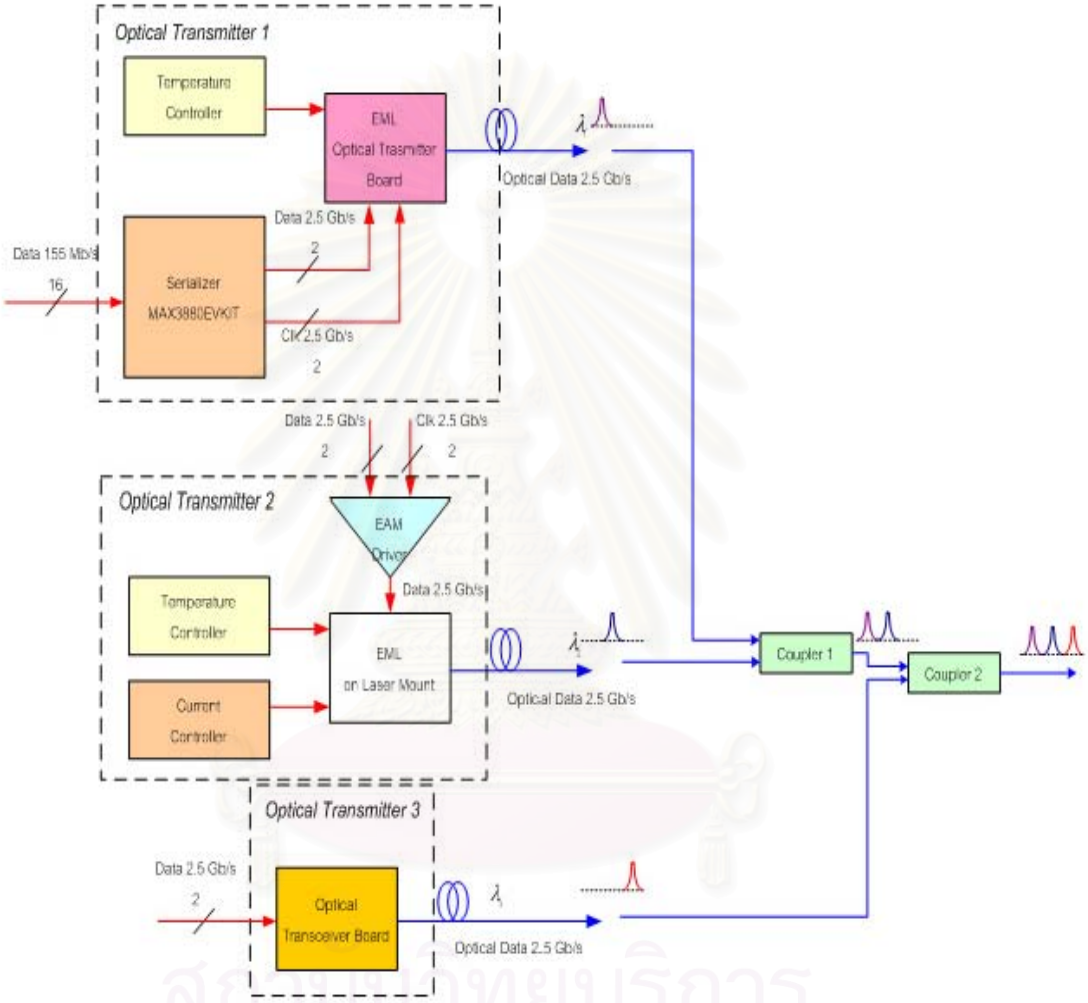


รูปที่ 43 ภายในของชิป CDR โมดูล MAX3991 [3]

ตัวบอร์ดต้องการไฟเลี้ยง 3.3 V และจำเป็นต้องป้อนสัญญาณนาฬิกาอ้างอิง 155.52 MHz เข้าทางพอร์ต REFCLK+ และ REFCLK- โดยมีระดับสัญญาณแบบ CML เมื่อตัวรับแสงทำการแปลงจากข้อมูลทางแสงให้เป็นทางไฟฟ้าชนิด Differential Signal ด้วยระดับ CML แล้วทำการป้อนสัญญาณไฟฟ้านี้เข้าทางขาเข้าของ CDR นั้นก็คือพอร์ต SDI+ และ SDI- จากนั้นตัว CDR จะทำงาน

ในการกู้คืนสัญญาณข้อมูลออกที่ขาออก SDO+ และ SDO- และกู้คืนสัญญาณนาฬิกาออกที่ขาออก SCLKO+ และ SCLKO-

การทดลองระบบ DWDM

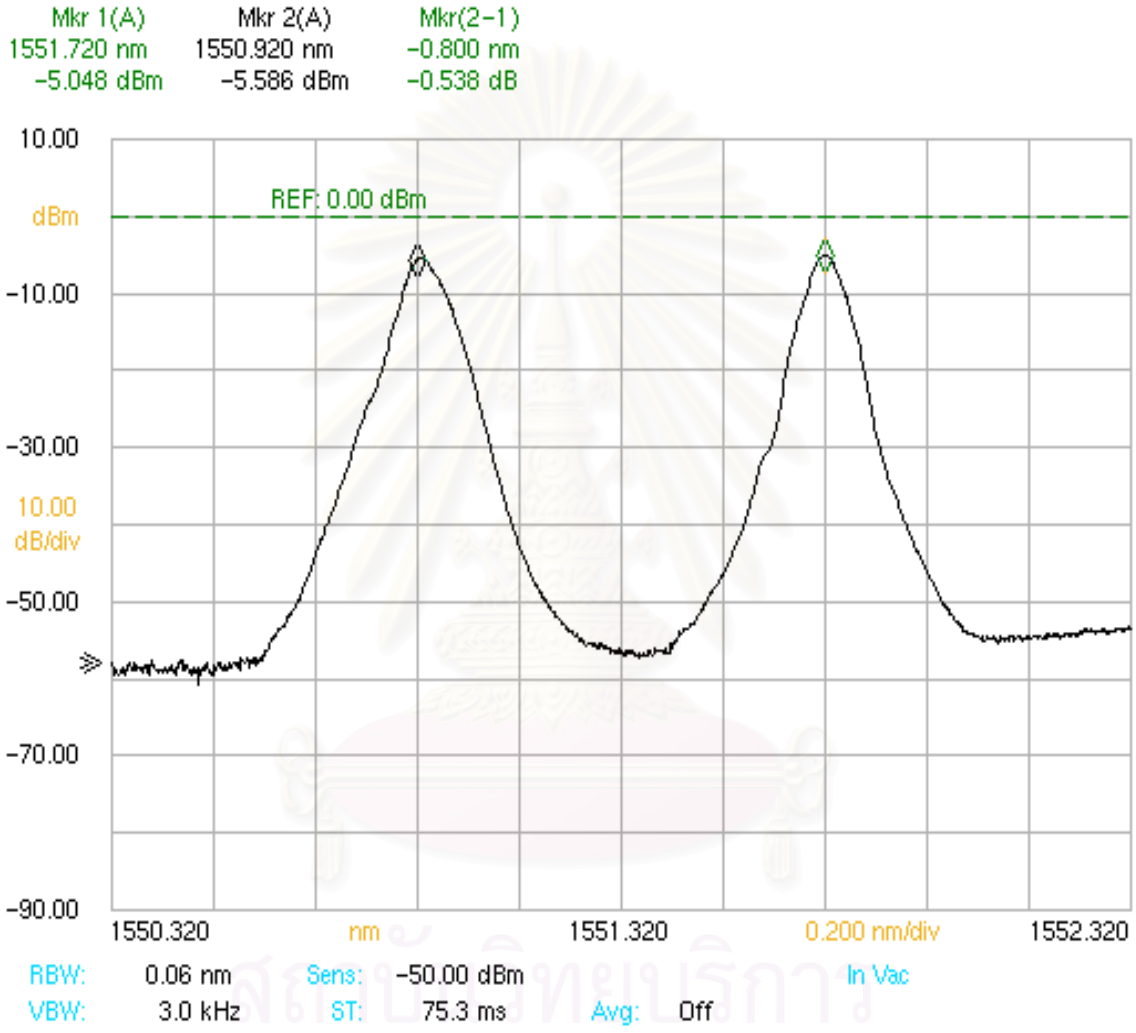


รูปที่ 44 แผนภาพแสดงวงจรการเชื่อมต่อเพื่อทดลองการส่งสัญญาณหลายความยาวคลื่น

จากรูปที่ 44 นั้นเป็นการนำเอาสัญญาณทางแสงความยาวคลื่นที่ 1, 2 และ 3 นำมารวมกันเพื่อส่งสัญญาณทั้งหมดผ่านเส้นใยนำแสงเพียงเส้นทางเดียว ซึ่งเป็นการจำลองการส่งสัญญาณแบบ DWDM โดยระยะห่างระหว่างแต่ละความยาวคลื่นคือ 0.8 nm หรือ 100 GHz

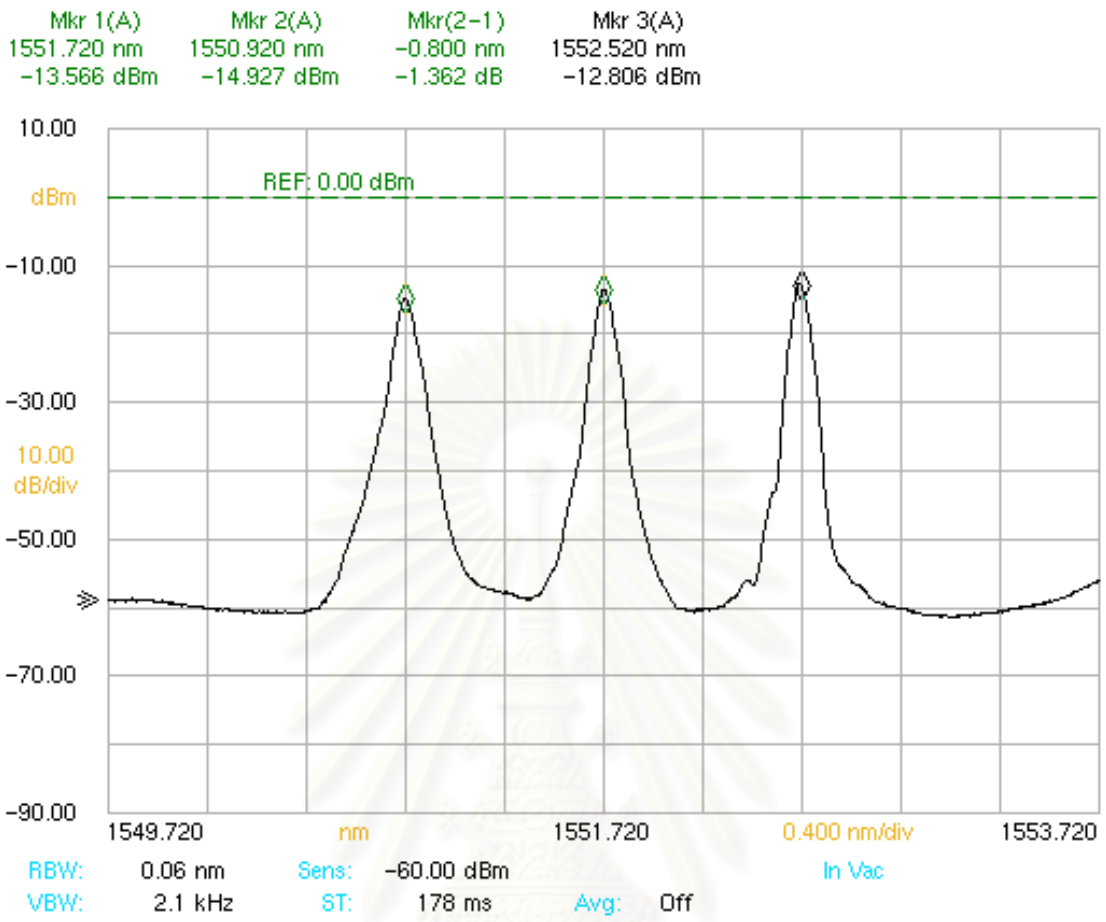
ขั้นแรกนำตัวส่งสัญญาณข้อมูลทางแสงความยาวคลื่นที่ 1 (จากหัวข้อ 1.2) และความยาวคลื่นที่ 2 (จากหัวข้อ 1.1) สร้างสัญญาณข้อมูลทางแสงแล้วนำมารวมเข้าด้วยกันด้วยตัว Coupler ตัว

ที่ 1 ผลสเปกตรัมทางแสงขาออกที่ได้เป็นดังรูปที่ 45 จากผลการรวมสัญญาณนี้แสดงถึงความสามารถรวมสัญญาณข้อมูลทางแสงสองความยาวคลื่นหรือสองสัญญาณบนเส้นใยแก้วนำแสงเส้นทางเดียวกันได้ โดยแต่ละช่องสัญญาณมีสเปกตรัมที่แยกออกจากกันชัดเจน



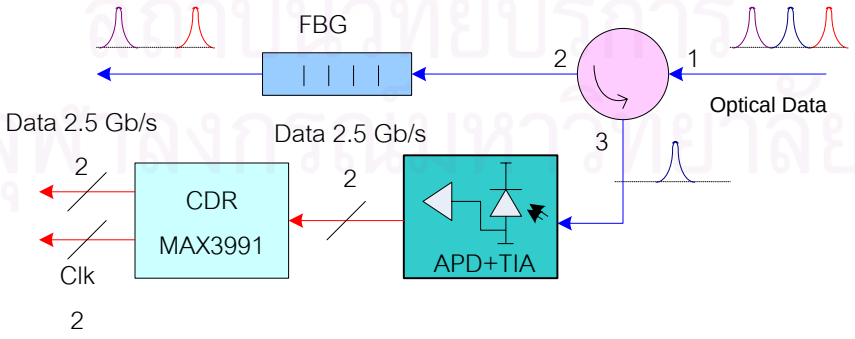
รูปที่ 45 สเปกตรัมการรวมกันของสัญญาณข้อมูลทางแสงสองช่องสัญญาณ

จากนั้น นำสัญญาณที่รวมกันแล้วสองช่องสัญญาณในดังรูปที่ 45 มารวมกับสัญญาณข้อมูลทางแสงที่สร้างโดยตัวส่งสัญญาณข้อมูลทางแสงความยาวคลื่นที่ 3 (จากหัวข้อ 1.3) ด้วย Coupler ตัวที่ 2 ซึ่งสัญญาณขาออกนั้นมีสเปกตรัมดังรูปที่ 46 ซึ่งเป็นผลการรวมสัญญาณทั้งหมด 3 ช่องสัญญาณด้วยกันส่งผ่านเส้นใยนำแสงเพียงเส้นเดียว โดยมีระยะห่างระหว่างยอดสเปกตรัมเท่ากับ 0.8 nm



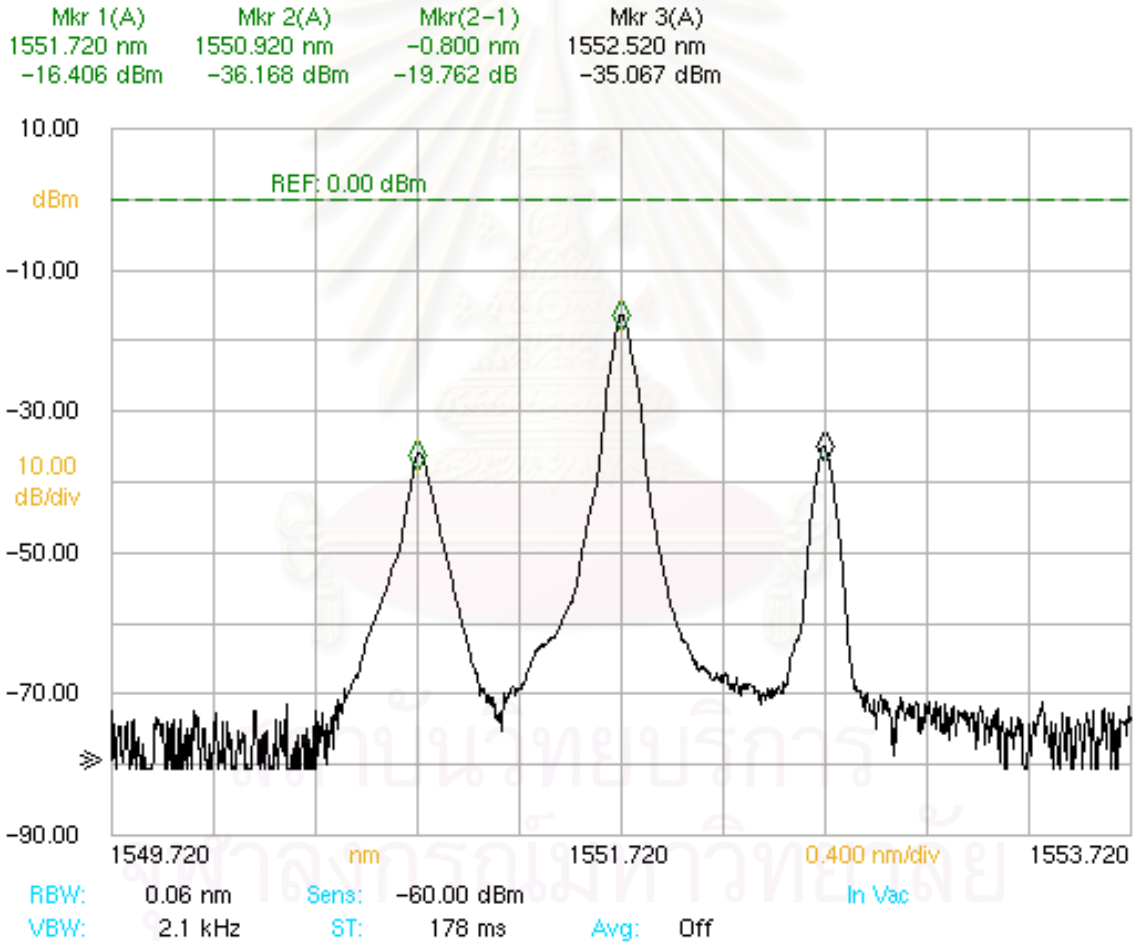
รูปที่ 46 สเปกตรัมการรวมกันของสัญญาณข้อมูลทางแสงสามช่องสัญญาณ

เมื่อส่งสัญญาณหลายช่องสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสงไปถึงทางฝั่งปลายทาง จะมีตัวดีมัลติเพล็กสัญญาณทางแสงออกเพื่อแยกสัญญาณแต่ละช่องสัญญาณออกจากกัน โดยในการทดลองจะทำการแยกสัญญาณทางแสงความยาวคลื่นที่ 2 ซึ่งเป็นสัญญาณตรงกลางที่สนใจ

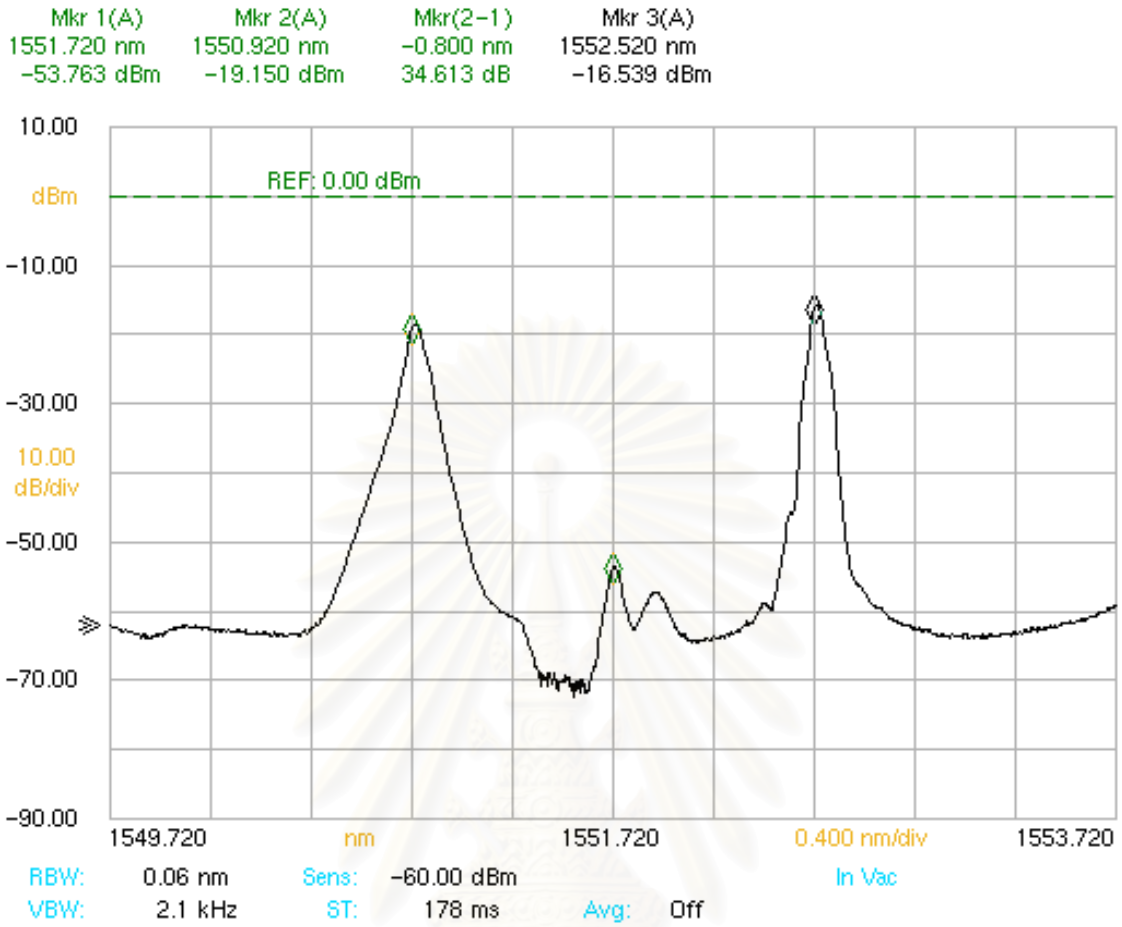


รูปที่ 47 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ฝั่งรับสัญญาณหลายความยาวคลื่น

นำสัญญาณทางแสงที่มีสามช่องสัญญาณมาผ่านตัว Circulator และ FBG (จากหัวข้อ 2) เพื่อดักสัญญาณความยาวคลื่นที่ 2 ซึ่งเป็นความยาวคลื่นตรงกลาง สัญญาณช่องที่ 2 นี้เมื่อเจอ FBG ก็จะสะท้อนกลับมาออกที่ขาพอร์ตที่ 3 ของตัว Circulator ซึ่งสเปกตรัมที่ได้จากการทดลองเป็นดังรูปที่ 48 ส่วนสัญญาณความยาวคลื่นที่เหลือจะสามารถทะลุผ่าน FBG ออกไปดังรูปที่ 49 ซึ่งสเปกตรัมจากรูปที่ 48 นั้นผลของสัญญาณความยาวคลื่นด้านข้างทั้งซ้ายขวาของความยาวคลื่นที่สองนั้นออกมากับพอร์ตที่สามด้วย เนื่องมาจากการสะท้อนกลับบางส่วนของทั้งสองช่องสัญญาณ โดยกำลังทางแสงสูงสุดของสัญญาณความยาวคลื่นที่ 1 และ 3 มีเพียง -36 dBm และ -35 dBm ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าความยาวคลื่นที่ 2 ประมาณ -20 dB ทีเดียว



รูปที่ 48 สัญญาณทางแสงขาออกพอร์ตที่ 3 ของตัว Circulator



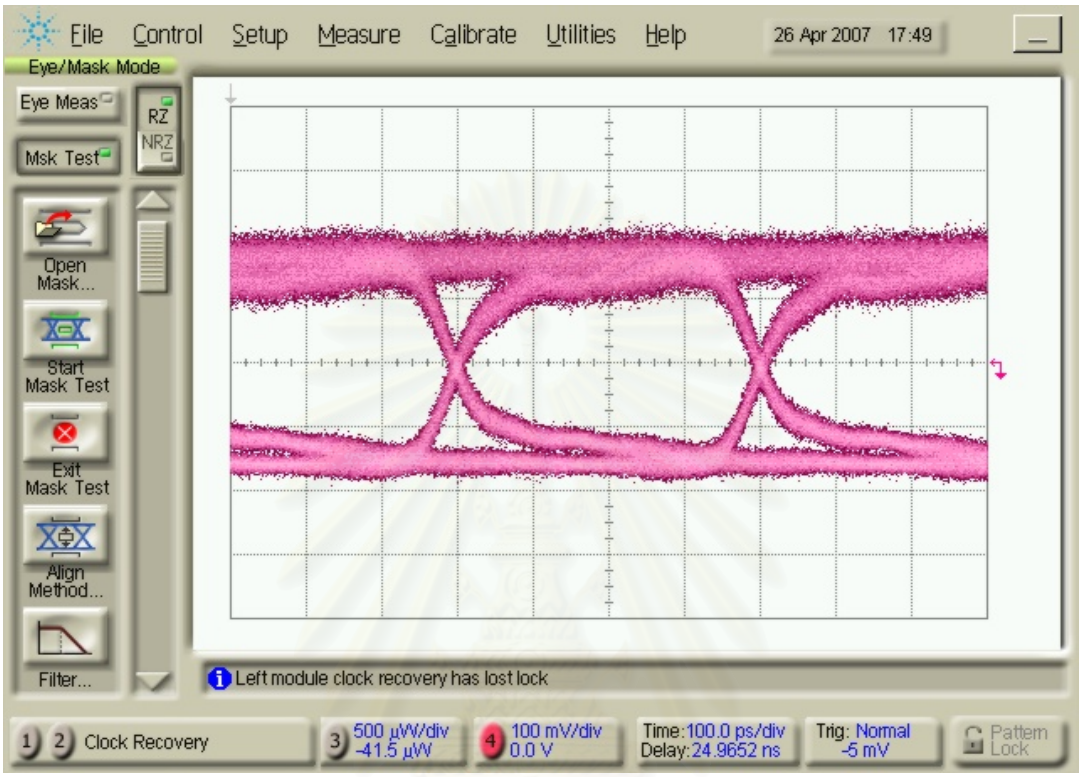
รูปที่ 49 สัญญาณทางแสงขาออกของตัว FBG

จากรูปที่ 49 เมื่อวัดสัญญาณทางแสงขาออกของตัว FBG พบว่าสัญญาณทางแสงความยาวคลื่นที่ 2 นั้นได้ถูกกรองออกหมดแล้ว เหลือเพียงสัญญาณทางแสงของความยาวคลื่นที่ 1 และความยาวคลื่นที่ 2 เท่านั้นที่สามารถผ่านตัว FBG ได้

ขั้นต่อไป นำสัญญาณที่ได้จากพอร์ตที่ 3 ของตัว Circulator ดังรูปที่ 48 นั้นป้อนเข้าตัวรับสัญญาณทางแสง (จากหัวข้อที่ 3.1) เพื่อทำการแปลงสัญญาณทางแสงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า พร้อมทั้งขยายสัญญาณ สัญญาข้อมูลทางไฟฟ้าขาออกเป็นสัญญาณแบบ Differential มีลักษณะสัญญาณดังรูปแผนภาพตาที่ 50

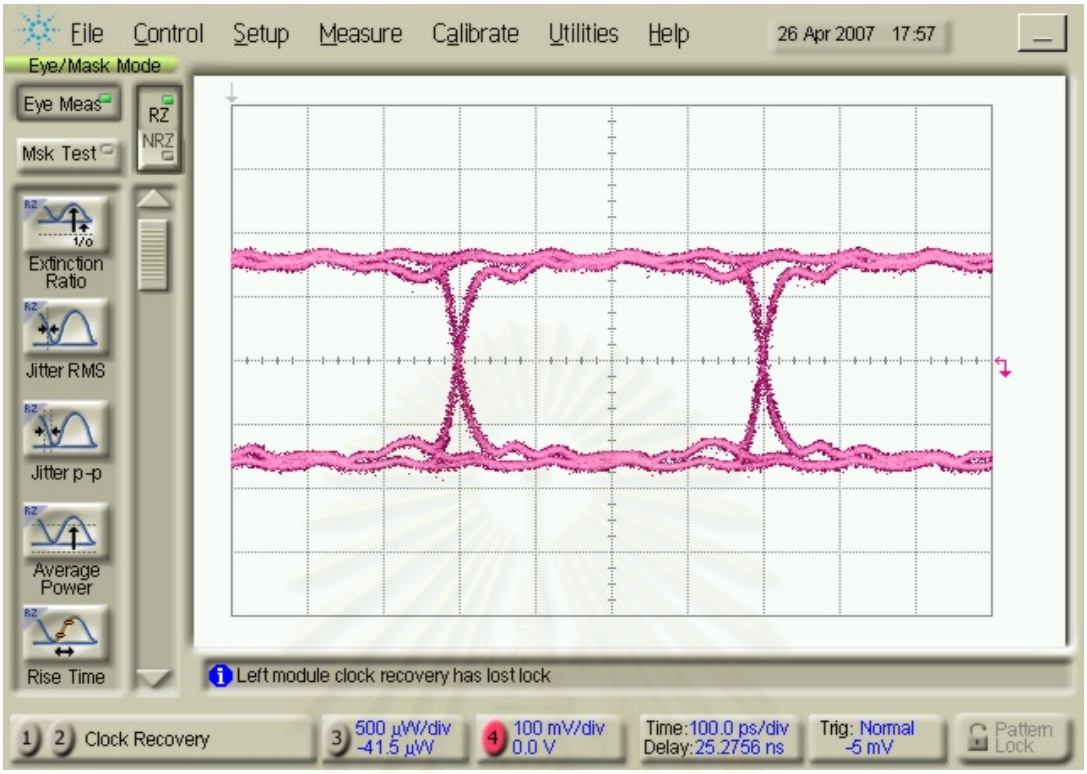
จากภาพที่ 50 สัญญาณข้อมูลความเร็ว 2.5 Gb/sที่ได้จากตัว APD+TIAนั้นมีความขนาดแรงดันจากยอดถึงยอดประมาณ 700 mVp-p จากนั้น ป้อนสัญญาณนี้เข้าตัวกู้คืนสัญญาณข้อมูลและสัญญาณนาฬิกา (จากหัวข้อ 3.2) ลักษณะสัญญาณข้อมูลที่ได้จากขาออกตัว CDR นี้เป็นดังแผนภาพ

ตาที่ 51 ซึ่งมีลักษณะตาที่เปิดกว้างมาก ดังนี้สัญญาณข้อมูลความเร็วสูงออกสู่ปลายทางจึงลักษณะดังรูป 51 นี่เอง



รูปที่ 50 แผนภาพตาของสัญญาณขาออกจากตัว APD+TIA (ลดทอน 6 dB)

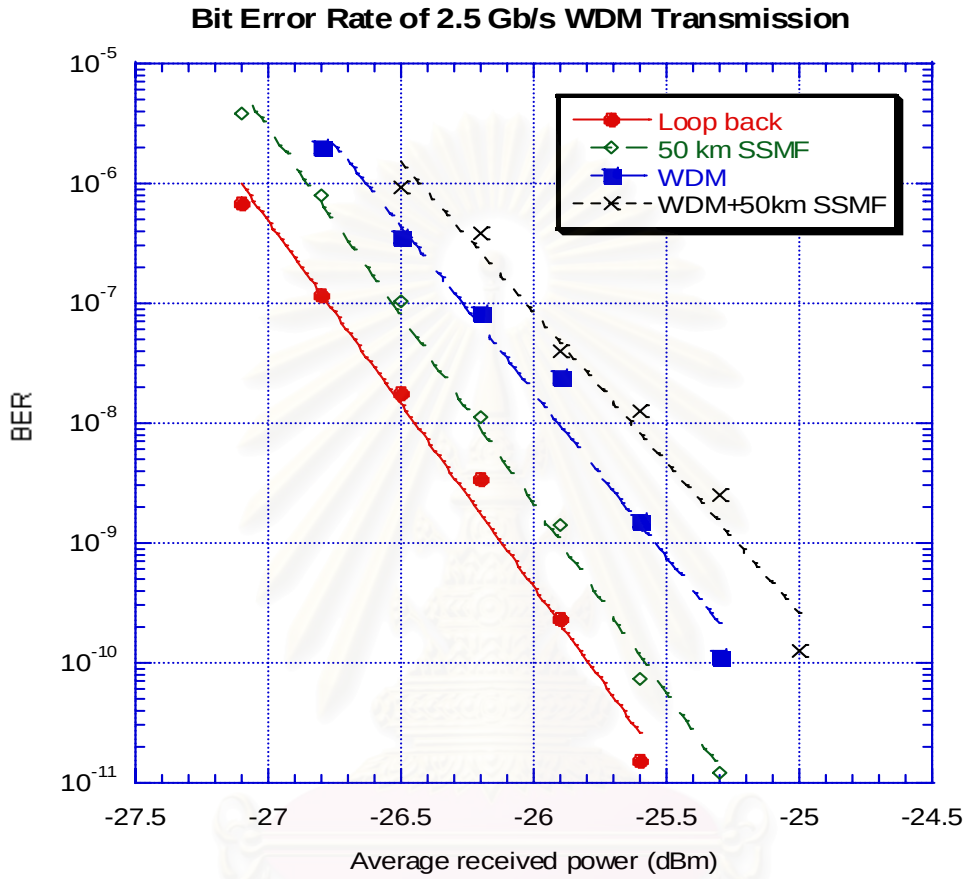
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 51 สัญญาณขาออกจากตัวกู้คืนสัญญาณข้อมูลและสัญญาณนาฬิกา

ขั้นตอนต่อไปทำการวัดประสิทธิภาพการส่งสัญญาณแบบ DWDM ด้วยการวัด BER โดยนำสัญญาณข้อมูลขาออกจากรูปที่ 51 นี้นำกลับไปเปรียบเทียบกับสัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้าขาเข้าดังในรูปที่ 17 จากนั้นทำการวัดค่า BER ผลที่ได้เป็นดังเส้นกราฟในรูปที่ 52 ซึ่งได้ทำการทดสอบทั้งหมด 4 กรณีคือ (1) Loop-Back คือการส่งสัญญาณข้อมูลแสงเพียงความยาวคลื่นแสงเดียวจากตัวส่งสัญญาณทางแสงไปยังตัวรับสัญญาณทางแสงโดยตรง, (2) ผ่านเส้นใยนำแสงโหมดเดียวชนิดมาตรฐานที่ระยะทาง 50 km, (3) ผ่านระบบ WDM, และ(4) ผ่านระบบ WDM พร้อมทั้งผ่านเส้นใยนำแสงโหมดเดียวชนิดมาตรฐาน 50 km จากการอ่านค่าของเส้นกราฟที่อัตราความผิดพลาดบิต 10^{-9} จะได้ค่าพลังงานแสงขั้นต่ำในการตรวจจับเป็น -26.13, -25.9, -25.55 และ -25.24 dBm ตามลำดับ ดังนั้นค่า power penalty ซึ่งคือพลังงานแสงที่ต้องเพิ่มขึ้นเมื่อส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสง 50 km จะมีผลมาจากกระจายโครมาติก (Chromatic Dispersion) และผลรวมของสัญญาณรบกวน (noise) จากอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ ได้ค่า power penalty เท่ากับ 0.23 dB (-25.90-(-26.13)) สำหรับกรณีส่งผ่านระบบ WDM อันเป็นผลมาจากสัญญาณรบกวนจากช่องสัญญาณข้างเคียงและจากอุปกรณ์ในระบบ ได้ค่า power penalty เท่ากับ 0.58 dB (25.55-(-26.13)) และกรณีสุดท้าย คือกรณีที่ส่งสัญญาณในระบบ WDM ผ่านเส้นใยนำแสง 50 km ได้ค่า power penalty เท่ากับ

0.89 dB (-25.24-(-26.13)) ซึ่งใกล้เคียงกับค่า Power Penalty ทั้ง 2 ค่ารวมกัน (0.58 + 0.23 = 0.81 dB) โดยที่ค่า power penalty นี้ต่ำกว่า 1 dB ที่กำหนดไว้ในมาตรฐานทั่วไป ดังนั้นการทดสอบการจำลองการรับส่งสัญญาณข้อมูล 2.5 Gb/s แบบ DWDM ประสบผลสำเร็จเป็นไปตามคาดการณ์



รูปที่ 52 ผลการวัด BER ต่อพลังงานแสงที่ตัวรับสัญญาณทางแสงตรวจรับได้ในกรณีต่างๆ

สรุปผลการทดลอง

การทดลองรับส่งสัญญาณข้อมูลทั้งหมด 3 ช่องสัญญาณโดยให้มีระยะระหว่างความยาวคลื่นเท่ากับ 0.8 nm หรือ 100 GHz ซึ่งเป็นการจำลองการรับส่งสัญญาณระบบ DWDM พบว่าสามารถรับส่งสัญญาณทางแสงหลายความยาวคลื่นผ่านเส้นใยแก้วนำแสงเส้นเดียวกันได้ อีกทั้งยังสามารถรับส่งสัญญาณในระบบ DWDM ผ่านเส้นใยนำแสงระยะทาง 50 km ได้ โดยมีปัญหาจากการกระจายโครมาติกและผลรวมของสัญญาณรบกวนจากช่องสัญญาณข้างเคียงและจากอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบบ้าง ทำให้เกิด power penalty วัดได้เท่ากับ 0.89 dB แต่ก็ไม่เกินค่ามาตรฐาน 1 dB สำหรับการทดลองรับส่งสัญญาณข้อมูลนั้นมีอัตราข้อมูลบิตเท่ากับ 2.5 Gb/s ต่อหนึ่งช่องสัญญาณแสง ซึ่งในการ

ทดลองระบบ DWDM นี้ใช้สามช่องสัญญาณ ทำให้มีอัตราข้อมูลบิตเพิ่มขึ้น 3 เท่า ซึ่งถ้าป้อนสัญญาณข้อมูลหลายช่องสัญญาณมากกว่านี้ก็จะสามารถส่งได้หลายเท่าตัว ดังนั้นจึงเป็นการพิสูจน์ความสามารถในการเพิ่มปริมาณการส่งข้อมูลและยังสามารถส่งได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย

<u>ส่วนงานที่จะดำเนินการต่อไปหลังจากจบโครงการ</u>

1) ศึกษาถึงปัญหา อุปสรรค และความเป็นไปได้ในการปรับปรุงอัตราความเร็วสูงสุดของการรับส่งข้อมูลของชุดสาธิตตัวรับส่งสัญญาณทางแสงที่ประกอบขึ้น ให้เพิ่มจาก 2.5 Gb/s ไปสูงถึง 10 Gb/s (หากทำได้) แล้วทดลองวัดค่าอัตราบิตผิดพลาด
2) ทดลองรับส่งสัญญาณแสงแบบ WDM ผ่านเส้นใยนำแสงต่างชนิดกันและด้วยระยะทางต่างกัน โดยจะปรับเปลี่ยนค่าระยะระหว่างความยาวคลื่นให้แคบลง เพื่อศึกษาถึงปัญหาของสัญญาณแสงกวนกัน
3) ทดลองใช้ Optiwave™ simulation software เพื่อให้ได้ผลออกมาใช้คาดการณ์ถึงขีดจำกัดสูงสุดของการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายเส้นใยนำแสง [งานส่วน simulation นี้ทางทีมวิจัยยังไม่สามารถทำได้ภายในกรอบเวลาของโครงการ เนื่องจากความล่าช้าในการประกอบชุดสาธิตตัวรับส่งสัญญาณทางแสง และไม่มีงบประมาณเพียงพอที่จะจัดซื้อ software ดังกล่าว หากแต่อาจจะขอยืมใช้ของอาจารย์อีกท่านหนึ่งในภาควิชาเดียวกันได้ในอนาคต]

<u>ผลิตผลหรือความสัมฤทธิผลที่ได้ดำเนินการไปแล้วภายในปีสุดท้าย</u>

- บทความทางวิชาการระดับระดับชาติ จำนวน 1 บทความ

  พลาธร ศรีฉ่ำ และ ดวงฤดี วรสุชีพ “ตัวส่งสัญญาณทางแสงที่อัตราข้อมูล 2.5 กิกกะบิตต่อวินาทีเพื่องานประยุกต์ทางด้านการรับส่งสัญญาณแสงหลายความยาวคลื่น” ในงานประชุมทางวิชาการ EECON 30, กาญจนบุรี , 25-26 ตุลาคม 2550

- มีสิ่งประดิษฐ์ 2 ชิ้นคือ ชุดสาธิตตัวส่งสัญญาณทางแสงความเร็ว 2.5 กิกะบิตต่อวินาที ซึ่งใช้เทคนิคการมอดูเลตแสงแบบดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า ที่ความยาวคลื่นแสง 1550.92 และ 1551.72 นาโนเมตร

เอกสารอ้างอิง

[1] ITU-T G.694.1, “Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid,” May 2002.

[2] ITU-T G.692, “Optical interfaces of multichannel systems with optical amplifiers,” Oct. 1998.

[3] www.maxim-ic.com , Maxim’s website

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย