

บทที่ 5

ผลการทดสอบ

ผลการวัดทดสอบประสิทธิภาพของตัวส่งสัญญาณทางแสงอัตรา 10 Gb/s พร้อมระบบควบคุมอุณหภูมิ ทดลองทั้งหมด 4 ส่วนคือ (1) คุณลักษณะแต่ละองค์ประกอบ, (2) คุณลักษณะของระบบควบคุมอุณหภูมิ, (3) ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบควบคุมอุณหภูมิ, และ (4) ผลการทดสอบระบบ DWDM 3 ช่องสัญญาณ โดยมีรายละเอียดในหัวข้อที่ 5.1 ถึง 5.4 ตามลำดับ

5.1 คุณลักษณะแต่ละองค์ประกอบของตัวส่งสัญญาณทางแสง

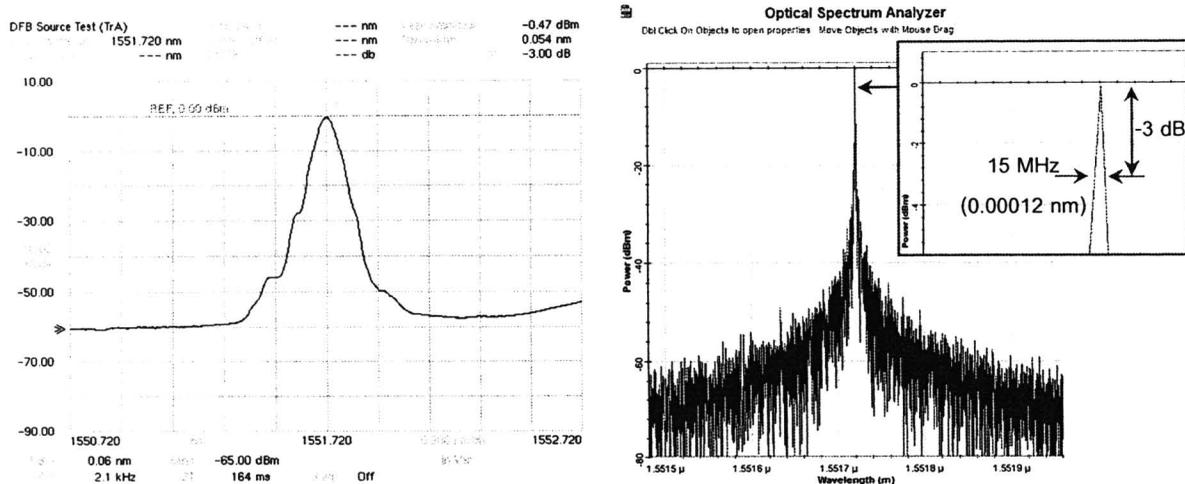
คุณลักษณะขององค์ประกอบของตัวส่งสัญญาณทางแสงจะกล่าวทั้งหมด 2 ส่วน คือ (1) แหล่งกำเนิดสัญญาณทางแสง และ (2) ตัวขับมอดูเลเตอร์ โดยมีรายละเอียดในหัวข้อที่ 5.1.1 และ 5.1.2 ตามลำดับ ส่วนระบบควบคุมอุณหภูมิเลเซอร์จะกล่าวในหัวข้อที่ 5.2

5.1.1 แหล่งกำเนิดสัญญาณทางแสง

แหล่งกำเนิดสัญญาณทางแสงเป็นเลเซอร์โมดูล EML ประกอบด้วยเลเซอร์ชนิด DFB และมอดูเลเตอร์ชนิด EAM ดังนั้นผลการทดสอบคุณลักษณะจะมีทั้งหมด 3 ส่วน คือ (1) สเปกตรัมของเลเซอร์, (2) คุณลักษณะการเปล่งแสงของเลเซอร์ และ (3) คุณลักษณะของมอดูเลเตอร์แบบดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดในหัวข้อที่ 5.1.1.1 ถึง 5.1.1.3 ตามลำดับ

5.1.1.1 สเปกตรัมของเลเซอร์

การทดสอบสเปกตรัมของเลเซอร์ EML โมดูล E4560 เป็นการทดสอบเพื่อวิเคราะห์สเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงแบบต่อเนื่องซึ่งในที่นี้ คือ เลเซอร์ชนิด DFB ที่อยู่ภายในเลเซอร์ EML โมดูล E4560 ทำได้โดยการจ่ายกระแสไบแอสจากวงจรควบคุมกระแสซึ่งมีรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.1.2 ให้กับเลเซอร์ที่ขา 3 ซึ่งเป็นขาเลเซอร์แอโนดมี ขนาด 70 mA ส่วนรายละเอียดขาพินต่างๆของ EML ได้กล่าวในหัวข้อที่ 3.1.1 จากนั้นจึงเชื่อมต่อเลเซอร์เข้ากับเครื่อง OSA แสดงสเปกตรัมดังรูปที่ 5.1 (ซ้าย) จากรูปจะเห็นว่าแสงเลเซอร์ที่เปล่งออกมา มีลักษณะเป็นยอดเดี่ยวตามคุณลักษณะของเลเซอร์ชนิด DFB ที่ความยาวคลื่น 1551.72 nm โดยมีความกว้างของสเปกตรัมที่วัดได้ ณ ตำแหน่งต่ำลงมาจากค่ายอด 3 dB เท่ากับ 0.054 nm ซึ่งค่านี้เป็นข้อจำกัดของเครื่องวัดมอดูเลเตอร์ทางแสง Agilent OSA รุ่น 86140B [50] อันที่จริงแล้วเลเซอร์ชนิด DFB มีสเปกตรัมแคบมากเพียง 15 MHz (0.00012 nm) [37] ซึ่งแสดงผลการจำลองสเปกตรัมด้วยโปรแกรม OptiSystem 8.0 [51] ดังรูปที่ 5.1 (ขวา) ในขณะที่กำลังแสงค่ายอดมีค่าเท่ากับ -0.47 dBm



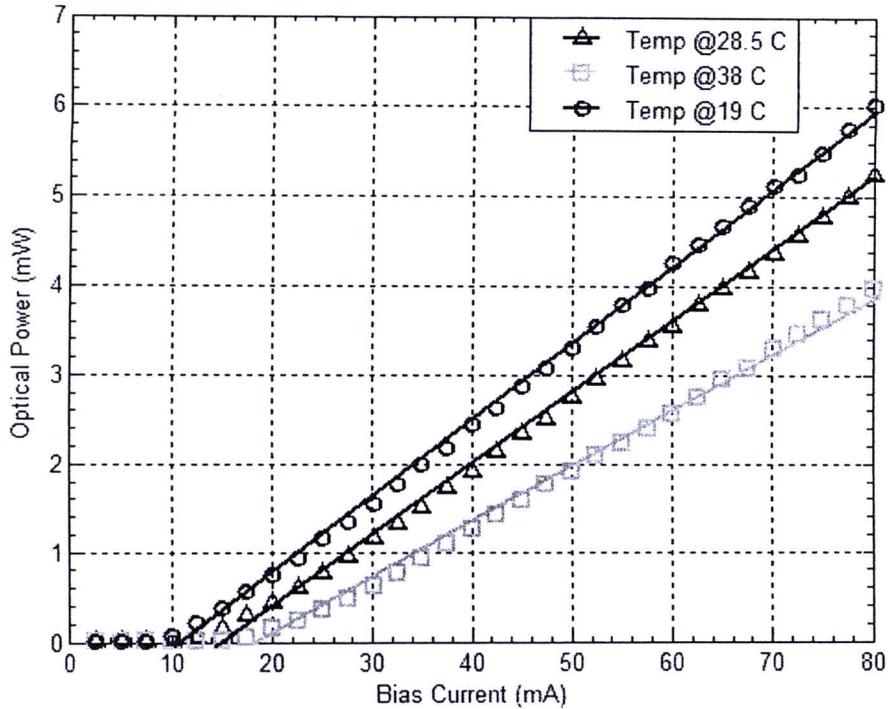
รูปที่ 5.1 สเปกตรัมของเลเซอร์ชนิด DFB ที่อยู่ภายในเลเซอร์ EML โมดูล E4560 (ซ้าย) วัดด้วยเครื่อง OSA และ (ขวา) จำลองด้วยโปรแกรม OptiSystem 8.0

5.1.1.2 คุณลักษณะการเปล่งแสงของเลเซอร์

การทดสอบนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาจุดทำงานของเลเซอร์ EML โมดูล E4560 โดยจะทำการทดสอบที่อุณหภูมิปกติซึ่งมีค่า 28.5°C เท่ากับความยาวคลื่น 1551.72 nm ก่อนจากนั้นจะทำการปรับอุณหภูมิให้กับเลเซอร์ ได้แก่ อุณหภูมิ 19°C เท่ากับความยาวคลื่น 1550.92 nm และ 38°C เท่ากับความยาวคลื่น 1552.52 nm ด้วยการปรับอุณหภูมิโดยระบบควบคุมอุณหภูมิที่อยู่ภายในตัวส่งสัญญาณทางแสงต้นแบบ

เมื่อเริ่มจ่ายกระแสไบแอสจากซัพพลายผ่านดิจิตอลมัลติมิเตอร์ซึ่งทำหน้าที่วัดกระแสไบแอส ไปยังขาที่ 3 ของเลเซอร์ซึ่งเป็นขาเลเซอร์แอโนด จากนั้นจึงค่อยๆเพิ่มขนาดแรงดันจากซัพพลายตั้งแต่ 0 ถึง 2 V และทำการวัดค่าระดับกำลังแสงขาออกด้วยตัววัดกำลังทางแสง (Optical Power Monitor) ของบริษัท EigenLight [52] ซึ่งวัดค่าระดับกำลังแสงโดยเฉลี่ยออกมาในหน่วย dBm สุดท้ายต้องทำการแปลงให้อยู่ในหน่วยของ mW จะได้คุณลักษณะการเปล่งแสงดังรูปที่ 5.2

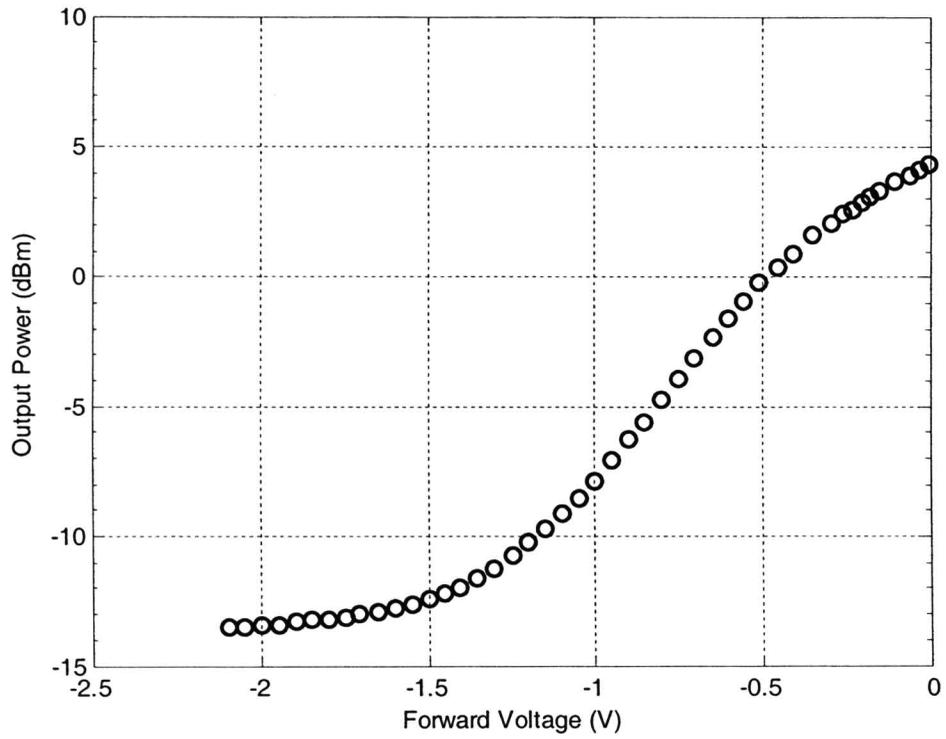
จากกราฟสังเกตได้ว่ากระแสขีดเริ่มของเลเซอร์ที่อุณหภูมิ 28.5°C มีค่าประมาณ 15 mA เมื่อลดอุณหภูมิของเลเซอร์ลงที่ 19°C ปรากฏว่าเลเซอร์ต้องการกระแสขีดเริ่มน้อยลงเป็น 10 mA แต่ในขณะที่เพิ่มอุณหภูมิไปที่ 38°C เลเซอร์จะกินกระแสขีดเริ่มมากขึ้นประมาณ 19 mA ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไปในหัวข้อที่ 2.2.1 ดังนั้นในการใช้งานเลเซอร์จำเป็นต้องมีการควบคุมกระแสให้สูงกว่าค่ากระแสขีดเริ่ม เพื่อให้เลเซอร์มีระดับกำลังแสงขาออกที่มากพอ



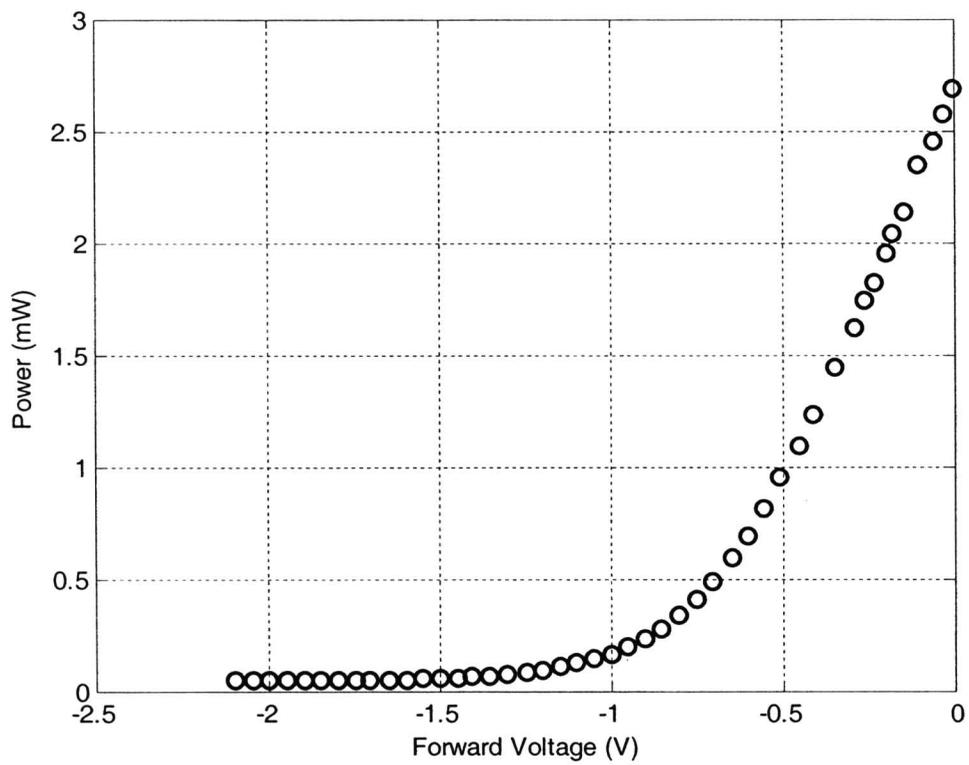
รูปที่ 5.2 คุณลักษณะการเปล่งแสงของเลเซอร์ชนิด DFB ที่อยู่ภายใน EML

5.1.1.3 คุณลักษณะของมอดูเลเตอร์แบบดูดกลืนคลื่นไฟฟ้า

การทดสอบนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาคุณลักษณะการทำงานของมอดูเลเตอร์ชนิด EAM ที่อยู่ภายในเลเซอร์ EML โมดูล E4560 โดยคุณลักษณะดังกล่าวสามารถนำไปคำนวณหาค่าสัดส่วนเอ็กซ์ติงชัน (EX) เพื่อใช้ในการมอดูเลตข้อมูลทางแสงซึ่งมีรายละเอียดในหัวข้อ 2.1.3.1 ได้ เมื่อทดลองป้อนโพลบในช่วง -2 ถึง 0 V ให้กับตัวมอดูเลเตอร์ผ่านหัวต่อชนิด SMP เพื่อสังเกตการดูดกลืนกำลังแสงของ EAM ด้วยตัววัดกำลังทางแสง โดยกำหนดค่ากำลังแสงเฉลี่ยไว้ที่ 5 dBm ได้คุณลักษณะของมอดูเลเตอร์แสดงรูปที่ 5.3 ในหน่วย dBm จากกราฟจะสังเกตได้ว่า EAM มีลักษณะการดูดกลืนมากตามขนาดแรงดันไบแอสที่ติดลบมากขึ้น และมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งอธิบายในหัวข้อ 2.1.3.2 อย่างไรก็ตาม การใช้งานมอดูเลเตอร์สำคัญที่การกำหนดค่า V_{BIAS} โดยต้องพิจารณากราฟคุณลักษณะในหน่วย mW ดังรูปที่ 5.4 เพื่อหาช่วงการดูดกลืนแสงที่มีคุณลักษณะเป็นเชิงเส้นซึ่งคุณลักษณะดังกล่าวอยู่ในช่วงค่าแรงดัน -0.75 V ถึง 0 V มิฉะนั้นจะเกิดปัญหาการบิดเบือนรูปร่างของสัญญาณที่ส่ง เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของ EAM โดยสังเกตได้จากแผนภาพรูปตาซึ่งจะกล่าวในหัวข้อที่ 5.1.2



รูปที่ 5.3 คุณลักษณะของ EAM ในเลเซอร์ EML โมดูล E4560 ในหน่วย dBm

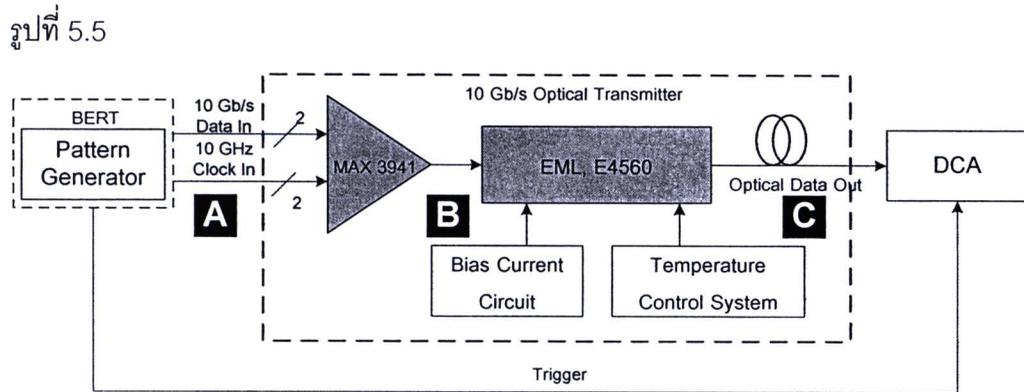


รูปที่ 5.4 คุณลักษณะของ EAM ในเลเซอร์ EML โมดูล E4560 ในหน่วย mW

5.1.2 ตัวขับมอดูเลเตอร์

ในหัวข้อนี้จะแสดงผลการตั้งค่าขนาดแรงดันมอดูเลต (V_{MOD}) กับแรงดันไบแอส (V_{BIAS}) ให้กับตัวขับมอดูเลเตอร์ชนิด EAM ซึ่งใช้ชิปโมดูล MAX3941 ของบริษัท MAXIM เพื่อให้ได้สัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้าที่เหมาะสมไปขับมอดูเลเตอร์ EAM ให้ได้สัญญาณทางแสงที่เหมาะสมส่งออกมา โดยแสดงผลวัดเป็นแผนภาพรูปตา ซึ่งจะทำการวัดที่ตำแหน่ง A และ B ในส่วนของสัญญาณทางไฟฟ้า ส่วนสัญญาณทางแสงจะวัดที่ตำแหน่ง C โดยมีแผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์

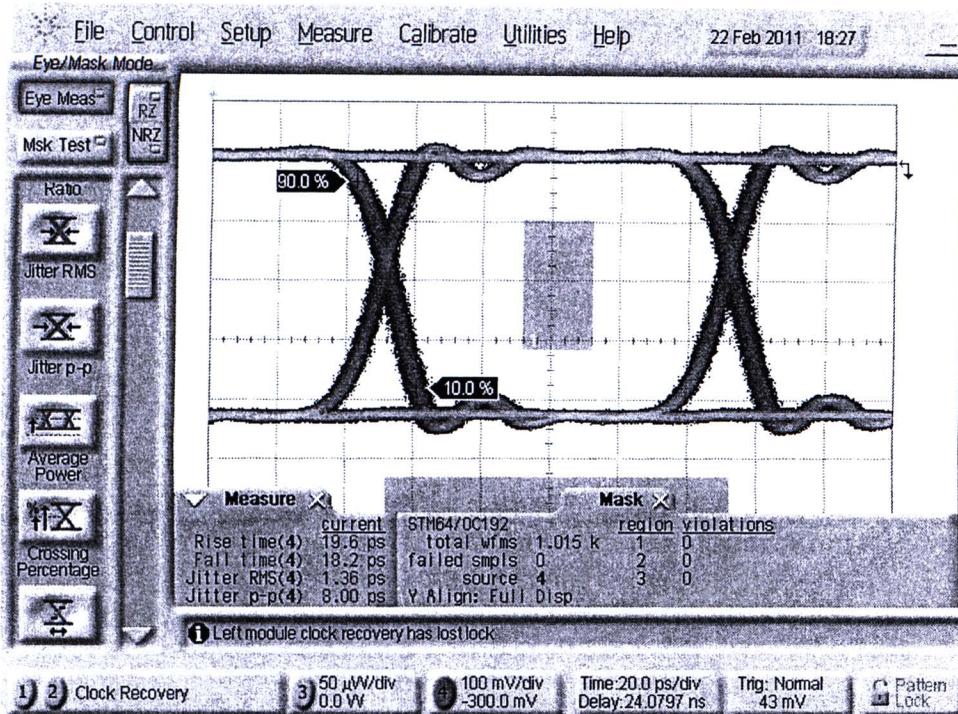
แสดงดัง



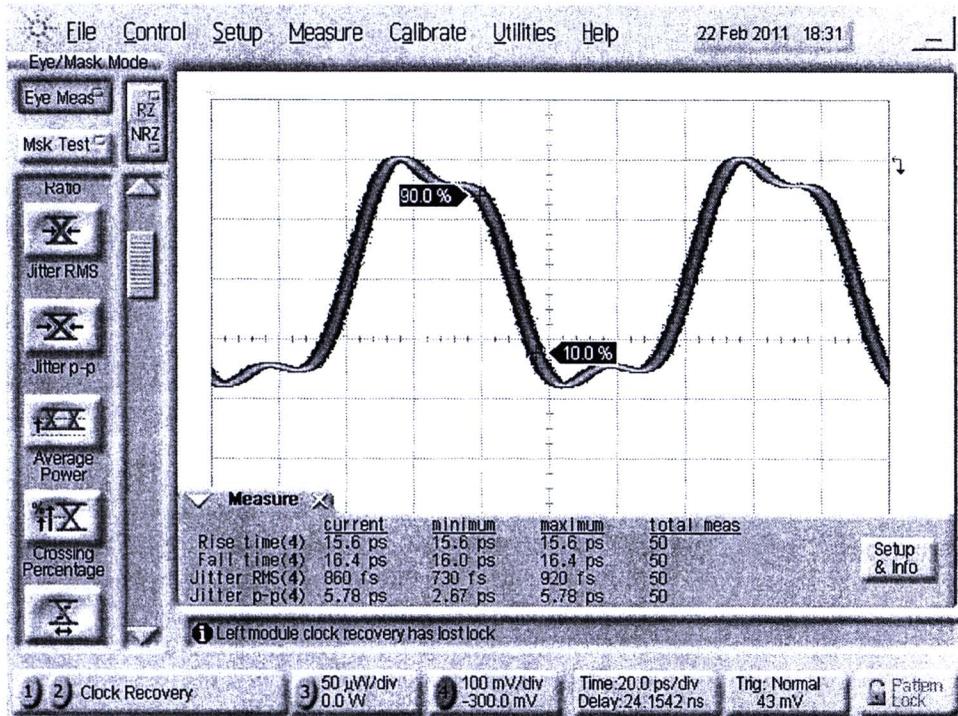
รูปที่ 5.5 การวัดแผนภาพรูปตาของสัญญาณไฟฟ้าและสัญญาณแสงของตัวขับ EAM ตำแหน่ง A

ทำการวัดสัญญาณข้อมูลอัตรา 9.95328 Gb/s (OC-192/STM 64) และสัญญาณนาฬิกา 10 GHz จากเครื่อง BERT ด้วยเครื่อง DCA แสดงดังรูปที่ 5.6 และ รูปที่ 5.7 ตามลำดับ โดยเลือกใช้ระดับสัญญาณชนิด CML ซึ่งมีขนาด 400 mV_{P-P} ทั้งสัญญาณข้อมูลและสัญญาณนาฬิกา เป็นสัญญาณขาเข้าชิป MAX3941 แต่ผลการวัดที่ได้พบว่าเครื่อง BERT ให้สัญญาณข้อมูลมีขนาดประมาณ 420 mV และสัญญาณนาฬิกา 380 mV ส่วนผลการวัด Rise/Fall time ของสัญญาณข้อมูลได้เท่ากับ 19.6 ps/18.2 ps ซึ่งค่า Rise/Fall time ของสัญญาณนาฬิกาวัดได้เท่ากับ 16.0 ps/16.9 ps ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ตรงตาม specification ของเครื่อง BERT [34]





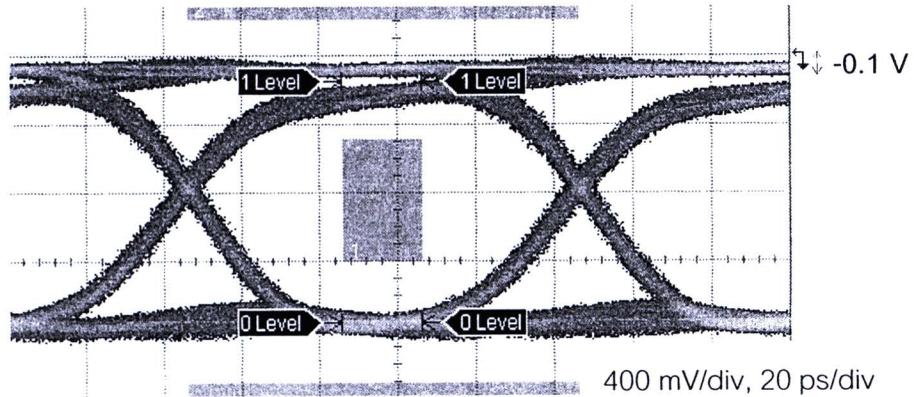
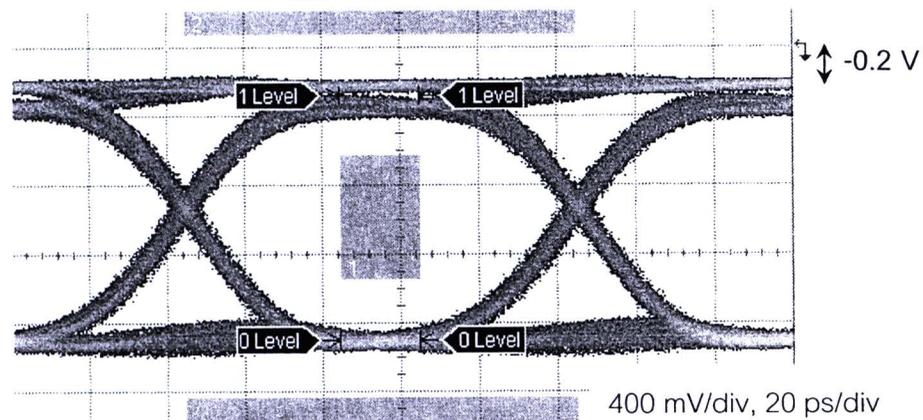
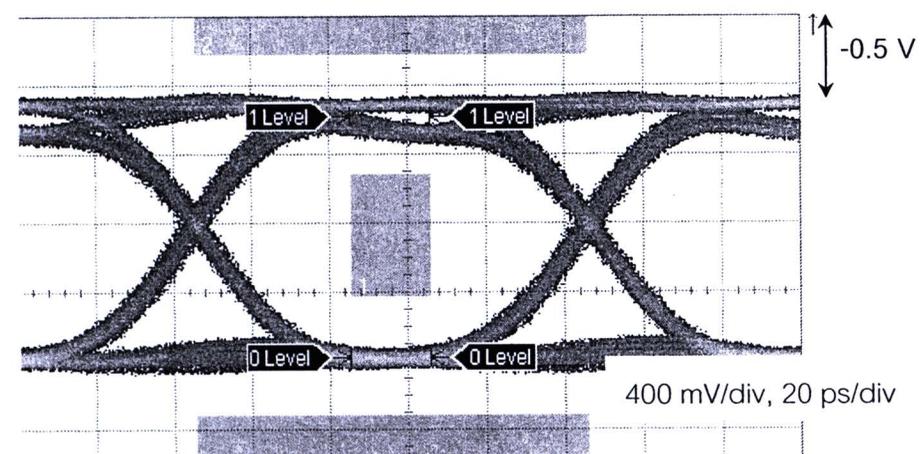
รูปที่ 5.6 สัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้าจากเครื่อง BERT ณ ตำแหน่ง A



รูปที่ 5.7 สัญญาณนาฬิกาจากเครื่อง BERT ณ ตำแหน่ง A

ตำแหน่ง B

วัดแผนภาพรูปตาของสัญญาณข้อมูลขาออกจากชิป MAX3941 ด้วยการเปลี่ยนค่า V_{BIAS} ไปที่ค่าต่างๆ ได้แก่ -0.1 V , -0.2 V และ -0.5 V ส่วน V_{MOD} คงค่าไว้ที่ 1.5 V เพื่อหาแผนภาพรูปตาที่มีความเหมาะสมซึ่งแสดงผลการวัดดังรูปที่ 5.8 สำหรับพารามิเตอร์ที่วัดได้แก่ ค่า Rise time, Fall time และ EX โดยทั้งสามกรณีอ่านค่าพารามิเตอร์ได้ดังตารางที่ 5.1

(ก) $V_{BIAS} = -0.1\text{ V}$, $V_{MOD} = 1.5\text{ V}$ (ข) $V_{BIAS} = -0.2\text{ V}$, $V_{MOD} = 1.5\text{ V}$ (ค) $V_{BIAS} = -0.5\text{ V}$, $V_{MOD} = 1.5\text{ V}$

รูปที่ 5.8 สัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้าขาออกจากชิป MAX3941 ณ ตำแหน่ง B

ตารางที่ 5.1 ผลการวัดพารามิเตอร์ต่างๆของสัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้า ณ ตำแหน่ง B

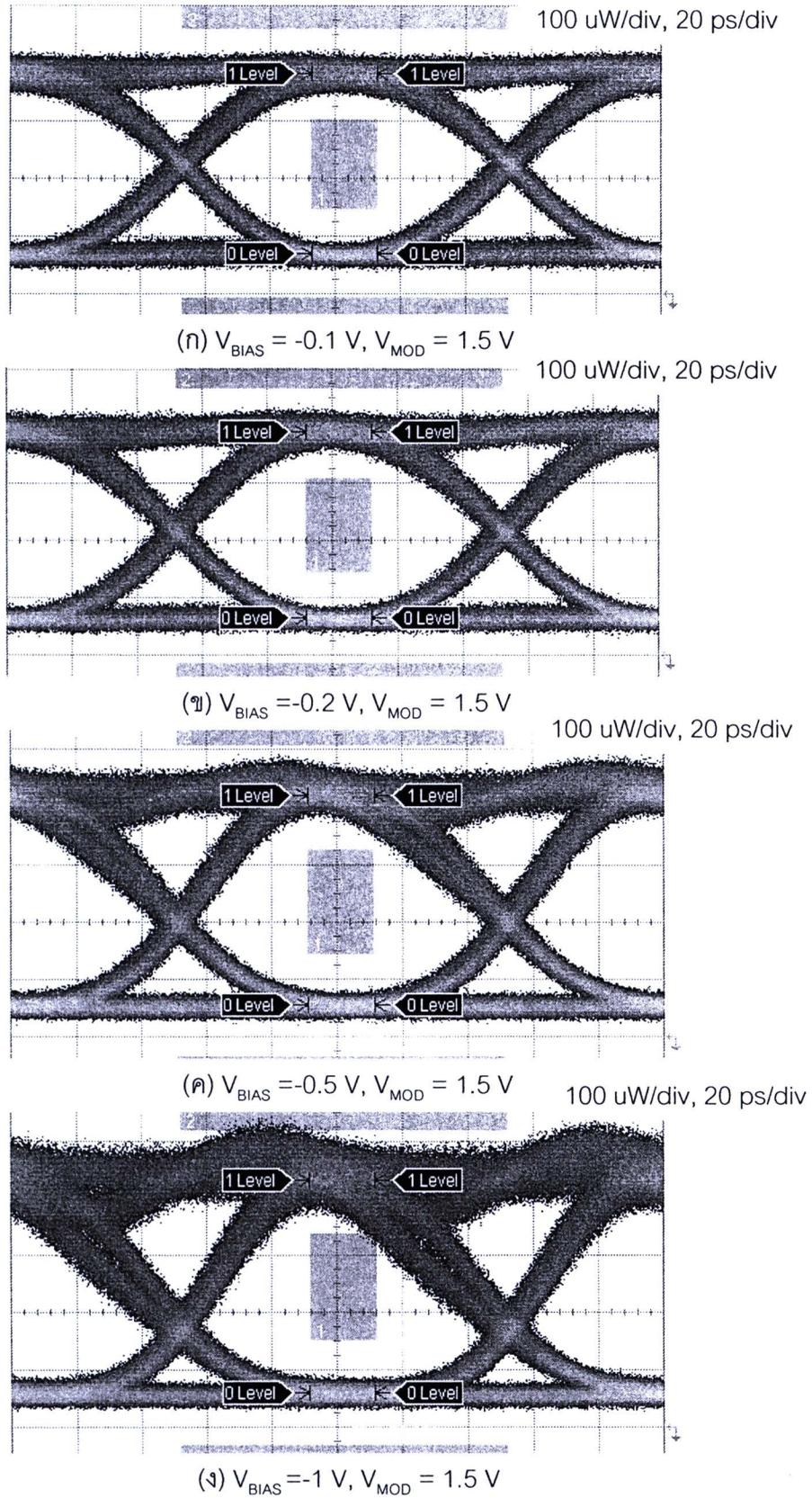
รูป	V_{BIAS} (V)	V_{MOD} (V)	EX (dB)	Rise time (ps)	Fall time (ps)
ก	-0.1	1.5	9.88	33.8	28.0
ข	-0.2	1.5	7.71	31.6	29.8
ค	-0.5	1.5	5.28	28.0	29.8

จากแผนภาพรูปตาทางไฟฟ้าทั้งสามกรณีสรุปได้ว่า เมื่อปรับระดับ V_{BIAS} ให้มีค่าสูงติดลบมากขึ้น จะทำให้ระดับสัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้าขาออก (V_{p-p}) มีค่าลดลง ซึ่งสังเกตได้จากค่า EX ที่มีค่าลดลงดังตารางที่ 5.1 นอกจากนี้ระดับ V_{BIAS} ยังส่งผลต่อรูปร่างของแผนภาพรูปตาดด้วย ซึ่งเป็นผลมาจากคุณลักษณะของชิปตัวขับมอดูเลเตอร์ MAX3941 โดยแผนภาพรูปตาที่เหมาะสมจะมีระดับของสัญญาณอยู่ห่างจากหน้ากามาตรฐานอัตราข้อมูล 9.95328 Gb/s (OC-192/STM-64) อย่างสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 5.8 (ข) ซึ่งมี V_{BIAS} อยู่ในช่วง -0.25 ถึง -0.2 V ส่วนค่า V_{BIAS} ที่น้อยกว่า -0.2 V ชิปปะจะให้สัญญาณที่มีแผนภาพรูปตาลักษณะเอียงไปทางขวาดังรูปที่ 5.8 (ก) ส่วน V_{BIAS} ที่มีค่าติดลบมากกว่า -0.25 V จะให้แผนภาพรูปตาเอียงไปทางซ้ายดังรูปที่ 5.8 (ค) ดังนั้นในทุกการทดลองจึงเลือกตั้งค่า V_{BIAS} ที่ -0.2 V

ตำแหน่ง C

วัดแผนภาพรูปตาของสัญญาณข้อมูลทางแสงขาออกจากเลเซอร์ EML เพื่อหาค่า EX และแผนภาพรูปตาที่เหมาะสม ด้วยการปรับ V_{BIAS} และ V_{MOD} จากตัวขับมอดูเลเตอร์ โดยทดสอบที่ระดับกำลังแสงเฉลี่ย -5 dBm สำหรับพารามิเตอร์ที่วัดได้แก่ ค่า EX, Rise time และ Fall time

การปรับค่า V_{BIAS} ในกรณีนี้ทำการปรับค่า V_{BIAS} ที่ค่า -0.1 V, -0.2 V, -0.5 V และ -1 V โดยคงค่า V_{MOD} ไว้ที่ 1.5 V เช่นเดียวกันกับการวัดทดสอบในตำแหน่ง B ผลการวัดที่ได้ทั้ง 4 กรณีแสดงดังรูปที่ 5.9 ส่วนพารามิเตอร์ที่วัดได้แสดงดังตารางที่ 5.2

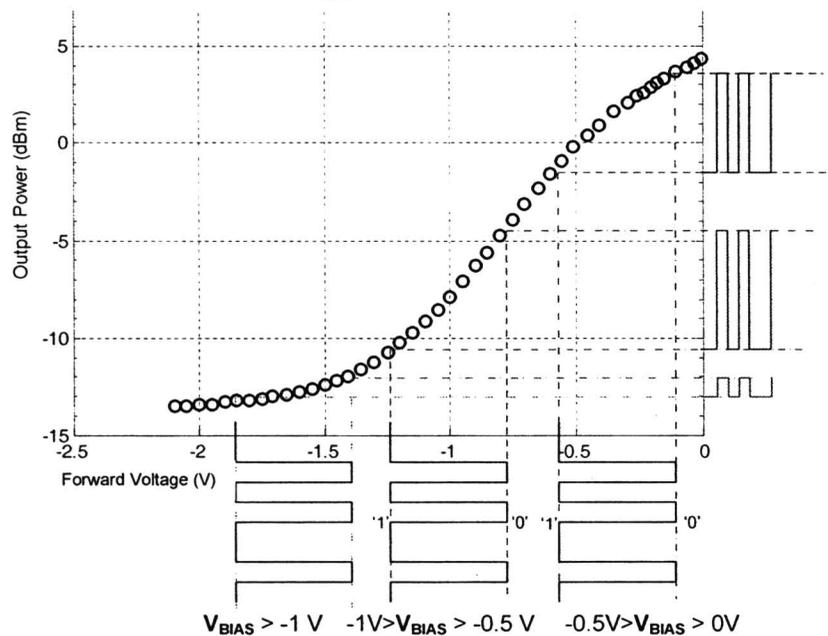


รูปที่ 5.9 แผนภาพรูปตาททางแสงเมื่อปรับค่า V_{BIAS} ของตัวขับมอดูเลเตอร์

ตารางที่ 5.2 พารามิเตอร์ที่วัดจากแผนภาพรูปตาทางแสง ณ ตำแหน่ง C ในกรณีปรับ V_{BIAS}

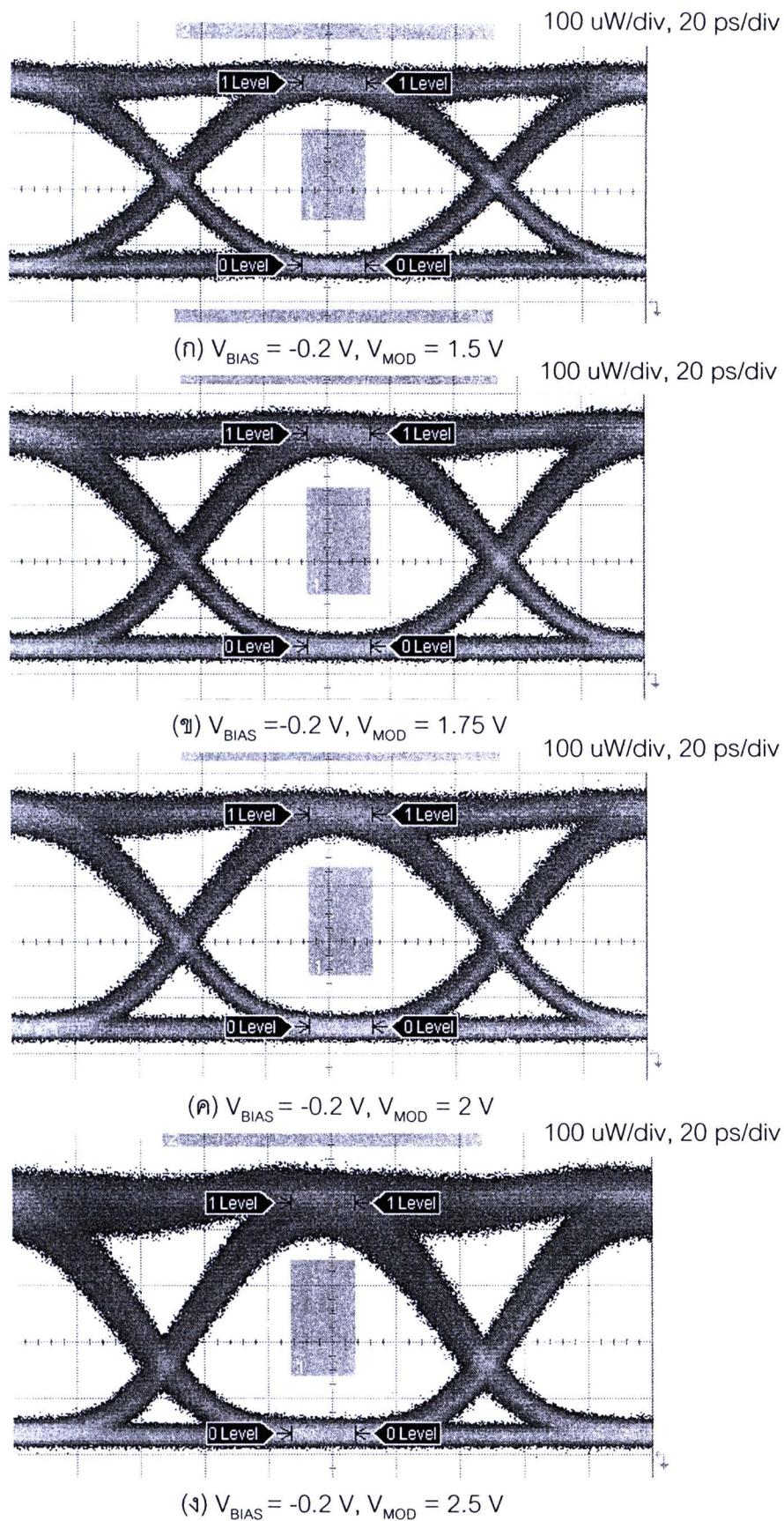
รูป	V_{BIAS} (V)	V_{MOD} (V)	EX (dB)	Rise time (ps)	Fall time (ps)
ก	-0.1	1.5	7.58	36.4	36.9
ข	-0.2	1.5	8.00	34.7	37.8
ค	-0.5	1.5	9.03	30.7	40.9
ง	-1.0	1.5	8.79	28.0	38.7

จากแผนภาพรูปตาทางแสงที่วัดได้ดังรูปที่ 5.9 พบว่า การเพิ่มระดับ V_{BIAS} ให้ติดลบมากขึ้นจะทำให้สัญญาณทางแสงมีค่า EX มากขึ้น จนถึงค่า V_{BIAS} เท่ากับ -1 V ค่า EX จะค่อยๆ ลดลงตามคุณลักษณะของ EAM ดังรูปที่ 5.10 และตารางที่ 5.2 ในขณะที่ V_{BIAS} มีค่าตั้งแต่ -0.5 V ขึ้นไป EML จะให้สัญญาณที่มีการส่ายของบิต 1 ขึ้นซึ่งแสดงถึงความไม่เสถียรของมอดูเลเตอร์ รวมทั้งมีฮาร์มอนิกอื่นแทรกเข้ามาอย่างเห็นได้ชัดดังรูปที่ 5.8 (ค) และ (ง) ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดจากการตั้งค่า V_{BIAS} อยู่ในช่วงที่ไม่เป็นเชิงเส้น (non linear) ของ EAM ดังนั้นค่า V_{BIAS} ควรกำหนดให้อยู่ในช่วง -0.5 V ถึง 0 V ซึ่งเป็นช่วงที่ EAM ทำงานเป็นเชิงเส้นดังรูปที่ 5.4 เพื่อให้ได้แผนภาพรูปตาที่เหมาะสมจึงเลือกใช้ค่า V_{BIAS} ที่ -0.2 V อย่างไรก็ตามค่า EX ที่ได้ยังคงน้อยกว่าค่ามาตรฐานที่ 8.2 dB ซึ่งแก้ไขได้ด้วยการปรับ V_{MOD} เพิ่มขึ้นซึ่งมีรายละเอียดในส่วนถัดไป



รูปที่ 5.10 ระดับสัญญาณแสงเมื่อปรับค่า V_{BIAS}

การปรับค่า V_{MOD} ในกรณีนี้ทำการปรับค่า V_{MOD} ที่ค่า 1.5 V, 1.75 V, 2.0 V, และ 2.5 V โดยคงค่า V_{BIAS} ไว้ที่ -0.2 V ตามที่ทดสอบไว้ข้างต้น ซึ่งผลการวัดที่ได้ทั้ง 4 กรณีแสดงดังรูปที่ 5.11 ส่วนพารามิเตอร์ที่วัดได้แสดงดังตารางที่ 5.3



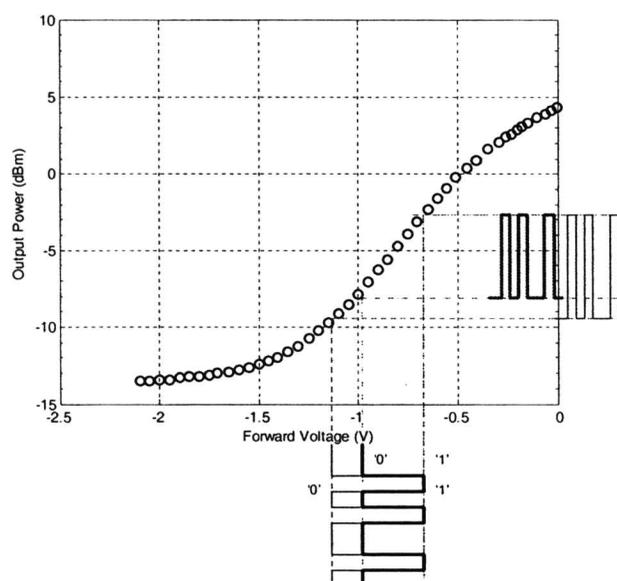
รูปที่ 5.11 แผนภาพรูปตาทางแสงเมื่อปรับค่า V_{MOD} ของตัวขับมอดูเลเตอร์

ตารางที่ 5.3 พารามิเตอร์ของแผนภาพรูปตาที่วัดได้ในกรณีเปลี่ยน V_{MOD}

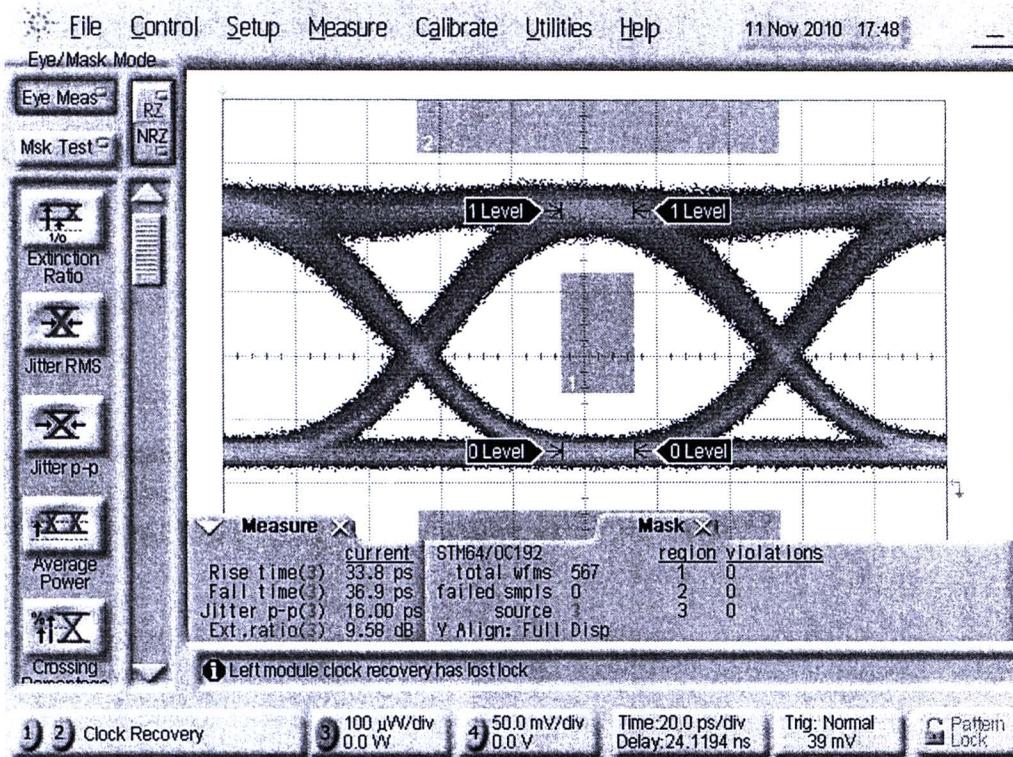
รูป	V_{BIAS} (V)	V_{MOD} (V)	EX (dB)	Rise time (ps)	Fall time (ps)
ก	-0.2	1.50	8.00	34.7	37.8
ข	-0.2	1.75	9.58	33.8	36.9
ค	-0.2	2.00	9.88	34.2	36.9
ง	-0.2	2.50	10.94	32.4	35.1

จากการทดลองเปลี่ยนค่า V_{MOD} ตามตารางที่ 5.3 โดยคงค่า V_{BIAS} ไว้ที่ -0.2 V พบว่า EML ให้สัญญาณทางแสงมีค่า EX เพิ่มมากขึ้นตามคุณลักษณะของ EAM ดังรูปที่ 5.12 โดยให้ค่า EX สูงสุด 10.94 dB ที่ค่า V_{MOD} เท่ากับ 2.5 V แต่เมื่อพิจารณารูปร่างของสัญญาณจากแผนภาพรูปตา ดังรูปที่ 5.11 (ง) พบว่าเส้นสัญญาณของบิต 1 เริ่มแยกออกเป็นสองเส้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งแสดงถึงความไม่เสถียรของมอดูเลเตอร์ถ้ามอดูเลตสัญญาณด้วย V_{MOD} มากกว่า 2.5 V นอกจากนั้นการเพิ่มขนาดของ V_{MOD} ยังทำให้ระดับ Eye Crossing มีค่าต่ำลง ส่งผลให้ระยะห่างของบิต 1 กับหน้ากามาตรฐานแคบลงด้วย ทำให้ภาครับอาจมีโอกาสตัดสินใจสัญญาณบิต 1 ผิดพลาดมากขึ้น ดังนั้นค่า V_{MOD} ที่ 1.75 V เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดไม่ว่าจะเป็น ค่า EX, รูปร่างของสัญญาณ และระดับแรงดัน

เมื่อเปรียบเทียบแผนภาพรูปตาของสัญญาณทางแสงจากการเพิ่มขนาด V_{MOD} กับการปรับค่า V_{BIAS} แล้ว พบว่าการเปลี่ยนค่า V_{MOD} ไม่ทำให้แผนภาพรูปตาเปลี่ยนไปมากนัก จึงสามารถสรุปได้ว่า V_{MOD} มีผลต่อค่า EX มากกว่า ในขณะที่ V_{BIAS} จะส่งผลต่อรูปร่างของสัญญาณมากกว่า



รูปที่ 5.12 ระดับสัญญาณแสงเมื่อปรับค่า V_{MOD}



รูปที่ 5.13 แผนภาพรูปตาของสัญญาณขาออกของตัวส่งสัญญาณทางแสงต้นแบบ 10 Gb/s

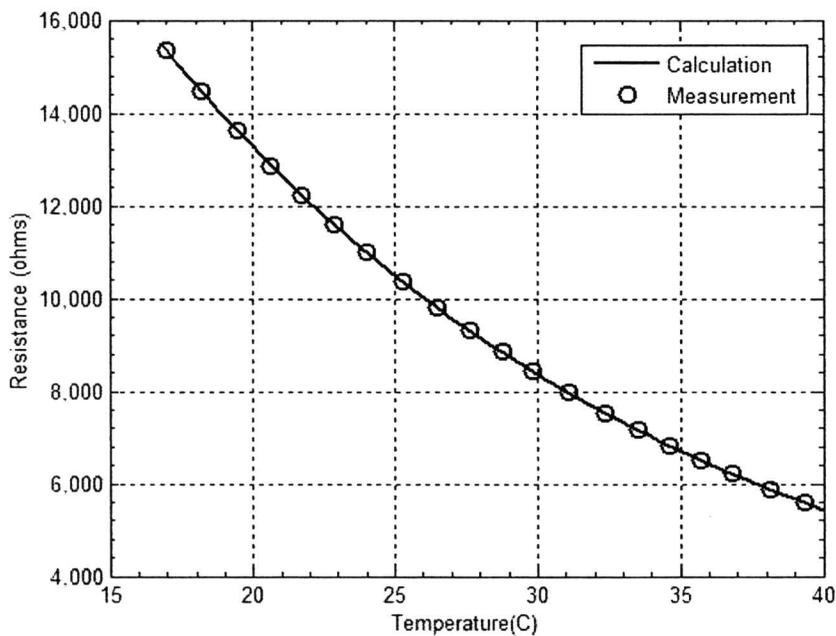
แผนภาพรูปตาของสัญญาณทางแสงอัตรา 10 Gb/s ที่ระดับกำลังแสง -5 dBm แสดงดังรูปที่ 5.13 มีค่า EX เท่ากับ 9.58 dB ซึ่งมีค่ามากกว่ามาตรฐาน ITU-T G.691 ซึ่งได้กำหนดไว้ที่ 8.2 dB สำหรับการส่งข้อมูล 10 Gb/s ระยะทาง 40 km ดังนั้น ในการทดสอบประสิทธิภาพต่างๆของตัวส่งสัญญาณทางแสงต้นแบบนี้ จะตั้งค่า V_{BIAS} เท่ากับ -0.2 V และ V_{MOD} เท่ากับ 1.75 V ให้กับตัวขับมอดูเลเตอร์เพื่อให้สัญญาณทางแสงมีค่า EX 9.58 dB โดยมีค่า Rise time, Fall time (ซึ่งเป็นช่วงเวลาของระดับสัญญาณ 20% ถึง 80% จากระดับสัญญาณบนสุด) และ Jitter p-p วัดได้เป็น 33.8 ps, 36.9 ps และ 16 ps ตามลำดับ

5.2 คุณลักษณะของระบบควบคุมอุณหภูมิ

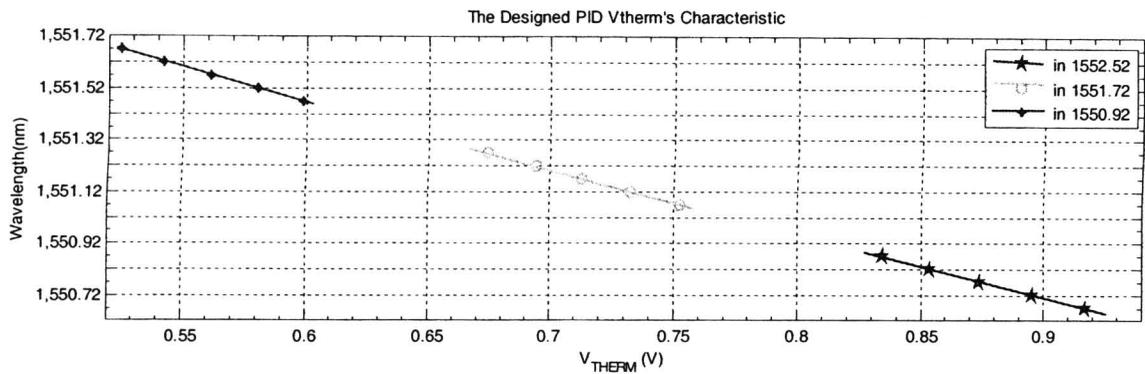
ผลการวัดคุณลักษณะของระบบควบคุมอุณหภูมิ มีทั้งหมด 2 ส่วน คือ (1) คุณลักษณะของเทอร์มิสเตอร์ และ (2) คุณลักษณะแรงดันเทอร์มิสเตอร์กับความยาวคลื่นของเลเซอร์ โดยมีรายละเอียดในหัวข้อที่ 5.2.1 ถึง 5.2.2 ตามลำดับ

5.2.1 คุณลักษณะของเทอร์มิสเตอร์

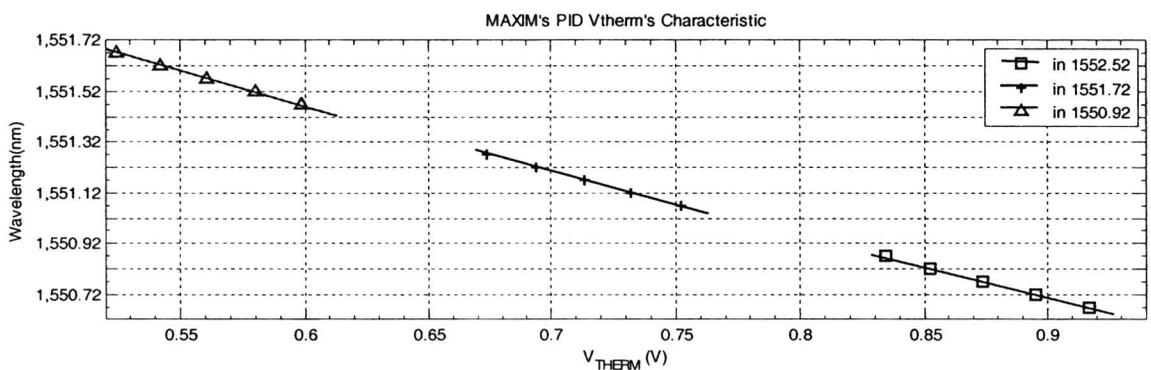
คุณลักษณะของเทอร์มิสเตอร์ หาได้จากการคำนวณค่าความต้านทานเทอร์มิสเตอร์ (R_{THERM}) จาก V_{THERM} ที่วัดได้ โดยการตั้งอุณหภูมิของเลเซอร์จากแรงดันตั้งค่า V_{SET} เพื่อให้เลเซอร์เปล่งแสงความยาวคลื่นตรงกับช่องสัญญาณของ ITU-T G.694.1 ซึ่งอยู่ในช่วง 1550.72 nm ถึง 1552.72 จากนั้นบันทึกค่า V_{THERM} ของทุกๆ ระยะห่างช่องสัญญาณ 0.1 nm เพื่อนำมาคำนวณหา ค่า R_{THERM} ตามสมการที่ (3.2) ในหัวข้อที่ 3.2.1.1 และคำนวณอุณหภูมิได้ตามสมการที่ (2.6) ในหัวข้อที่ 2.2.2.1 ซึ่งเลเซอร์ที่เปล่งแสงในช่วงความยาวคลื่นดังกล่าว มีอุณหภูมิในช่วง 17 °C ถึง 39 °C โดยประมาณ ซึ่งได้แนวโน้มของค่า R_{THERM} กับอุณหภูมิที่คำนวณได้ดังรูปที่ 5.14 จากรูปพบว่าเทอร์มิสเตอร์ขนาด 10 k Ω ที่อุณหภูมิประมาณ 25 °C มีค่า R_{THERM} ประมาณ 10 k Ω ซึ่งมีความสัมพันธ์เป็นแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลโดยจะมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง



รูปที่ 5.14 คุณลักษณะของเทอร์มิสเตอร์ขนาด 10 k Ω ที่อยู่ภายในเลเซอร์ EML โมดูล E4560



รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_{THERM} กับ λ ทั้ง 3 ช่องสัญญาณของวงจรพีไอดีที่ออกแบบ



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

ตารางที่ 5.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเลเซอร์ในแต่ละช่องสัญญาณ

λ in 100 GHz DWDM (nm)	Laser's temp in 100 GHz DWDM ($^{\circ}C$)	$d\lambda/dV$ (nm/V) The Designed PID	$d\lambda/dV$ (nm/V) MAXIM PID
1550.92	19	-4.83	-4.83
1551.72	29	-5.13	-5.13
1552.52	38	-5.39	-5.35

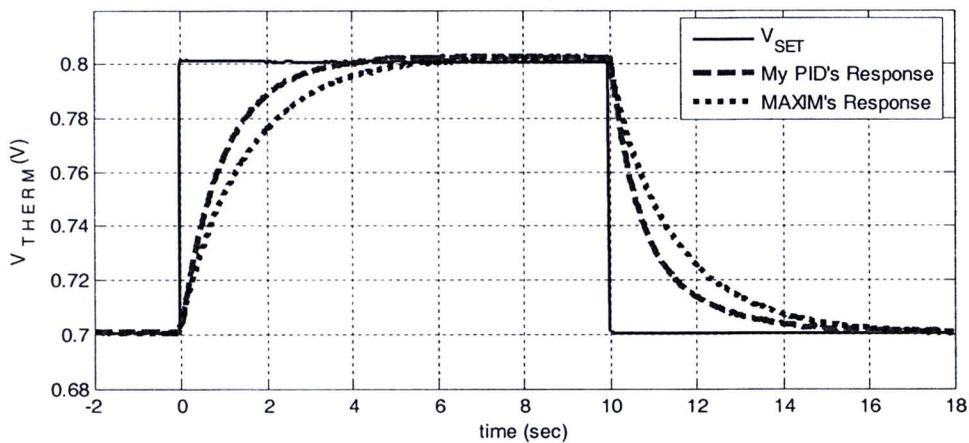
จากตารางที่ 5.4 พบว่าขณะที่เลเซอร์ทำงานในแต่ละช่องสัญญาณ ซึ่งมีอุณหภูมิแตกต่างกัน รวมทั้งมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นต่ออุณหภูมิ ($d\lambda/dV$) แตกต่างด้วยเช่นกัน ซึ่งแท้จริงแล้วทั้ง 3 ช่องสัญญาณควรจะมีค่า $d\lambda/dV$ เท่ากัน แต่เนื่องจากคุณลักษณะของเทอร์มิสเตอร์ซึ่งมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นตามที่ได้อธิบายไปในหัวข้อที่ 2.2.2.1 จึงทำให้พารามิเตอร์ดังกล่าวมีค่าแตกต่างกัน โดยที่อุณหภูมิสูงจะมีค่า $d\lambda/dV$ ติดลบมากและมีค่าติดน้อยลงเมื่ออุณหภูมิต่ำลง ในการนำความสัมพันธ์นี้ไปคำนวณเสถียรภาพของอุณหภูมิซึ่งจะกล่าวในหัวข้อที่ 5.3 ต้องมีการวัดและเลือกใช้ค่า $d\lambda/dV$ ให้สอดคล้องกับอุณหภูมิของเลเซอร์ขณะนั้น

5.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบควบคุมอุณหภูมิ

ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบควบคุมอุณหภูมิมี่ทั้งหมด 2 ส่วน คือ (1) ผลการทดสอบการตั้งค่าอุณหภูมิและความยาวคลื่น และ (2) ผลการวัดความคลาดเคลื่อนของความยาวคลื่นเลเซอร์ โดยมีรายละเอียดในหัวข้อที่ 5.3.1 ถึง 5.3.2 ตามลำดับ

5.3.1 ผลการทดสอบการตั้งค่าอุณหภูมิและความยาวคลื่น

การทดสอบการตั้งค่าอุณหภูมิและความยาวคลื่นมีจุดประสงค์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพทางด้านความเร็วของวงจรควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งได้กล่าวรายละเอียดของการทดสอบในหัวข้อที่ 4.1.2 ผลการทดสอบนี้จะทำการเปรียบเทียบผลจากวงจรพีไอดีที่ออกแบบ กับวงจรพีไอดีของบริษัท MAXIM ซึ่งได้ผลการวัดดังรูปที่ 5.18



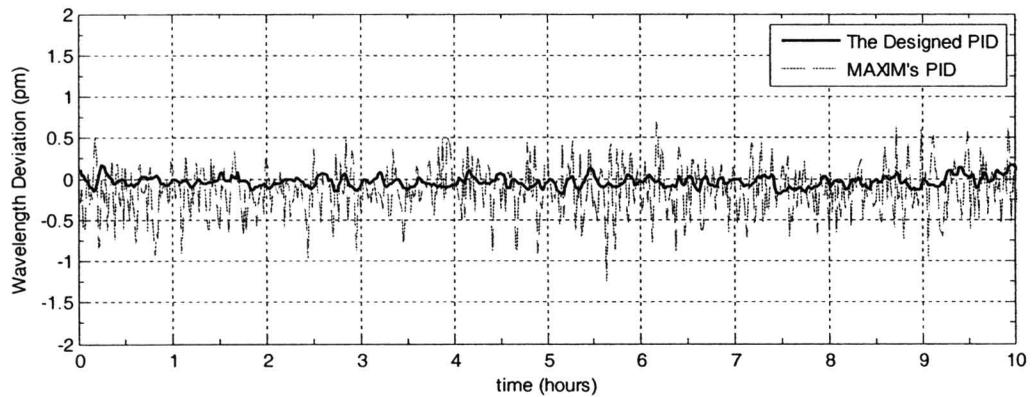
รูปที่ 5.18 ผลการตอบสนองของการตั้งค่าอุณหภูมิและความยาวคลื่น

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้เป็นสองกรณี คือ (1) การระบายความร้อนจากเลเซอร์ โดยเปลี่ยนค่า V_{SET} จาก 0.7 V ไปเป็น 0.8 V (ลดอุณหภูมิจาก 29 °C เป็น 23 °C ซึ่งเปลี่ยน λ จาก 1551.72 nm ไปเป็น 1551.22 nm) และ (2) การเพิ่มความร้อนให้กับเลเซอร์โดยเปลี่ยนค่า จาก 0.8 V ไปเป็น 0.7 V (เพิ่มอุณหภูมิจาก 23 °C เป็น 29 °C ซึ่งเปลี่ยน λ จาก 1551.22 nm ไปเป็น 1551.72 nm) โดยจะพิจารณาจากการระบายความร้อนเป็นหลักเพราะการเพิ่มความร้อนจาก TEC จะใช้เวลาน้อยกว่าในการเปลี่ยนค่าอุณหภูมิเพราะ TEC มีความสามารถในการเพิ่มความร้อนดีกว่าการระบายความร้อน จากกราฟในรูปที่ 5.18 พบว่าวงจรพีไอดีที่ออกแบบสามารถตอบสนองต่อ V_{SET} โดยใช้เวลาประมาณ 4 วินาที ทั้งในส่วนของ การลดและเพิ่มอุณหภูมิให้กับเลเซอร์ และเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรควบคุมพีไอดีของ MAXIM วงจรที่ออกแบบจะให้ผลตอบสนองที่รวดเร็วกว่าเล็กน้อย ทั้งนี้เพราะวงจรที่ออกแบบได้ใช้การออกแบบในโดเมนทางเวลา ซึ่งจะเห็นผลของการตอบสนองของสัญญาณได้ชัดเจนกว่าการออกแบบในโดเมนทางความถี่

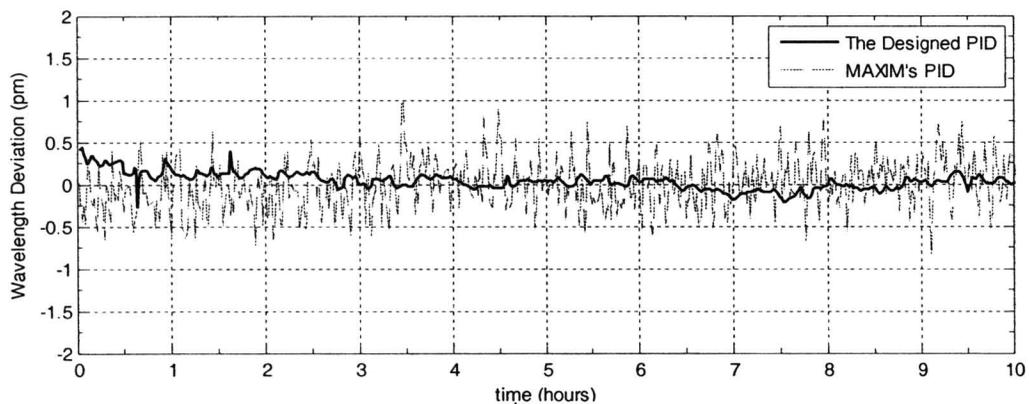


5.3.2 ผลการวัดความคลาดเคลื่อนของความยาวคลื่นเลเซอร์

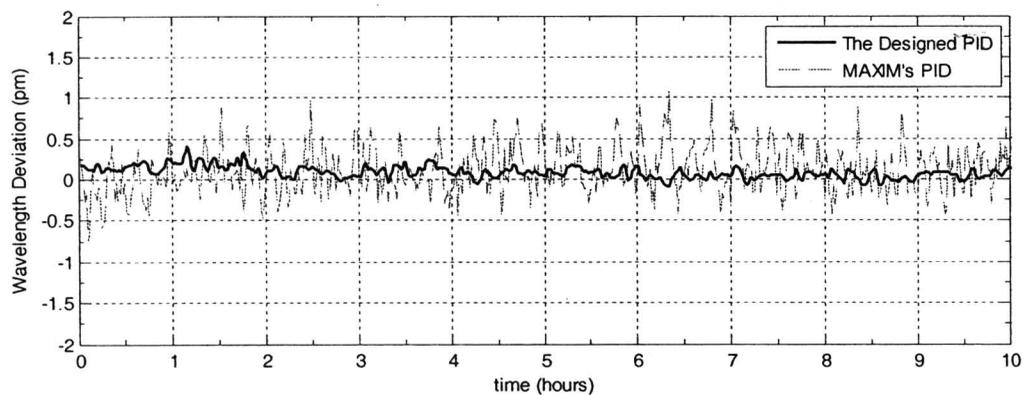
การทดสอบในแต่ละช่องสัญญาณจะเปรียบเทียบค่า $\Delta\lambda$ ที่ได้ จากการควบคุมอุณหภูมิของวงจรพีไอดีที่ได้ออกแบบ กับวงจรพีไอดีของบริษัท MAXIM โดยมีแผนภาพการเชื่อมต่อการวัดทดสอบดังรูปที่ 4.4 ซึ่งอธิบายในหัวข้อที่ 4.1.3 โดยบันทึกค่า V_{ERROR} แล้วทำการแปลงเป็นค่า $\Delta\lambda$ ตามสมการที่ (4.1) ในช่วงเวลา 10 ชั่วโมง โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามตารางที่ 5.4 ผลการวัด $\Delta\lambda$ ทั้ง 3 ช่องสัญญาณได้แก่ 1550.92 nm, 1551.72 nm และ 1552.52 nm ดังรูปที่ 5.19



(ก) เสถียรภาพของความยาวคลื่นของช่องสัญญาณ 1550.92 nm



(ข) เสถียรภาพของความยาวคลื่นของช่องสัญญาณ 1551.72 nm



(ค) เสถียรภาพของความยาวคลื่นของช่องสัญญาณ 1552.52 nm

รูปที่ 5.19 เสถียรภาพของความยาวคลื่นในแต่ละช่องสัญญาณ

จากผลการวัดค่า $\Delta\lambda$ ของทั้งสามช่องสัญญาณ โดยวงจรควบคุมอุณหภูมิทั้งสองพบว่า สามารถรักษาอุณหภูมิของเลเซอร์ให้มี $\Delta\lambda$ ต่ำกว่า 10 pm โดยค่า $\Delta\lambda$ สูงสุดของแต่ละช่องสัญญาณบันทึกไว้ดังตารางที่ 5.5 ดังนั้นวงจรทั้งสองมีโอกาสทำให้เกิดสัญญาณ Interchannel Crosstalk อันเนื่องมาจากความไม่นิ่งของอุณหภูมิน้อยมาก เมื่อเทียบกับ Interchannel Crosstalk อันเนื่องจาก Optical Tunable Filter ที่ระยะห่างของช่องสัญญาณข้างเคียง จากรูปที่ 5.19 พิจารณาจากแนวโน้มของค่า $\Delta\lambda$ ทั้งสามรูปพบว่า วงจรที่ออกแบบสามารถควบคุมอุณหภูมิให้มีเสถียรภาพดีกว่าวงจรพีไอดีจากบริษัท MAXIM โดยแสดงค่า $\Delta\lambda$ สูงสุดในแต่ละช่องสัญญาณดังตารางที่ 5.5 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐาน 10 pm ในทุกการทดสอบ ดังนั้นจึงสามารถนำวงจรพีไอดีที่ออกแบบไปใช้ควบคุมอุณหภูมิของเลเซอร์ในตัวส่งสัญญาณทางแสง ในระบบการรับส่งข้อมูลแบบ DWDM ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 5.5 ผลการวัดค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดของความยาวคลื่นในแต่ละช่องสัญญาณ

$\Delta\lambda$ (nm)	Laser's temp (°C)	Maximum $\Delta\lambda$ of The Designed PID (pm)	Maximum $\Delta\lambda$ of MAXIM PID (pm)
1550.92	37	38.9 uV X (-4.83 nm/V) = -0.19	258 uV X (-4.83 nm/V) = -1.24
1551.72	29	-85.4 uV X (-5.13 nm/V) = 0.44	-201 uV X (-5.13 nm/V) = 1.03
1552.52	22	-74.0 uV X (-5.39 nm/V) = 0.40	-205 uV X (-5.35 nm/V) = 1.10

5.4 ผลการทดสอบระบบ DWDM 3 ช่องสัญญาณ

ในการทดสอบระบบ DWDM 3 ช่องสัญญาณ ทำการทดสอบสองระบบ คือ ระบบที่มีระยะห่างช่องสัญญาณเท่ากับ 25 GHz (0.2 nm) และ 50 GHz (0.4 nm) โดยส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสงระยะทางสั้นๆ ซึ่งได้อธิบายรายละเอียดของการเชื่อมต่ออุปกรณ์แล้วในหัวข้อที่ 4.2 โดยได้ทำการวัดทดสอบและวิเคราะห์ผลใน 3 หัวข้อหลัก คือ (1) สเปกตรัมของสัญญาณแสง, (2) Interchannel Crosstalk และ (3) อัตราความผิดพลาดบิต โดยมีรายละเอียดในหัวข้อที่ 5.4.1 ถึง 5.4.3 ตามลำดับ

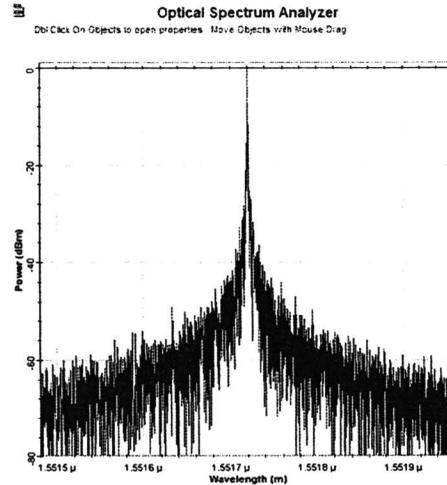
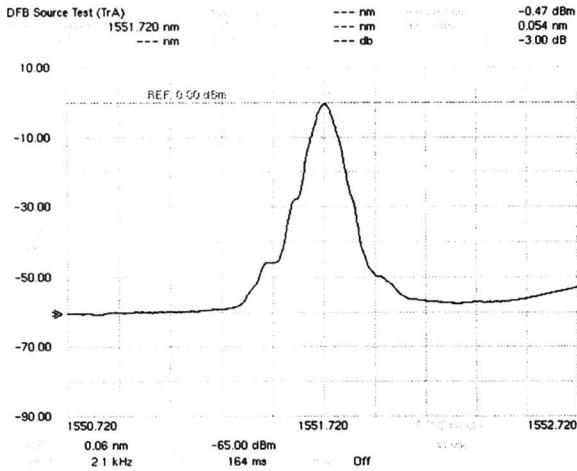
5.4.1 สเปกตรัมของสัญญาณแสง

การวัดสเปกตรัมของสัญญาณแสงใช้เครื่อง OSA ในการวัด โดยมีการเชื่อมต่อระบบ DWDM ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งระบุตำแหน่ง A ถึง C ในการวัดสเปกตรัม สำหรับตำแหน่ง A เป็นตำแหน่งของตัวส่งสัญญาณ ส่วนตำแหน่ง B เป็นตำแหน่งของการรวมสัญญาณแสง และตำแหน่ง C เป็นตำแหน่งของการแยกสัญญาณทางแสง โดยแบ่งออกเป็นภาคส่งและภาครับมีรายละเอียดในหัวข้อที่ 5.4.1.1 และ 5.4.1.2 ตามลำดับ

5.4.1.1 ภาคส่ง

ในการทดสอบได้ตั้งค่ากระแสไบแอสให้กับเลเซอร์ EML จะได้สเปกตรัมแสดงดังรูปที่ 5.20 (ซ้าย) ซึ่งเป็นสเปกตรัมของเลเซอร์ชนิด DFB ที่ยังไม่มีการมอดูเลตข้อมูล อ่านระดับกำลังแสงค่ายอดได้เท่ากับ -0.47 dBm และมีค่าความกว้างสเปกตรัมเท่ากับ 0.054 nm ที่ตำแหน่งต่ำจากยอด -3 dB ดังที่ได้อธิบายไปก่อนหน้านี้ในรูปที่ 5.1

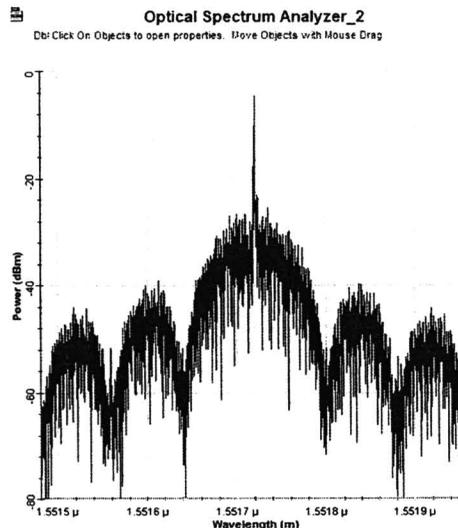
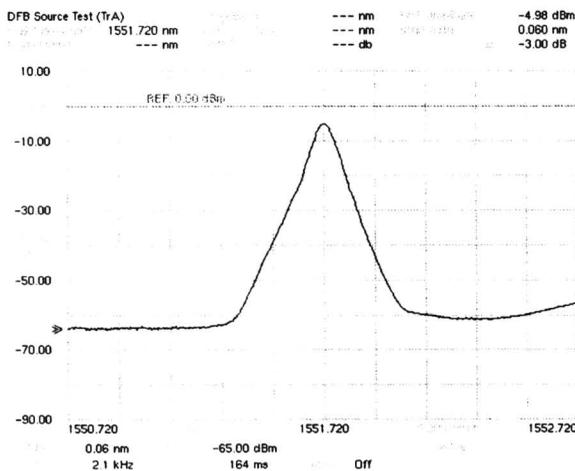
สเปกตรัมของสัญญาณภาคส่งแบ่งออกเป็น 2 ตำแหน่ง คือ (1) ตำแหน่ง A เป็นสเปกตรัมของช่องสัญญาณเดี่ยว และ (2) ตำแหน่ง B เป็นสเปกตรัมหลังจากรวมช่องสัญญาณทั้ง 3 ด้วย Fiber Coupler ตามที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 4.2.1 โดยมีผลการวัดสเปกตรัมดังรูปที่ 5.21 ถึง รูปที่ 5.23



รูปที่ 5.20 สเปกตรัมของเลเซอร์ขณะไม่มีการมอดูเลตข้อมูล ที่ตำแหน่ง A

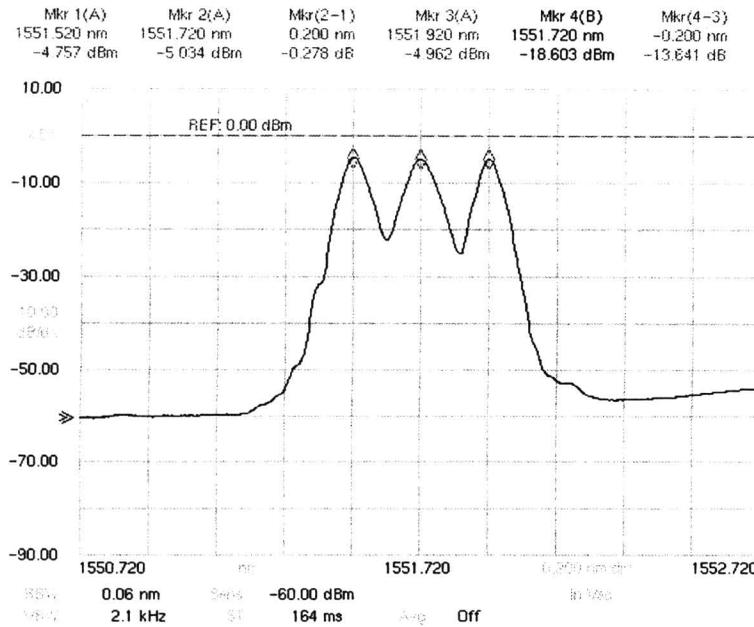
(ซ้าย) วัดด้วยเครื่อง OSA และ (ขวา) จำลองผลด้วยโปรแกรม OptiSystem 8.0

เมื่อทำการมอดูเลตสัญญาณข้อมูลอัตรา 10 Gb/s (OC-192/STM-64) ซึ่งมีรายละเอียดของสัญญาณในหัวข้อ 5.1.2 แล้ววัดสเปกตรัมของสัญญาณแสงขาออกแสดงดังรูปที่ 5.21 (ซ้าย) ซึ่งเป็นตำแหน่ง A ของแผนภาพรูปที่ 4.5 จากผลการวัดพบว่าสเปกตรัมมีการถ่างออกเพิ่มขึ้นเป็น 0.06 nm และมีระดับกำลังค่ายอดแสงลดลงเป็น -4.98 dBm เนื่องจากมีการมอดูเลตข้อมูลเข้ามา ซึ่งข้อจำกัดความละเอียดของเครื่อง OSA อธิบายไปในหัวข้อที่ 5.1.1.1 ทำให้สเปกตรัมที่วัดได้มีลักษณะกว้างออกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งที่จริงแล้วสเปกตรัมของเลเซอร์มีซิงค์ฟังก์ชัน (Sinc Function) ของสัญญาณ PRBS 10 Gb/s มอดูเลตอยู่ด้วยดังรูปที่ 5.21 (ขวา) ซึ่งสเปกตรัมทางไฟฟ้าของสัญญาณ PRBS ดังกล่าวแสดงรายละเอียดแล้วในหัวข้อที่ 2.4.2

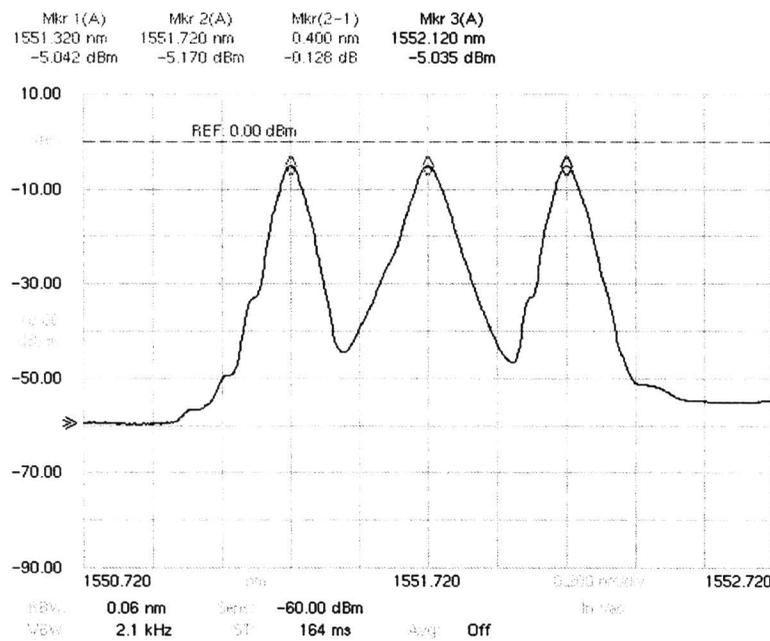


รูปที่ 5.21 สเปกตรัมของเลเซอร์เมื่อมีการมอดูเลตข้อมูล ที่ตำแหน่ง A

(ซ้าย) วัดด้วยเครื่อง OSA และ (ขวา) จำลองผลด้วยโปรแกรม OptiSystem 8.0



รูปที่ 5.22 สเปกตรัมของ 3 ช่องสัญญาณที่ตำแหน่ง B ของสัญญาณระยะห่าง 25 GHz

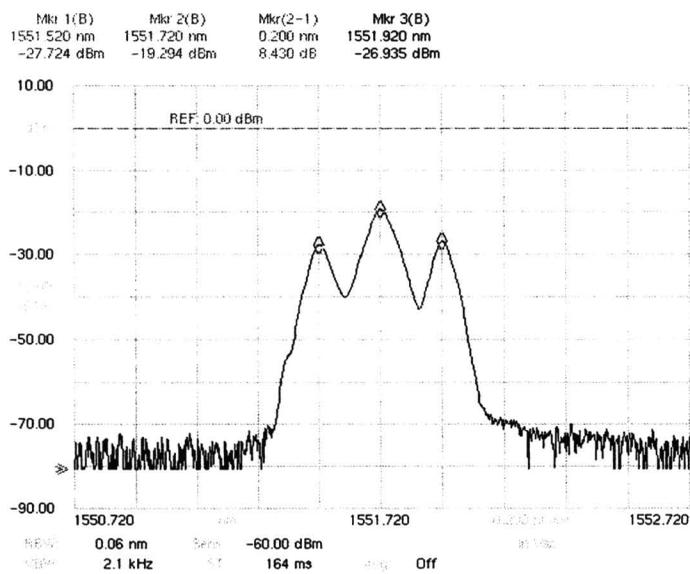


รูปที่ 5.23 สเปกตรัมของ 3 ช่องสัญญาณที่ตำแหน่ง B ของสัญญาณระยะห่าง 50 GHz

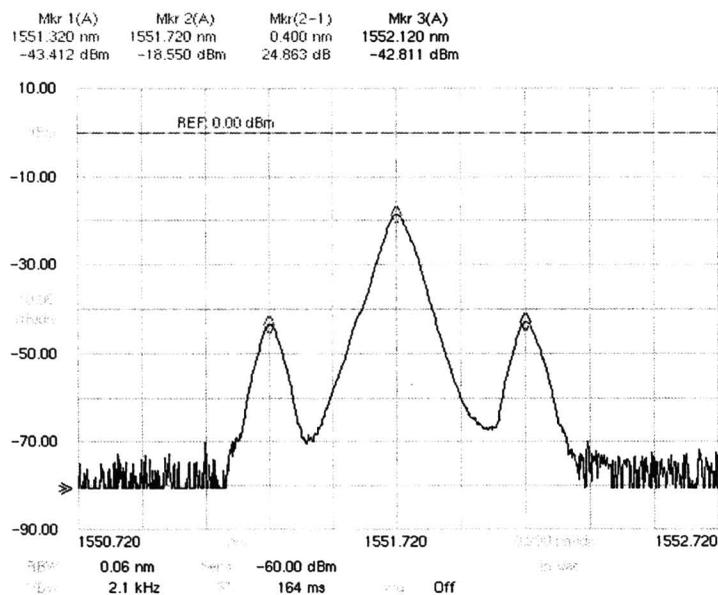
เมื่อรวมช่องสัญญาณทั้งสามเข้าด้วยกันแล้ววัดสเปกตรัมทางแสงที่ตำแหน่ง B ได้ดังรูปที่ 5.22 สำหรับระบบ 25 GHz DWDM และ รูปที่ 5.23 สำหรับระบบ 50 GHz DWDM โดยกำหนดระดับกำลังแสงค่ายอดเป็น -5 dBm เท่ากันทุกช่องสัญญาณ ส่วนสเปกตรัมของช่องสัญญาณข้างเคียงทั้งสองรูปมีขนาดแคบกว่าของช่องสัญญาณ 1551.72 nm เนื่องจากไม่มีการมอดูเลตสัญญาณข้อมูล

5.4.1.2 ภาครับ

เมื่อทำการแยกช่องสัญญาณที่ 2 (ความยาวคลื่น 1551.72 nm) ออกจากช่องสัญญาณข้างเคียงที่ระดับกำลังแสงเฉลี่ย P_{AVG} เท่ากับ -16 dBm แล้วพิจารณาสเปกตรัมพบว่ามีความต่างของระดับช่องสัญญาณข้างเคียงเท่ากับ 8.43 dB และ 24.86 dB แสดงดังรูปที่ 5.24 และ 5.24 สำหรับระบบ DWDM 25 GHz และ 50 GHz ตามลำดับ โดยความต่างของระดับสัญญาณเป็นไปตามคุณลักษณะของ Tunable Filter ซึ่งได้กล่าวรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 4.2.2.1 จากนั้นช่องสัญญาณที่ถูกแยกออกมาจะเชื่อมต่อเข้าสู่ตัวรับสัญญาณทางแสงต่อไป



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



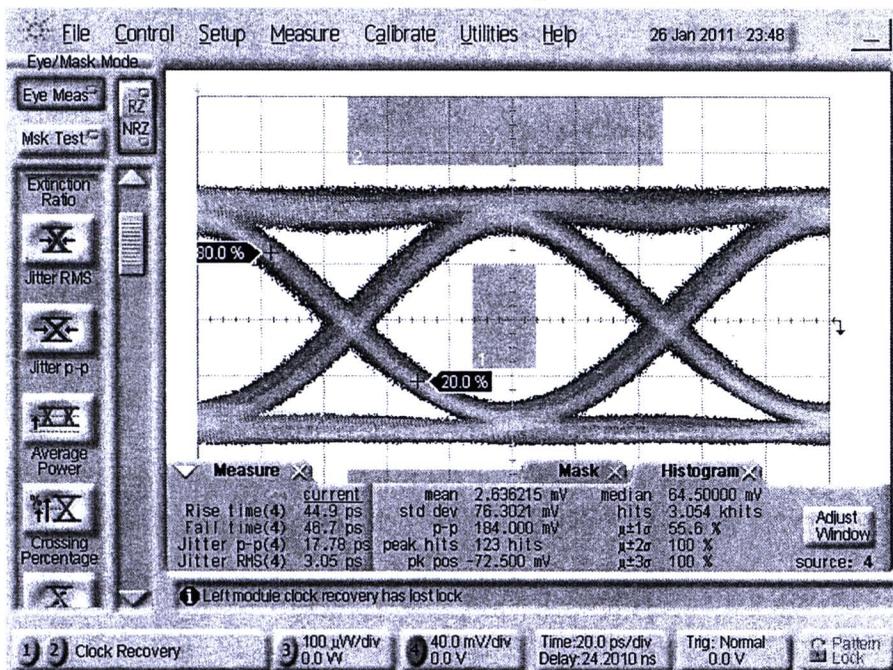
รูปที่ 5.25 สเปกตรัมที่ตำแหน่ง C ของระบบ 50 GHz DWDM ที่ P_{AVG} = -16 dBm

5.4.2 Interchannel Crosstalk

ในการรับส่งข้อมูลแบบ DWDM ปัญหาสำคัญที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ คือ สัญญาณรบกวนระหว่างช่องสัญญาณ (Interchannel Crosstalk) ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสัญญาณมากขึ้นเมื่อระยะห่างช่องสัญญาณแคบลง ในหัวข้อนี้จะทำการทดสอบ Interchannel Crosstalk ของระบบ DWDM 3 ช่องสัญญาณโดยมีระยะห่างช่องสัญญาณ 25 GHz (0.2 nm) และ 50 GHz (0.4 nm) เปรียบเทียบกัน ซึ่งมีรายละเอียดของระบบในหัวข้อที่ 4.2

ในการวัดสัญญาณ Interchannel Crosstalk แสดงผลการวัดด้วยแผนภาพรูปตาทางไฟฟ้าที่ได้ออกจาก APD พร้อมแสดงฮิสโทแกรมของสัญญาณบิต 0 กับบิต 1 ดังรูปที่ 5.26 เพราะสัญญาณรบกวนดังกล่าวจะทำให้ช่องสัญญาณที่พิจารณาอยู่มีคุณภาพของสัญญาณที่แย่ลง ซึ่งสังเกตได้จากแผนภาพรูปตาที่หนามากขึ้น โดยจะเปรียบเทียบแผนภาพใน 3 กรณี คือ (1) 1 ช่องสัญญาณ, (2) 3 ช่องสัญญาณก่อนเข้า Tunable Filter, และ (3) 3 ช่องสัญญาณ หลังจากผ่าน Tunable Filter

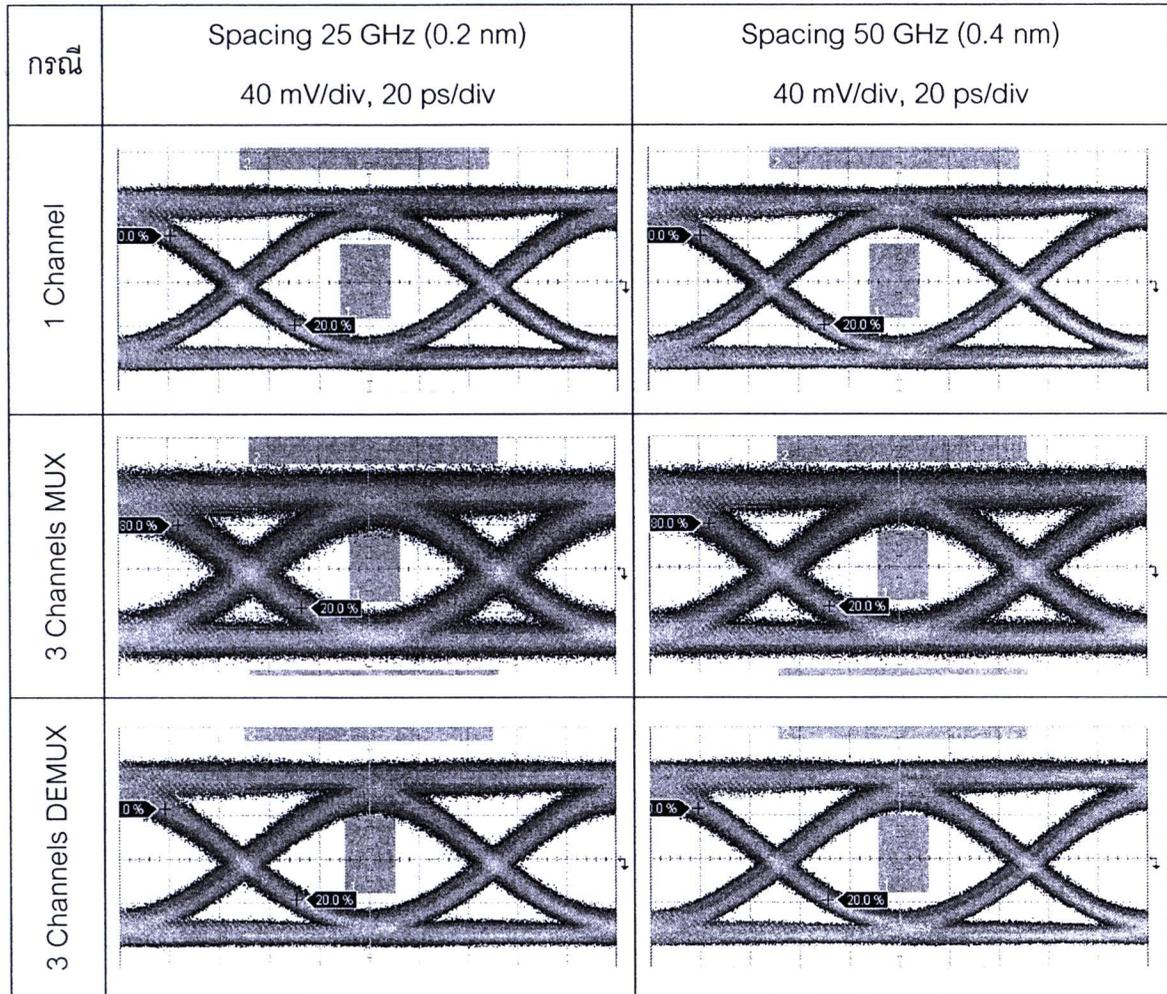
ทำการวัดแผนภาพรูปตาที่ระดับกำลังแสงเฉลี่ยเท่ากัน คือ -16 dBm ซึ่งเป็นค่าระดับกำลังแสงเสมือนส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสงระยะทาง 40 km กล่าวคือ ที่ต้นทางส่งระดับกำลังแสงเฉลี่ย -6 dBm (เนื่องจากใช้ Fiber Coupler 2 ตัวทำให้เกิด insertion loss ไปอย่างน้อย 6 dB) ส่งแสงผ่านเส้นใยนำแสงเกิดการลดทอนไป $0.2 \text{ dB/km} \times 40 \text{ km} = 8 \text{ dB}$ ขาดเศษค่า dispersion penalty ประมาณ 2 dB ดังนั้นที่ปลายทางกำลังแสงเฉลี่ยเป็น $-6 \text{ dBm} - 8 - 2 = -16 \text{ dBm}$ โดยผลการวัดที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.6 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของบิต 1 และ 0 ดังตารางที่ 5.7



รูปที่ 5.26 การวัดสัญญาณ Interchannel Crosstalk

ตารางที่ 5.6 เปรียบเทียบสัญญาณ Crosstalk แผนภาพรูปตามระบบ DWDM

ระยะช่องสัญญาณ 25 GHz และ 50 GHz ที่ระดับกำลังแสงเฉลี่ย -16 dBm



ตารางที่ 5.7 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของบิต 1 และ 0 จากแผนภาพรูปตา

Standard Deviation	1 Ch		3 Ch MUX		3 Ch DEMUX	
	@ -6 dB	@ -16 dBm	@ -16 dBm		@ -16 dBm	
Spacing	-	-	25 GHz	50 GHz	25 GHz	50 GHz
0	4.89359	5.79066	7.14476	6.69255	6.21756	6.11566
1	6.24758	7.00598	10.1044	9.50925	9.88599	9.46720

จากตารางที่ 5.6 และ 5.7 ในกรณีการส่งสัญญาณทางแสงช่องเดียว (1 Channel) มีแผนภาพรูปตาเปิดกว้างดังรูปที่ 5.26 ซึ่งมีค่าระดับกำลังแสงเป็น -6 dBm แต่เมื่อลดทอนสัญญาณให้เหลือ -16 dBm จะได้แผนภาพรูปตาดังตารางที่ 5.6 ในกรณี 1 Channel และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, Std Dev) ของบิต 1/บิต 0 เพิ่มขึ้นจาก 6.24758/4.89359 mV เป็น 7.00598/5.79066 mV ซึ่งแสดงถึงสัญญาณรบกวนจาก APD ที่มากขึ้นเมื่อระดับกำลังแสงต่ำลง แสดงถึงค่าสัดส่วนของระดับสัญญาณข้อมูลต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio, SNR) ลดลง

จากนั้นรวมช่องสัญญาณข้างเคียงเข้ามาเป็น 3 ช่องสัญญาณ (3 Channels MUX) ที่ระดับกำลังแสงเฉลี่ย -16 dBm ระดับสัญญาณบิต 1 และบิต 0 มีความหนาแน่นมากขึ้นจนทำให้แผนภาพรูปตาแคบลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเป็นผลจากสัญญาณ Interchannel Crosstalk ถ้าพิจารณาจากกรณี 1 Channel พบว่าค่า STD DEV ของบิต 1 มีค่า 7.00598 mV แต่เมื่อมัลติเพล็กซ์สัญญาณเป็นกรณี 3 Channel จะพบว่าค่า STD DEV เพิ่มขึ้นเป็น 10.1044 mV และ 9.50925 สำหรับระบบ 25 GHz และ 50 GHz DWDM ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงความรุนแรงของสัญญาณ Interchannel Crosstalk เมื่อระยะห่างช่องสัญญาณแคบลงได้อย่างชัดเจน

ที่ภาครับได้แยกช่องสัญญาณ 1551.72 nm ออกด้วย Tunable Filter ได้แผนภาพรูปตาดังกรณี 3 Channels DEMUX พบว่า Tunable Filter สามารถลดระดับกำลังแสงของช่องสัญญาณข้างเคียงได้ 8.43 dB และ 24.86 สำหรับระบบ 25 GHz และ 50 GHz DWDM ตามลำดับ ซึ่งได้แสดงรายละเอียดของสเปกตรัมในหัวข้อที่ 5.4.1.2 ทำให้แผนภาพรูปตากลับมาเปิดกว้างขึ้น แต่ยังคงมีผลของ Interchannel Crosstalk เหลืออยู่เมื่อเทียบกับกรณี 1 Channel ซึ่งสังเกตจากค่า STD DEV ของบิต 1 ได้จากตารางที่ 5.7 พบว่าค่าของกรณี 3 Channels MUX มากกว่ากรณี 3 Channels DEMUX และมากกว่ากรณี 1 Channel

จากการวัดแผนภาพรูปตาทั้ง 3 กรณีพบว่านอกจากตัวส่งสัญญาณทางแสง ที่ต้องควบคุมอุณหภูมิให้หนึ่งแล้ว ที่ภาครับยังต้องมีตัวแยกสัญญาณที่เหมาะสมเพื่อทำให้กำลังแสงจากช่องสัญญาณข้างเคียงหลุดเข้ามายังช่องสัญญาณที่พิจารณาให้น้อยที่สุดด้วยเช่นกัน

5.4.3 อัตราความผิดพลาดบิต

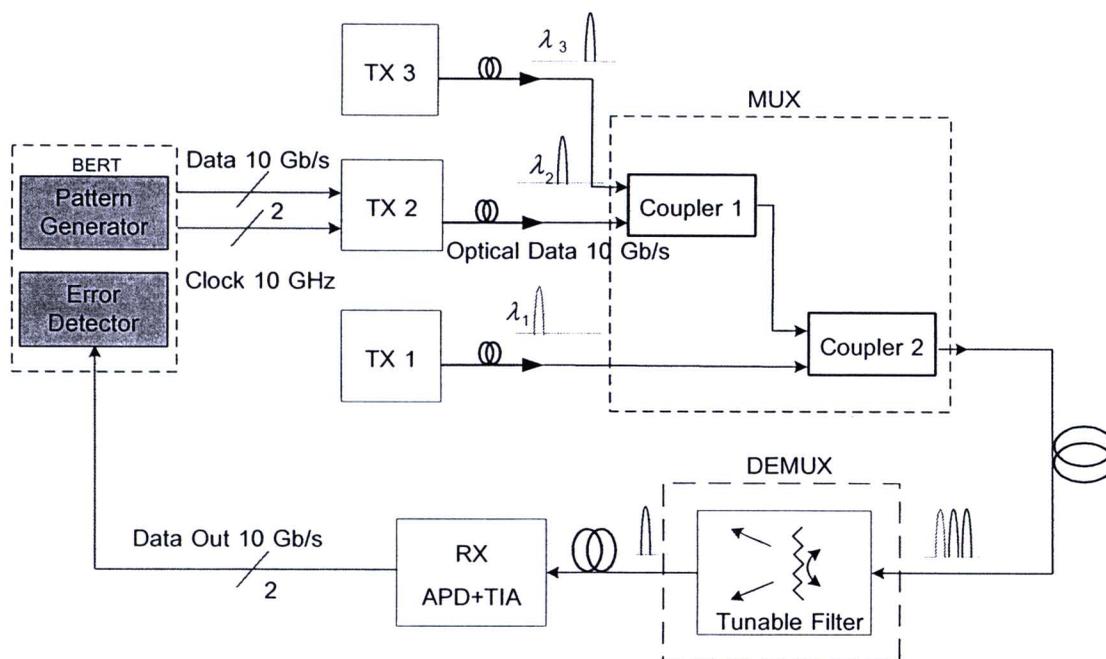
การวัดอัตราความผิดพลาดบิตของระบบ DWDM 3 ช่องสัญญาณ มีจุดประสงค์ในการทดสอบ 2 ข้อ คือ (1) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลผ่านเส้นใยนำแสงระยะทางสั้นๆ ระหว่างตัวส่งสัญญาณทางแสงต้นแบบพร้อมระบบควบคุมอุณหภูมิ ร่วมกับตัวรับสัญญาณทางแสงที่ใช้ตัวตรวจแสงชนิด APD และ (2) ศึกษาผลกระทบของสัญญาณ Interchannel Crosstalk ที่เกิดขึ้นจากระยะห่างช่องสัญญาณในระบบ DWDM ที่มีต่ออัตราความผิดพลาดบิตในกรณีระยะห่างช่องสัญญาณ 25 GHz และ 50 GHz

ในการทดสอบใช้แหล่งกำเนิดข้อมูลทางไฟฟ้าจากเครื่อง BERT ซึ่งเป็นโมดูล Pattern Generator โดยใช้ข้อมูลแบบ PRBS $2^{31}-1$ polynomial และที่ภาครับใช้เครื่อง BERT ซึ่งมีโมดูล Error Detector ในการตรวจวัดข้อมูลผิดพลาด โดยเครื่องมือวัดจะนำสัญญาณขาเข้าที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้ส่งออกไปจาก Pattern Generator เพื่อวัดอัตราความผิดพลาดบิตสำหรับการเชื่อมต่ออุปกรณ์เพื่อทำการวัดทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.27

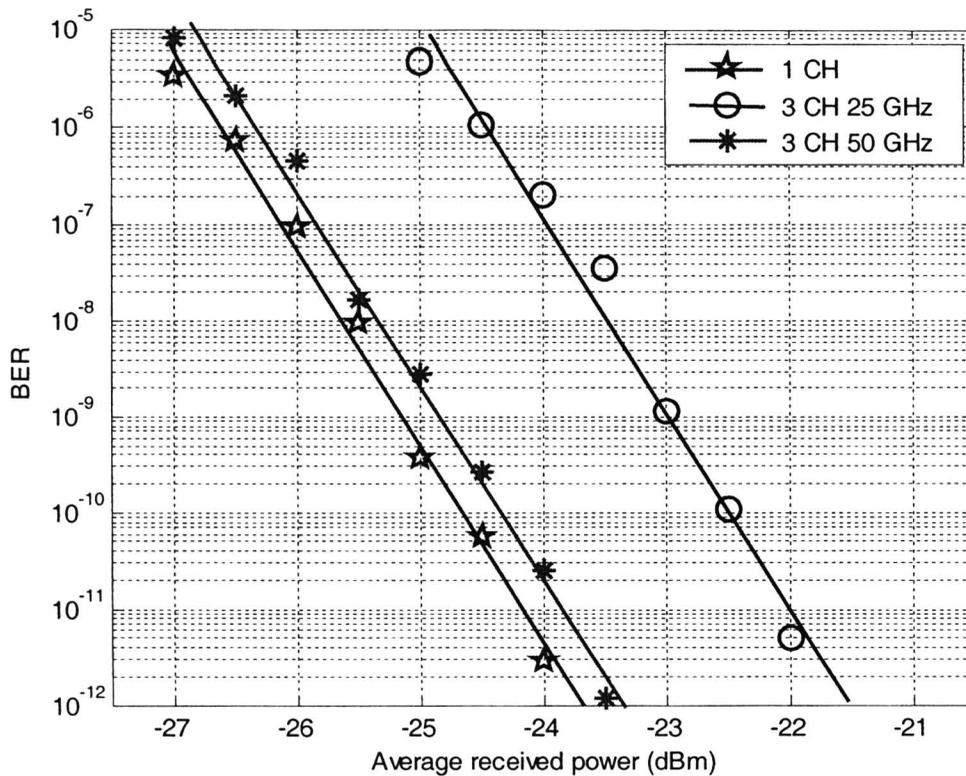
การวัดอัตราความผิดพลาดบิตแบ่งออกเป็น 3 กรณี คือ (1) 1 ช่องสัญญาณ (1CH) เป็นการทดสอบประสิทธิภาพของตัวส่งสัญญาณทางแสงต้นแบบพร้อมระบบควบคุมอุณหภูมิ เฉพาะช่องสัญญาณ TX 2, (2) 3 ช่องสัญญาณระยะห่าง 25 GHz (3 CH 25 GHz) และ (3) 3 ช่องสัญญาณระยะห่าง 50GHz (3 CH 50 GHz) สำหรับกรณีที่ (2) และ (3) เป็นการทดสอบหลังจากการรวมทั้งสามช่องสัญญาณแล้ว ซึ่งมีรายละเอียดของระยะห่างช่องสัญญาณและการกำหนดช่องสัญญาณดังตารางที่ 5.8 ส่วนผลการวัดอัตราความผิดพลาดบิตของทั้ง 3 กรณีแสดงดังรูปที่ 5.28

ตารางที่ 5.8 การกำหนดช่องสัญญาณทางแสงในระบบ DWDM

Spacing (GHz)/(nm)	TX1(nm)	TX2(nm)	TX3 (nm)
25/0.2	1551.52	1551.72	1551.92
50/0.4	1551.32	1551.72	1552.12



รูปที่ 5.27 การเชื่อมต่ออุปกรณ์เพื่อวัดอัตราบิตผิดพลาดในระบบ DWDM



รูปที่ 5.28 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดบิตกับกำลังแสงเฉลี่ยขาเข้า APD ทั้ง 3 กรณี

เมื่อพิจารณาที่ BER เท่ากับ 10^{-9} อ่านค่ากำลังแสงขาเข้าเฉลี่ยของทั้ง 3 กรณีจากรูปที่ 5.28 ได้เท่ากับ -25.2, -24.8 และ -23.0 dBm ตามลำดับ พบว่าการที่มีช่องสัญญาณข้างเคียงเพิ่มเข้ามาอีกสองช่องสัญญาณนั้น ตัวรับสัญญาณทางแสงต้องการระดับกำลังแสงโดยเฉลี่ยเพิ่มมากขึ้นเพื่อรักษาระดับ BER ให้มีค่าเท่าเดิมซึ่งเป็นค่าระดับ Power Penalty

สำหรับกรณีระยะช่องสัญญาณ 25 GHz และ 50 GHz ตัวรับสัญญาณทางแสงต้องการค่า Power Penalty เท่ากับ $-23 \text{ dBm} - (-25.2 \text{ dBm}) = 2.2 \text{ dB}$ และ $-24.8 \text{ dBm} - (-25.2 \text{ dBm}) = 0.4 \text{ dB}$ ทั้งนี้เป็นเพราะความต่างของระดับสัญญาณรบกวนจากช่องสัญญาณทางเคียงสำหรับกรณี 25 GHz และ 50 GHz ตามลำดับ ซึ่งได้กล่าวไปในส่วนของกรวัดสเปกตรัมมีค่า 8.43 dB และ 24.86 dB ตามลำดับ จะพบว่าสำหรับกรณี 25 GHz สัญญาณรบกวนจะรุนแรงมากกว่า ส่วนการลดระยะห่างช่องสัญญาณให้แคบลงจาก 50 GHz เป็น 25 GHz ต้องใช้ Power Penalty เพิ่มขึ้นเท่ากับ $(2.2 - 0.4) = 1.8 \text{ dB}$