

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาวิธีการเซลฟ์มิกซิงสำหรับการวัดอย่างละเอียด



นางสาวสุชาร์ตน์ อุนจรี  
นางสาวหทัยธร อุบลสมุท

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน **62287**  
วัน,เดือน,ปี - 8 ส.ค. 2549

b. 11616908  
i. ....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# **Self-Mixing Techniques for Measurement**



A Special Project Submitted in partial Fulfillment of the Requirement for  
the Degree of Bachelor of Science  
Department of Applied Physics  
Faculty of Science

**King Mongkut's Institute of Technology Lardkrabang**

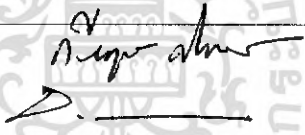
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ Academic Year 2005 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

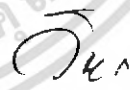
โครงการพิเศษเรื่อง การศึกษาวิธีการเซลฟี่กซิงสำหรับการวัดอย่างละเอียด

นักศึกษา นางสาวสุชารัตน์ อนุจารี  
นางสาวหทัยธร อุบลสมุท

ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์  
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม  
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. ปรีชา ยูพาพิน  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อ. สุรศักดิ์ พิพัฒน์ศาสตร์

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาตรี

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ อ.กฤษฎิ์ ศรีนวลจันทร์	
กรรมการ อ.ธรรมรัตน์ แต่งตั้ง	
กรรมการ อ.ภาณุจ บัณฑิตาวิทย์	
กรรมการที่ปรึกษา รศ.ดร.ปรีชา ยูพาพิน	
กรรมการที่ปรึกษาร่วม อ.สุรศักดิ์ พิพัฒน์ศาสตร์	

  
.....  
(รองศาสตราจารย์วิชาญ เตชิตธีระ)  
หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**หัวข้อโครงการพิเศษ** การศึกษาวิธีการเซลฟ์มิกซิงสำหรับการวัดอย่างละเอียด

**นักศึกษา** นางสาวสุชารัตน์ อนุจารี  
นางสาวหทัยธร อุบลสมุท

**ภาควิชา** ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะ วิทยาศาสตร์

**สาขาวิชา** ฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม

**ปีการศึกษา** 2548

**อาจารย์ที่ปรึกษา** รศ.ดร.ปรีชา อุพาพิน

**อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม** อ.สุรศักดิ์ พิพัฒน์ศาสตร์

### บทคัดย่อ

เทคนิคที่ใช้ในการตรวจดูรายละเอียดของสภาพพื้นผิวในปัจจุบันมีอยู่หลายรูปแบบด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็น AFM (Atomic Force Microscopy) SEM (Scanning Electron Microscope) เป็นต้น และยังมีอีก 1 วิธี ที่เป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับการตรวจดูสภาพรายละเอียดของพื้นผิวของวัตถุ นั่นคือ เทคนิคทางแสงที่เรียกว่า เทคนิคเซลฟ์มิกซิง (Self-Mixing Technique) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การย้อนกลับของแสงจากภายนอก (External Optical Feedback) โดยใช้เลเซอร์ เทคนิคการตรวจวัดลายละเอียดแบบนี้เป็นเทคนิคที่ใช้แสงมาเป็นองค์ประกอบหลักในการตรวจสอบพื้นผิวเป็นหลัก โดยใช้สัญญาณแสงที่ตกกระทบวัตถุเป็นตัวใช้วัดรายละเอียด โดยมีหลักการ คือ เมื่อปล่อยแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอดไปยังวัตถุทดสอบจากนั้นแสงจะสะท้อนกลับและรวมกับแสงภายในเลเซอร์ไดโอดก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังเอาต์พุทของแสง กำลังเอาต์พุทที่เปลี่ยนแปลงหรือสัญญาณจากการรวมกันของแสงนี้สามารถตรวจวัดได้ด้วยโฟโตไดโอดซึ่งอยู่ภายในเลเซอร์ไดโอดแล้วผ่านวงจรแปลงและขยายสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า ตัวแปรที่มีผลต่อระบบการวัดนี้ได้แก่ ระยะห่างระหว่างเลเซอร์และตัวสะท้อนภายนอก ลักษณะสมบัติของผิว ได้แก่ ความสามารถในการสะท้อนและลักษณะของพื้นผิว โลหะต่างๆ รวมถึงขนาดของลำแสงเลเซอร์ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Special Project Title</b>	Self-Mixing Technique for Measurement
<b>Name</b>	Miss.Sucharat Anujaree Miss.Hataitorn Ubonsamut
<b>Department</b>	Applied Physics Faculty of Science
<b>Program</b>	Applied Physics – Science and Industry Instrumentation
<b>Academic Year</b>	2005
<b>Special Project Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr.Precha Yupapin
<b>Special Project co-advisor</b>	Mr.Surasak Pipatsart

### ABSTRACT

In presence, there are many techniques to analyze the material surface such as AFM (Atomic Force Microscopy), SEM (Scanning Electron Microscope) etc. And there is one method that is very interesting to analyze the surface characterization based on an optical scheme known as self-mixing techniques or we can call it External Optical Feedback by using laser. This is techniques that to analyze the surface by using optical signal that reflects from an object to examine object's detail. The principal of the system is that the light from laser diode is lunched into a tested sample, then the reflected light is allowed to re-enter the laser cavity. It generates the variation of output power and laser oscillation condition. The variation of output power can be detected by its own photodiode and then converted and amplified to an electric signal by electronic circuit. The parameters that effect to the measurement system are the distance between laser and the external reflector, the reflectance and properties of metal surface and the size of laser beam.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ในเรื่อง การศึกษาวิธีการเซลล์ฟิสิกส์สำหรับการวัดอย่างละเอียด เล่มนี้ขึ้นสำเร็จเสร็จลงได้ เนื่องมาจากความกรุณาการให้ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อเรื่อง การให้คำปรึกษา และคำแนะนำต่างๆ มากมายในการดำเนินการทำงาน จากบุคคลหลายฝ่ายดังนี้

ขอขอบพระคุณ (อาจารย์) รศ.ดร. ปรีชา ยูพาพิณ อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ที่ให้ความรู้เพิ่มเติมอย่างมากในเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อนี้ สอนให้คำแนะนำกับข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น และเอื้อเพื่ออุปกรณ์ในการทำโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ สุรศักดิ์ พิพัฒน์ศาสตร์ อาจารย์ที่ร่วมปรึกษา ผู้ที่แนะนำการดำเนินงานและตรวจหาข้อบกพร่อง พร้อมทั้งแนะนำการแก้ไข สละเวลาสอนในส่วนเพิ่มเติมในส่วนที่เกี่ยวข้องกับโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์กิริยบุรุษ ศรีนวลจันทร์ ประธานกรรมการ ผู้ที่สละเวลาให้กับการตอบคำถามและอธิบายเพิ่มเติม

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการทุกท่าน ที่กรุณาตรวจทานรายงานโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณ นายกฤษฎา อุดมเวช เพื่อนที่ช่วยเหลือทุกอย่างกับการดำเนินงานในครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณประจักษ์ แซ่อึ้ง พี่ที่ห้องแลป Fiber optic ที่สละเวลาให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบคุณ คุณปรเมษฐ์ จันทร์เพ่ง พี่ที่ห้องแลป Fiber optic ที่สละเวลาให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบคุณ คุณณรงค์ สัจวาระ พี่ที่ห้องแลป Fiber optic ที่สละเวลาให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบคุณ คุณวุฒินันท์ สุวรรณเจริญ พี่ที่ห้องแลป Fiber optic ที่สละเวลาให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบคุณ คุณสุเมธ สุขพันธ์ุ ที่สละเวลาให้ความช่วยเหลือในหลายๆ ด้าน

ขอขอบคุณ คุณณรงค์ชัย ทองน้อย พี่ที่ห้องแลป Electronic ที่สละเวลาให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบคุณ เพื่อนๆทุกคนในภาคฟิสิกส์ประยุกต์ ผู้ที่มีน้ำใจและห่วงใยกันตลอดมา

และสุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้ซึ่งให้ความห่วงใยและกำลังใจตลอดเวลาของการทำโครงการพิเศษนี้

นางสาวสุชารัตน์ อนุจารี

นางสาวหทัยธร อุบลสมุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญรูป	ช
สารบัญตาราง	ฉ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>4</b>
2.1 ธรรมชาติของแสง	4
2.1.1 การแทรกสอดของแสง (Interference)	5
2.1.2 การเลี้ยวเบนของแสง (Diffraction)	8
2.1.3 โพลาริเซชัน (Polarization)	9
2.2 เลเซอร์	10
2.2.1 การเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น (Stimulated emission)	11
2.2.1 การเกิดประชากรผกผัน (Population Inversion)	15
2.2.3 ตัวสั่นพ้องเชิงทัศน (Optical Resonator)	17
2.3 ทฤษฎีเซลล์ฟิสิกส์	20
2.3.1 เงื่อนไขของเลเซอร์ออสซิลเลชันเมื่อมีแควิตีภายนอก	21
2.3.2 กำลังเอาต์พุตและความถี่ออสซิลเลชัน	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3	กำลังเอาท์พุทและความยาวแควิตีภายนอก	26
2.4	หน่วยวัด	31
บทที่ 3	ขั้นตอนการดำเนินงานและอุปกรณ์ในการดำเนินงาน	32
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงาน	31
3.2	รายละเอียดของอุปกรณ์ในการดำเนินงาน	32
3.2.1	แหล่งจ่ายกระแส (Power Supply)	33
3.2.2	เลเซอร์ไดโอด	33
3.2.3	อุปกรณ์เคลื่อนตำแหน่งแสงเลเซอร์ในระดับนาโน (Piezosystem 75732)	34
3.2.4	ชุดเคลื่อนตำแหน่งในระดับนาโน (Piezosystem jena)	34-35
3.2.5	วงจรขับกระแสและวงจรแปลงและวงจรมหาขยายสัญญาณ	37
3.2.6	ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)	39
3.2.7	วัสดุที่นำมาทำการทดลอง	39
3.2.8	ชุดรางเลื่อนไมโครมิเตอร์	39
3.3	ระบบการส่งงาน Piezosystem	40
3.4	ระบบการวางชิ้นทดสอบ	40
3.5	ระบบการวางเครื่องมือ	41
บทที่ 4	ผลการทดลองและการวิเคราะห์	43
4.1	ผลการทดสอบและการกำหนดเงื่อนไขของระบบการวัด	43
4.2	ค่าการทำงานของกระแส	43
4.3	ผลการสร้างกราฟจากการวัด	46
4.3.1	การสะท้อนกลับของแสงเข้าสู่โฟโตไดโอด ในลักษณะเลเซอร์ไดโอด อยู่กับที่และมีการเลื่อนวัตถุทดสอบในแนวแกน X	47
4.3.2	การวิเคราะห์ผลการทดลองการสะท้อนกลับของแสงเข้าสู่โฟโตไดโอด ในลักษณะเลเซอร์ไดโอดอยู่กับที่และมีการเลื่อนวัตถุทดสอบ ในแนวแกน X	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 การสะท้อนกลับของแสงเข้าสู่โฟโตไดโอด ในลักษณะเลเซอร์ไดโอด อยู่กับที่และมีการเลื่อนวัตถุทดสอบในแนวแกน Y	61
4.3.4 การวิเคราะห์ผลการทดลองการสะท้อนกลับของแสงเข้าสู่โฟโตไดโอด ในลักษณะเลเซอร์ไดโอดอยู่กับที่และมีการเลื่อนวัตถุทดสอบ ในแนวแกน Y	72
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	73
5.1 สรุปผล	73
5.2 ปัญหาที่พบ แนวทางการแก้ไขปัญหาและข้อเสนอแนะ	74
เอกสารอ้างอิง	76
ภาคผนวก	77



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า	
2.1	แสดงแถบสีต่างๆ ที่คนสามารถมองเห็นได้	4
2.2	แสดงการแทรกสอดของแสง	5
2.3	การแทรกสอดของคลื่นแสง 2 ลำที่ตกกระทบฉาก	6
2.4	การแทรกสอดภายในเลเซอร์แควิตีแบบฟาบรี-เพอร์โร (Fabry-Perot)	6-7
2.5	การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณการแทรกสอดภายในเลเซอร์แควิตีแบบฟาบรี-เพอร์โร	7
2.6	(ก) การเดินทางของคลื่นแสงผ่านช่องเปิด ไปยังฉากที่กั้นไว้ (ข) การเลี้ยวเบนของคลื่นแสงผ่านช่องเปิดเล็กๆ โดยใช้หลักทฤษฎีฮอยเกนส์	8
2.7	แสดงทิศทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	9
2.8	กระบวนการดูดกลืนแสงแบบถูกกระตุ้น	12
2.9	กระบวนการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง	13
2.10	กระบวนการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น	14
2.11	การกระจายแบบโบลท์ซมานของจำนวนอะตอมที่ระดับพลังงาน $E_1$ และ $E_2$ ที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน	15
2.12	การเกิดประชากรผกผัน	16
1.13	ตัวสั้นพ้องเชิงทัศนที่ประกอบด้วยกระจก 2 บาน $M_1$ และ $M_2$ มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน $R_1$ และ $R_2$ และมีรัศมีความโค้งเป็น $r_1$ และ $r_2$ ตามลำดับ	19
2.14	แบบจำลองแควิตีของเลเซอร์ไดโอดที่มีแควิตีภายนอก	20
2.15	แบบจำลองวงจรสมมูลของเลเซอร์ไดโอดเมื่อมีตัวสะท้อนภายนอก	22
2.16	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเอาต์พุตกับค่ากระแสขับ	24
2.17	ความสัมพันธ์ของกำลังเอาต์พุตและค่ากระแสขับที่มีค่าความยาวแควิตีภายนอกต่างกัน (ก) $L = 10 \text{ } \mu\text{l}$ และ (ข) $L = 50 \text{ } \mu\text{l}$	25
2.18	กำลังเอาต์พุตเป็นฟังก์ชันของความยาวแควิตีภายนอก	27
2.19	กำลังเอาต์พุตเป็นฟังก์ชันของความยาวแควิตีภายนอกสำหรับตำแหน่งของแควิตีภายนอกที่ต่างกัน (ก) $R = 0.248, L = 15\text{-}19 \text{ mm}$ และ (ข) $R = 0.248, L = 100\text{-}104 \text{ mm}$	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.20	ค่ากำลังเอาต์พุตเป็นฟังก์ชันของความยาวแควิตีภายนอกสำหรับ ค่าการสะท้อนกลับของแสงที่ต่างกัน (ก) $R = 0.0115$ , $L = 15-19$ mm และ (ข) $R = 0.387$ , $L = 15-19$ mm	29
2.21	แบบจำลองการเดินทางของแสงภายในแควิตีของเลเซอร์ไดโอดที่มีแควิตีภายนอก	30
3.1	(ก) และ (ข) แหล่งกำเนิดกระแส	33
3.2	เลเซอร์ไดโอด	33
3.3	(ก.)และ(ข.)Piezosystem	34
3.4	Piezosystem jena รุ่น ENT 40/20	34 - 35
3.5	Mode ที่ 1. Power supply ENT 40/20	35
3.6	Mode ที่ 2. ภาค Control หรือภาคขับ	36
3.7	Mode ที่ 3. ภาค Interred	36
3.8	วงจรขับกระแส	37
3.9	วงจรแปลงและวงจรรขยายสัญญาณ	38
3.10	ออสซิลอสโคป	39
3.11	แผ่นโลหะทดสอบ	39
3.12	ชุดกลางเลื่อนไมโครมิเตอร์	40
3.13	ก. ระบบป้อนค่าระยะกระจัด และ ข. ระบบ Set up เครื่อง Piezosystem	40
3.14	ก. ด้านข้างรางเลื่อน และ ข. ด้านหน้ารางเลื่อน	40
3.15	ระบบการวัดทางแสง	41
3.16	แผนผังระบบการวางเครื่องมือ	42
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขับเลเซอร์และค่ากำลังเอาต์พุตของเลเซอร์	46
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณสะท้อนกลับและที่ระยะการกระจัดทีละ 3 $\mu\text{m}$ ของผลเฉลี่ยของเหล็กผิวมันในแนวเลื่อนแกน X	56
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณสะท้อนกลับและที่ระยะการกระจัดทีละ 3 $\mu\text{m}$ ของผลเฉลี่ยของแผ่นทองแดงในแนวเลื่อนแกน X	56
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณสะท้อนกลับและที่ระยะการกระจัดทีละ 3 $\mu\text{m}$ ของผลเฉลี่ยของแผ่นสังกะสีในแนวเลื่อนแกน X	57
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณสะท้อนกลับและที่ระยะการกระจัดทีละ 3 $\mu\text{m}$ ของผลเฉลี่ยของแผ่นอลูมิเนียมในแนวเลื่อนแกน X	57

4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณสะท้อนกลับและที่ระยะการกระจัดทีละ 3 $\mu\text{m}$ ของผลเฉลี่ยของเหล็กผิวมัน แผ่นสังกะสี แผ่นทองแดง และแผ่นอะลูมิเนียม ในแนวเลื่อนแกน X	58
4.7	กราฟนอร์มัล โลจิส์ผลเฉลี่ยและสมการปรับเทียบสำหรับเหล็กผิวมัน ในแนวเลื่อนแกน X	58
4.8	กราฟนอร์มัล โลจิส์ผลเฉลี่ยและสมการปรับเทียบสำหรับแผ่นทองแดง ในแนวเลื่อนแกน X	59
4.9	กราฟนอร์มัล โลจิส์ผลเฉลี่ยและสมการปรับเทียบสำหรับแผ่นสังกะสี ในแนวเลื่อนแกน X	59
4.10	กราฟนอร์มัล โลจิส์ผลเฉลี่ยและสมการปรับเทียบสำหรับแผ่นอะลูมิเนียม ในแนวเลื่อนแกน X	60
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณสะท้อนกลับและที่ระยะการกระจัดทีละ 3 $\mu\text{m}$ ของผลเฉลี่ยของเหล็กผิวมัน ในแนวเลื่อนแกน Y	70
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณสะท้อนกลับและที่ระยะการกระจัดทีละ 3 $\mu\text{m}$ ของผลเฉลี่ยของแผ่นทองแดงในแนวเลื่อนแกน Y	70
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณสะท้อนกลับและที่ระยะการกระจัดทีละ 3 $\mu\text{m}$ ของผลเฉลี่ยของแผ่นสังกะสีในแนวเลื่อนแกน Y	71
4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณสะท้อนกลับและที่ระยะการกระจัดทีละ 3 $\mu\text{m}$ ของผลเฉลี่ยของแผ่นอะลูมิเนียมในแนวเลื่อนแกน Y	71

## สารบัญตาราง

	หน้า	
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสขั้วและค่ากำลังเอาต์พุตของเลเซอร์ ครั้งที่ 1	44
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสขั้วและค่ากำลังเอาต์พุตของเลเซอร์ ครั้งที่ 2	45
4.3	การสร้างกราฟเปรียบเทียบสำหรับเหล็กผิวมันในแนวเลื่อนแกน X	48
4.4	การสร้างกราฟเปรียบเทียบสำหรับแผ่นทองแดงในแนวเลื่อนแกน X	50
4.5	การสร้างกราฟเปรียบเทียบสำหรับแผ่นสังกะสีในแนวเลื่อนแกน X	52
4.6	การสร้างกราฟเปรียบเทียบสำหรับแผ่นอลูมิเนียมในแนวเลื่อนแกน X	54
4.7	การสร้างกราฟเปรียบเทียบสำหรับเหล็กผิวมันในแนวเลื่อนแกน Y	62
4.8	การสร้างกราฟเปรียบเทียบสำหรับแผ่นทองแดงในแนวเลื่อนแกน Y	64
4.9	การสร้างกราฟเปรียบเทียบสำหรับแผ่นสังกะสีในแนวเลื่อนแกน Y	66
4.10	การสร้างกราฟเปรียบเทียบสำหรับแผ่นอลูมิเนียมในแนวเลื่อนแกน Y	68

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

เทคโนโลยีการวัดอย่างละเอียดในปัจจุบันมีความก้าวหน้าขึ้นอย่างมาก ประสิทธิภาพของการวัดจึงเป็นสิ่งที่สำคัญ เพราะสิ่งที่นำมาทดสอบอาจมีขนาดเล็กมากหรือต้องการที่จะวัดระยะเวลาการกระจัดของวัตถุในระยะที่ละเอียดมาก ดังนั้นในการวัดสิ่งที่มีขนาดเล็กมากจึงต้องใช้ความละเอียดเป็นอย่างมากเพื่อให้ไม่เกิดความเสียหายและยังคงคุณภาพของชิ้นงานไว้ เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้จึงเป็นสิ่งที่สำคัญด้วย

เทคนิคทางแสงก็เป็นทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมสำหรับนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างระบบของการวัดอย่างละเอียดเพราะมีข้อดีคือ ไม่มีการสัมผัสกับชิ้นงานซึ่งไม่ทำให้เกิดความเสียหายขึ้น แต่ในระบบวัดทางแสงมีการจัดวางอุปกรณ์ค่อนข้างยุ่งยาก เทคนิคเซลล์ฟิมิกซิง (Self-Mixing Technique) หรือเทคนิคการย้อนกลับของแสง (Optical Feedback) จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ถูกเลือกเพราะอุปกรณ์ที่ใช้มีขนาดกะทัดรัดและใช้งานง่าย เนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ทางแสงภายนอกอื่นๆ เช่น ผลึกแบคคูลาแสง กระจกอ้างอิงหรือแม้แต่ตัวดีเทคเตอร์ภายนอก แต่ใช้เพียงชุดของเลเซอร์ไดโอดซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์และมีโฟโตไดโอดอยู่ภายในทำหน้าที่เป็นตัวรับแสงที่สะท้อนกลับมา โดยความเข้มแสงที่สะท้อนกลับมาจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับวัตถุที่นำมาทดสอบ ว่ามีลักษณะของพื้นผิวเป็นอย่างไร รวมถึงตัวแปรที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งก็คือ ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดเลเซอร์กับพื้นผิววัตถุที่วางไว้ในระยะใกล้กัน โดยเมื่อปล่อยแสงจากเลเซอร์ไดโอดไปยังตัวสะท้อนภายนอกแล้วสะท้อนกลับจากวัตถุที่ต้องการวัดกลับเข้ามายังแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอดตัวเดิมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังเอาท์พุทของแสง

แสงที่สะท้อนจากชิ้นงานแม้จะมีพื้นผิวที่เรียบหรือขรุขระแต่การสะท้อนก็ยังคงสะท้อนกลับมา ถึงแม้จะเกิดการหักเหของแสงไปบ้าง โดยในระยะทางที่สะท้อนกลับมายังตัวดีเทคเตอร์นี้เป็นระยะทางที่กำลังแสงสะท้อนกลับมาจะมีค่าความเข้มแสงมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับผิวของวัตถุด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีทางแสงและเทคนิคเซลล์ฟิมิกซ์
- 1.2.2 เพื่อศึกษาและทดลองวิธีการของหลักการทางแสงแบบเซลล์ฟิมิกซ์ในระยะกระจัดช่วงไมโครเมตร
- 1.2.3 เพื่อศึกษาและทดลองวิธีการ ในการวัดอย่างละเอียดในระดับไมโครเมตร
- 1.2.4 สามารถนำเอาคุณสมบัติของเทคนิคเซลล์ฟิมิกซ์ที่ได้ทำการศึกษาไปใช้ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาอุปกรณ์ในส่วนของการทำงานของเครื่องที่จะนำไปใช้ในเรื่องของการวัดทางแสง โดยทำการทดลองการวัดในระยะการกระจัดที่มีความละเอียด และสามารถทราบถึงค่าของการสะท้อนกลับของแสงจากการวัด โดยค่าของระยะการกระจัดที่ได้จะอยู่ในระดับไมโครเมตร ทำการบันทึกผลการทดลองของค่าที่ได้จากการวัดและทำการเปรียบเทียบตามมาตรฐานของการวัดที่มีความเป็นไปได้ทางด้านการคำนวณที่ควรจะมีค่าใกล้เคียงกัน

## 1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

กิจกรรม	มีย.- สค.48	กย.- คค.48	พย.- ธค.48	มค.- กพ.49	มีค.- เมย.49
1. ศึกษาทฤษฎี	↔				
2. ศึกษาเครื่องมือวัด	↔	↔			
3. ทำการทดลองวัดและบันทึกผลการทดลอง			↔	↔	
4. สรุปผลการทดลอง				↔	↔

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทราบถึงการทำงานของเครื่องมือที่ทำการศึกษาได้อย่างดีและสามารถทำการปฏิบัติการใช้ได้อย่างคล่องแคล่ว
- 1.5.2 สามารถทราบถึงหลักการทำงานของเทคนิคทางแสงที่เรียกว่า เทคนิคเซลฟ์มิกซิง (Self – Mixing)
- 1.5.3 ทำการทดลองกับวัตถุได้จริงในระยะเวลาที่ละเอียดและสามารถวัดค่ากำลังของแสงออกมาได้
- 1.5.4 สามารถวิเคราะห์การวัดอย่างละเอียดได้ด้วยหลักการเซลฟ์มิกซิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

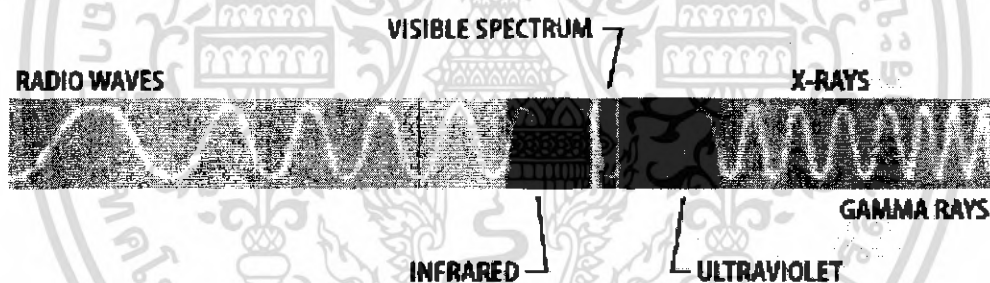
## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แสง (Lighting)

แสงเป็นพลังงานที่ทำให้เกิดการมองเห็น ในทางฟิสิกส์ถือว่าแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว ประมาณ 300,000 กม./วินาที มีคุณสมบัติในการกระจายพลังงานออกมาที่ความยาวคลื่นต่างๆ กัน แหล่งกำเนิดแสงธรรมชาติ ที่รู้จักกันดีคือดวงอาทิตย์ซึ่งให้พลังงานออกมาที่ความยาวคลื่นต่างๆ กว้างมากตั้งแต่รังสีคอสมิกจนถึงคลื่นวิทยุ

แต่แถบพลังงานที่มีอิทธิพลต่อตาคนเราและทำให้เกิดการมองเห็นเป็นเพียงช่วงแคบๆ ระหว่าง 380 - 780 นาโนเมตร เราเรียกช่วงของการกระจายนี้ว่า Visible spectrum ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงแถบสีต่างๆ ที่คนสามารถมองเห็นได้

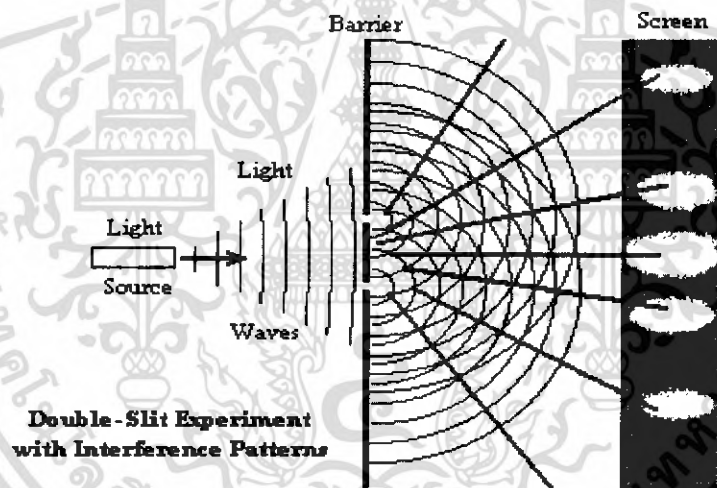
ในขณะเดียวกันมีนักวิทยาศาสตร์ทำการทดลองว่าด้วยเรื่องของแสงและทำการทดลองทางวิทยาศาสตร์เกี่ยวกับแสงที่สำคัญ 2 ทฤษฎี ทฤษฎีแรกเป็นการพิจารณาที่ว่าแสงเป็นอนุภาคโดยนิวตัน ทฤษฎีที่สองเป็นการพิจารณาว่าแสงเป็นคลื่นโดยฮิวกส์และฮอยเกนส์ ได้ทำการเสนอไว้

จากทฤษฎีทั้งสองซึ่งต่างก็เป็นที่ยอมรับสามารถนำมาอธิบายปรากฏการณ์ทางกายภาพอันได้แก่ การสะท้อน การหักเห การเลี้ยวเบน และการแทรกสอดได้

## ปรากฏการณ์ต่างๆของแสง มีดังนี้

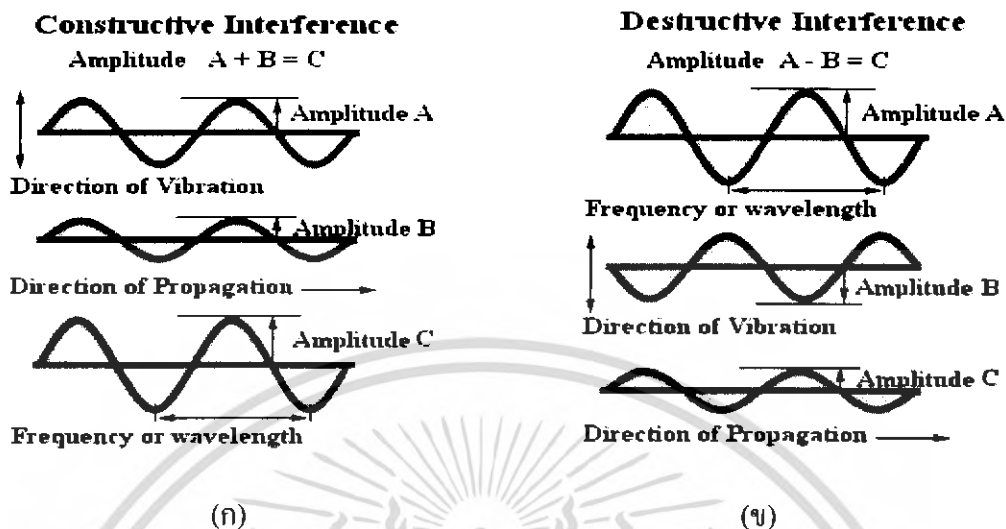
### 2.1.1 การแทรกสอดของแสง (Interference)

แสงจากแหล่งกำเนิดแสงตกลงบนฉากที่ช่องแคบๆ single slit แสงที่ผ่านช่องแคบๆ นี้จะตกลงบนฉากอีกฉากหนึ่งที่ช่องแคบๆ 2 ช่องอยู่คู่กันและช่องแคบทั้งสองนี้จะทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงโคฮีเรนต์ 2 แหล่ง เนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงแหล่งเดียวกันจึงมีเฟสที่สัมพันธ์กันคงที่ แสงจากช่องแคบทั้งสองจะเกิดการแทรกสอดกันเห็นเป็นแถบมืดและแถบสว่างบนฉาก เมื่อแสงเดินทางถึงจุดบนฉากแล้วเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันก็จะปรากฏแถบสว่างบนฉาก ถ้าแสงเดินทางถึงจุดบนฉากแล้วเกิดการแทรกสอดแบบหักล้างกันก็จะปรากฏแถบมืดบนฉาก การเกิดการแทรกสอดของแสงจากช่องคู่ได้เป็นครั้งแรกโดยยังก์ ( Thomas Young ค.ศ. 1773-1829 ) ดังแสดงรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงการแทรกสอดของแสง

ซึ่งการแทรกสอดของคลื่นแสงที่ตกกระทบบนฉากมีเฟสตรงกันจะทำให้เกิดการรวมกันของคลื่นซึ่งจะทำให้เกิดแถบสว่าง ทำให้มีแอมพลิจูดสูงขึ้นแต่ถ้ามีเฟสต่างกันจะทำให้เกิดการหักล้างกันของคลื่นซึ่งจะทำให้เกิดแถบมืดบนฉากและแอมพลิจูดก็มีค่าลดลงด้วย ดังรูปที่ 2.3



**รูปที่ 2.3** การแทรกสอดของคลื่นแสง 2 ลำที่ตกกระทบฉาก

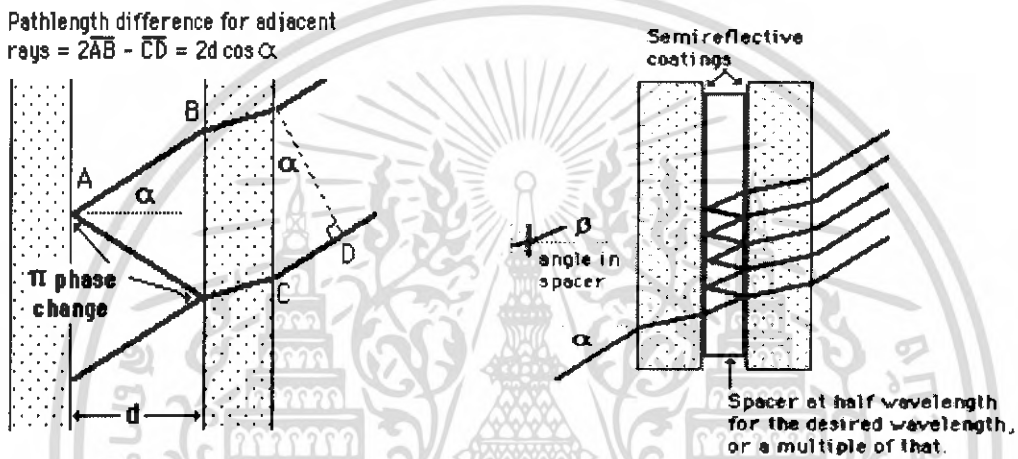
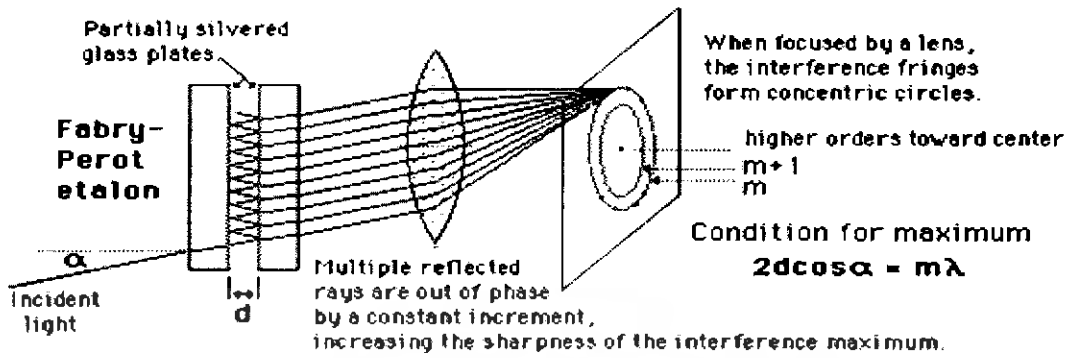
(ก) มีเฟสตรงกัน

(ข) มีเฟสต่างกัน

เครื่องมือที่ใช้ประโยชน์จากการแทรกสอดของแสงและจากภาพการแทรกสอด เรียกว่า อินเตอร์ฟีโรมิเตอร์ (Interferometer)

ในการทดลองของยังก์ เมื่อแสงตกบนฉากที่มีช่องแคบๆ 2 ช่อง ถ้าแสงเดินทางผ่านช่องทั้งสองออกมาเป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 2.2 แสงจากช่องแคบทั้งสองจะไม่ซ้อนทับกันและจะไม่เกิดการแทรกสอด แต่ในความเป็นจริงแล้วการแทรกสอดเกิดขึ้นได้แสดงว่าแสงมีการบานออก ซึ่งสอดคล้องกับหลักการของฮอยเกนส์

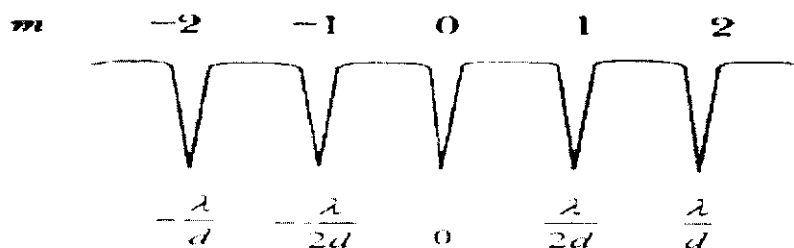
การแทรกสอดของแสงที่เกิดจากการสะท้อนกลับและแสงเลเซอร์โคโอดซึ่งแสงทั้งสองส่วนนี้จะมีการเคลื่อนที่ไปในตัวกลางเป็นระยะทางต่างๆ กัน จากนั้นก็จะกลับมาพบกันและแทรกสอดกันภายในเลเซอร์แควิตีแบบฟาบริ-เพอร์โร (Fabry-Perot) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณของแสงซึ่งสัญญาณการเปลี่ยนแปลงนี้สามารถวัดได้จากโฟโตโคโอดภายในเลเซอร์โคโอด



รูปที่ 2.4 การแทรกสอดภายในเลเซอร์แควิตีแบบฟาบรี-เพอร์โร (Fabry-Perot)

จากรูปที่ 2.4 แสงเลเซอร์จากแหล่งกำเนิดให้แสงออกมาทำมุม  $\alpha$  ลำแสงนี้จะทำให้เกิดการสะท้อนหลายครั้ง และเมื่อแสงที่หักเหผ่านออกไปตกกระทบบนพื้นผิววัตถุแสงจะสะท้อนกลับมาภายในเลเซอร์แควิตีจะทำให้เกิดการแทรกสอดภายในเลเซอร์แควิตีแบบฟาบรี-เพอร์โร ลักษณะของการแทรกสอดที่เกิดขึ้นสามารถหาได้จากสมการที่ (ก.) และการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณการแทรกสอดภายในเลเซอร์แควิตีแบบฟาบรี-เพอร์โร นี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5

$$2d \cos \alpha = m \lambda \tag{ก.}$$



รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณการแทรกสอดภายในเลเซอร์แควิตีแบบฟาบรี-เพอร์โร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ผ่านการอนุมัติจากเจ้าของเอกสาร กรุณาแจ้งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

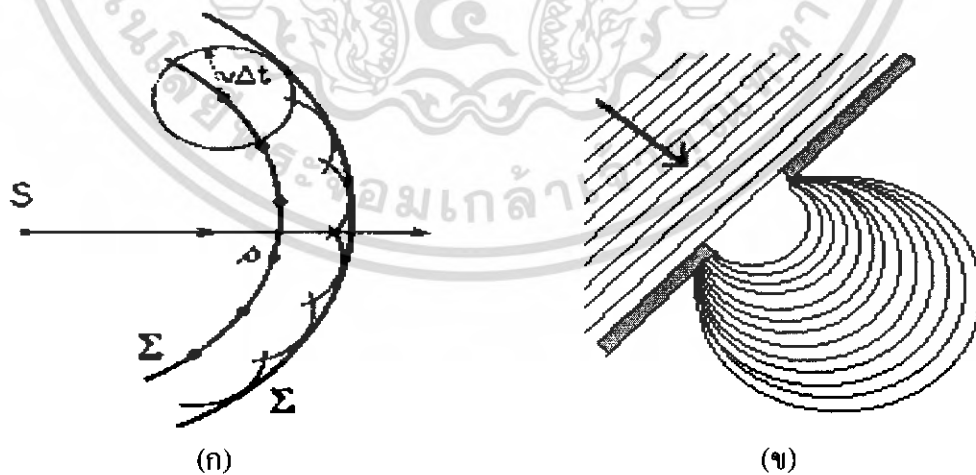
ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณการแทรกสอดภายในเลเซอร์แควิตี้แบบฟาบรี-เพอร์โร จะเกิดได้ทั้งสนามใกล้และสนามไกล และยังเกิดจากปัจจัยอื่นๆ อีก เช่น ค่ากำลังเอาต์พุทของเลเซอร์ ระยะห่างระหว่างพื้นผิวการสะท้อนหรือความยาวแควิตี้ภายนอก และลักษณะของพื้นผิวการสะท้อนซึ่งมีค่าการสะท้อนต่างๆ กัน ซึ่งจะพบว่าซึ่งจะเกิดการจมลงของสัญญาณเป็นระยะ โดยมีความสัมพันธ์กับปัจจัยต่างๆ

### 2.1.2 การเลี้ยวเบนของแสง (Diffraction)

การเลี้ยวเบน (Diffraction) เกิดจาก คลื่น เคลื่อนที่ ไป พบ สิ่งกีดขวาง ทำให้ คลื่น ส่วนหนึ่ง อ้อมบริเวณของสิ่งกีดขวางแผ่ไปทางด้านหลังของสิ่งกีดขวางนั้น

การเลี้ยวเบนของแสงนั้นสามารถใช้หลักทฤษฎีของฮอยเกนส์ที่ว่า ถ้าพิจารณาการเดินทางของคลื่นแสงผ่านช่องเปิด (Original plane wave front) ไปยังฉากที่กั้นไว้ แต่ละจุดบนหน้าคลื่นซึ่งในที่นี้จะหมายถึงจุดบนคลื่นแสงที่มีเฟสตรงกัน จะทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดลูกคลื่นทุติยภูมิโดยลูกคลื่นจะกระจายออกไปจากแต่ละจุด หลังจากผ่านเวลาไปชั่วครู่หน้าคลื่นใหม่จะเป็นผิวที่สัมผัสกับลูกคลื่นแต่ละลูก ดังรูปที่ 2.6 (ก)

พิจารณาหน้าคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง (Incident light) ที่เป็นจุดจะเป็นทรงกลม การกระจายแสงผ่านช่องเปิดจะพบว่ายิ่งช่องเปิดเล็กเท่าไรจะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนมากขึ้นซึ่งจะส่งผลให้แสงกระจายออกกว้างมากขึ้นดังรูปที่ 2.6 (ข)



รูปที่ 2.6 (ก) การเดินทางของคลื่นแสงผ่านช่องเปิด ไปยังฉากที่กั้นไว้

(ข) การเลี้ยวเบนของคลื่นแสงผ่านช่องเปิดเล็กๆ โดยใช้หลักทฤษฎีฮอยเกนส์

### 2.1.3. โพลาไรเซชัน (Polarization)

แสงที่เป็นคลื่นระนาบ และมีทิศของสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงหรือสั่นในแนววงที่แนวหนึ่ง เรียกว่า เป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นหรือเรียกว่า มีสมบัติโพลาไรซ์เชิงเส้น (Linearly polarized light) สมบัติทางโพลาไรซ์เชิงเส้นของแสงมีความเกี่ยวข้องกันอย่างมากกับการเป็นคลื่นตามขวาง (Transverse wave) กล่าวคือแนวการของสั่นของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีทิศตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของคลื่น จึงอาจกล่าวได้ว่าโพลาไรเซชันของแสงเป็นการพิสูจน์ว่าแสงเป็นคลื่นตามขวาง

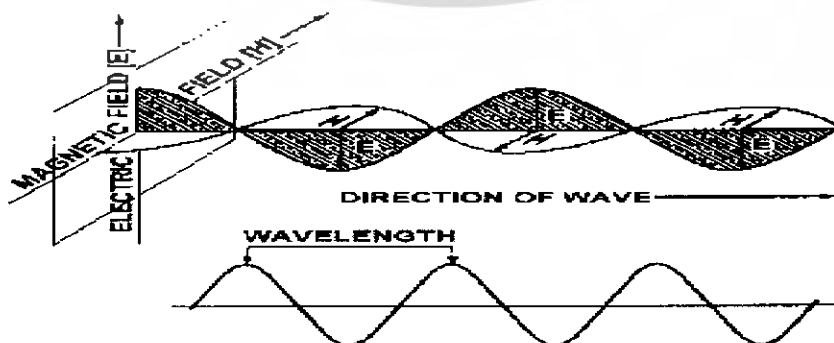
จากปรากฏการณ์การแทรกสอดและการเลี้ยวเบนของคลื่นแสงนั้นอธิบายได้ว่า แสงเป็นคลื่น ซึ่งการพิจารณาการโพลาไรซ์ของแสงสามารถที่จะบอกได้ว่าคลื่นแสงเป็นคลื่นตามขวาง (Transverse Wave) เนื่องจากทิศทางการสั่นของคลื่นแสงมีทิศตั้งฉากกับทิศของการเคลื่อนที่ของแสง โดยในปี ค.ศ. 1864 แมกเวลล์ (Jame Clerk Maxwell) ได้รวบรวมผลงานศึกษาเรื่องแม่เหล็กไฟฟ้าและแสดงให้เห็นว่า แสงเป็นคลื่นขวาง (Transverse Electromagnetic Wave) โดยมีความเร็วในสุญญากาศ คือ

$$C = \left[ \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\mu_0$  คือ ค่ายอมรับได้ทางแม่เหล็กในสุญญากาศ (Permeability)

$\epsilon_0$  คือ ค่ายอมรับได้ทางไฟฟ้าในสุญญากาศ (Permittivity)

จากสมการของ แมกเวลล์ เป็นที่ยอมรับกันว่าแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยมีทิศทางของสนามแม่เหล็ก (Magnetic field direction) และทิศทางของสนามไฟฟ้า (Electric field direction) ตั้งฉากซึ่งกันและกันและตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ (Direction of propagation) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงทิศทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่กล่าวข้างต้นว่า คลื่นแสงซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแบ่งสเปกตรัมของแสงออกได้หลายชนิด ( Type of radiation ) ซึ่งในแต่ละชนิดจะแบ่งตามความยาวคลื่น ( Wavelength ) ความถี่ ( Frequency ) หรือพลังงาน ( Quantum energy ) โดยจะมีความสัมพันธ์ของอัตราเร็วของคลื่นแสงระหว่างความถี่  $\nu$  และความยาวคลื่น  $\lambda$  ดังสมการที่ 2.2

$$c = \nu\lambda = 2.9979 \times 10^8 \text{ m/s ในสุญญากาศ} \quad (2.2)$$

กรณีที่อยู่ในตัวกลาง อัตราเร็วของคลื่นแสง  $c$  จะกลายเป็น  $c'$

$$\frac{c}{c'} = \frac{\lambda}{\lambda'} = n \quad (2.3)$$

เมื่อ	$n$	คือ	ค่าดัชนีหักเห
	$\lambda'$	คือ	ค่าความยาวคลื่นในตัวกลาง
	$c'$	คือ	อัตราเร็วของคลื่นแสงในตัวกลาง

แสดงว่าที่ระหว่างรอยต่อของตัวกลางทั้งสองเกิดการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่น ทำให้เกิดปรากฏการณ์หักเห การเข้าใจธรรมชาติของแสงไม่สามารถใช้ทฤษฎีของคลื่นแสงอธิบายกลไกการเกิดแสงเลเซอร์ได้ ดังนั้นในหัวข้อต่อไปจะได้ศึกษาหลักการเกิดแสงเลเซอร์และการประยุกต์ใช้งาน

## 2.2 เลเซอร์ (LASER)

### หลักการเกิดแสงเลเซอร์ทั่วไป

คำว่า “เลเซอร์” เป็นคำทับศัพท์จากภาษาอังกฤษ คือ ‘LASER’ ซึ่งเป็นคำย่อของ “Light Amplification by Stimulate Emission of Radiation” จึงหมายถึง การแผ่รังสีของการเปล่งแสงแบบถูกเร้าด้วยการขยายสัญญาณแสง กลไกพื้นฐานของเลเซอร์จึงได้แก่ การเปล่งแสงแบบถูกเร้า และการขยายสัญญาณแสง กลไกทั้งสองนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้เลเซอร์มีคุณสมบัติพิเศษ คือ คุณสมบัติโคฮีเร้นท์ของแสงเลเซอร์ แสงเลเซอร์เกิดขึ้นจากการเปล่งแสงถูกเร้าโฟตอนจึงมีความเป็นระเบียบสูง คลื่นแสงมีลักษณะที่พร้อมเพรียงกัน และเมื่อมีการขยายสัญญาณแสงด้วยแควิตี้แสง โฟตอนจึงมีจำนวนมาก หรือแสงมีความเข้มสูง และวิ่งในทิศทางที่แน่นอน คือตั้งฉากกับกระจกที่ใช้ทำเป็นแควิตี้เท่านั้น จึงมีลักษณะเป็นลำแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นแสงเลเซอร์จึงมีคุณสมบัติเด่นหลัก ๆ ๔ ประการ คือ

๑. เป็นแสงสีเดียว (มีค่าความยาวคลื่นเดียว)
๒. มีเฟสเดียวกัน (มีหน้าคลื่น)
๓. มีทิศทางแน่นอน (เป็นลำแสง)
๔. มีความเข้มสูง (จำนวนโฟตอนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่สูง)

โดยสารที่จะนำมาใช้เป็นตัวกลางเลเซอร์จะต้องมีคุณสมบัติพิเศษที่สามารถทำให้เกิดประชากรผกผัน (Population Inversion) ขึ้นภายในเนื้อสารและสามารถทำให้เกิดขบวนการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอะตอมหรือโมเลกุลด้วยการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นได้ ซึ่งเลเซอร์ชนิดต่างๆที่ถูกสร้างขึ้นมาจะอาศัยหลักการพื้นฐานที่เหมือนกันดังนี้คือ

1. การเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น (Stimulate Emission)
2. การเกิดประชากรผกผัน (Population Inversion)
3. ตัวสั่นพ้องเชิงทัศน (Optical Resonation)

### 2.2.1) การเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น (Stimulated emission)

ระบบอะตอมหรือโมเลกุลที่ใช้ทำเลเซอร์จะมีชั้นพลังงานต่างๆ อยู่ โดยที่ชั้นพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการเกิดแสงเลเซอร์อยู่ 2 ชั้นพลังงาน โดยระดับพลังงานที่ต่ำสุดที่อิเล็กตรอนอยู่ได้อย่างเสถียรเรียกว่า สถานะพื้น ( Ground State ) และระดับชั้นพลังงานที่สูงกว่านี้ขึ้นไปอีกเรียกว่า สถานะกระตุ้น ( Excited State ) อิเล็กตรอนจะเปลี่ยนระดับพลังงานจากระดับพลังงานที่ต่ำกว่าไปสู่ระดับพลังงานที่สูงกว่าได้ เมื่อมีการดูดกลืนพลังงานหรืออิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานจากระดับพลังงานที่สูงกว่าไปสู่ระดับพลังงานที่ต่ำกว่าซึ่งจะมีการคายพลังงานออกมาในรูปของโฟตอน ค่าต่างของระดับพลังงานจะสัมพันธ์กับค่าความถี่ของแสงที่ถูกดูดกลืนหรือปลดปล่อยจะมีค่าดังสมการ

$$\Delta E = h\nu \quad (2.4)$$

เมื่อ  $\Delta E = E_2 - E_1$  คือ ค่าผลต่างของระดับพลังงานสุดท้ายกับระดับพลังงานเริ่มต้น (J)

$\nu$  คือ ความถี่ของแสงที่ถูกดูดกลืนหรือคายออกมา (Hz)

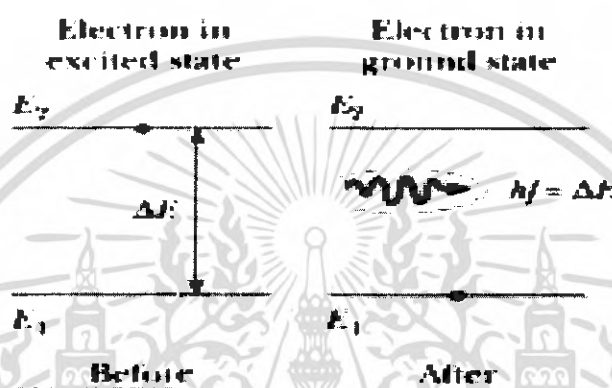
$h$  คือ ค่าคงที่ของพลังค์มีค่าเท่ากับ  $6.626 \times 10^{-34}$  J.s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานอิเล็กตรอนอธิบายได้จากปรากฏการณ์กรณีทางแสงดังนี้

### 2.2.1.1) การดูดกลืนแสงแบบถูกกระตุ้น (Stimulated Absorption)

ในสภาวะปกติอิเล็กตรอนจะอยู่ที่ระดับพลังงานที่ต่ำที่สุด ( $E_1$ ) แต่ถ้ามีโฟตอนที่มีค่าความถี่ที่เหมาะสมมากระตุ้น ( $E_2 - E_1 = h\nu$ ) อิเล็กตรอนก็จะดูดกลืนพลังงานของโฟตอนนั้นแล้วเปลี่ยนสถานะไปยังระดับพลังงานที่สูงกว่า ( $E_2$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กระบวนการดูดกลืนแสงแบบถูกกระตุ้น

จากรูปที่ 2.8 ตามปกติแล้วระดับอิเล็กตรอนจะอยู่ที่ระดับพลังงานต่ำสุด (สถานะพื้น) แต่มีโฟตอนที่มีค่าเหมาะสมมากระตุ้นอิเล็กตรอนก็จะดูดกลืนพลังงานโฟตอนนั้นแล้วเปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้น ( $E_1$ ) ไปยังระดับพลังงานที่สูงกว่าคือ ( $E_2$ ) จึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการดูดกลืนแสงแบบถูกกระตุ้น (Stimulated Absorption)

อัตราการเกิดการดูดกลืนแสงแบบถูกกระตุ้น (Stimulated Absorption Rate) จะแปรผันกับจำนวนอิเล็กตรอนที่สถานะพื้น ( $E_1$ ) ซึ่งมีค่าเป็น  $N_1$  และความหนาแน่นของพลังงานของโฟตอนที่เข้ามากระตุ้น  $\rho(\nu_{12})$  ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.5

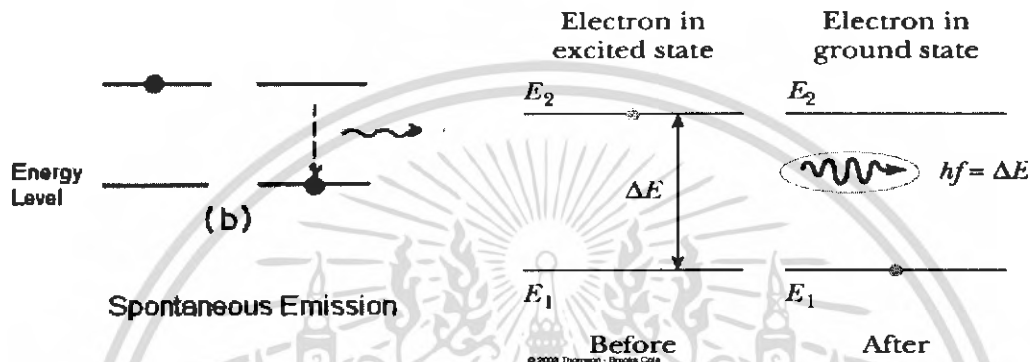
$$\text{อัตราการดูดกลืนแสงแบบถูกกระตุ้น} = B_{12}N_1\rho(\nu_{12}) \quad (2.5)$$

เมื่อ	$B_{12}$	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Stimulated Absorption Coefficient)
	$N_1$	คือ	จำนวนอิเล็กตรอนที่ระดับพลังงาน $E_1$
	$\rho(\nu_{12})$	คือ	ความหนาแน่นของพลังงานของโฟตอน (Photon Energy Density)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1.2) การเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง (Spontaneous Emission)

อิเล็กตรอนซึ่งอยู่ในสถานะกระตุ้น ( $E_2$ ) จะสามารถอยู่ในสถานะนี้ได้เพียงช่วงระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าช่วงชีวิต (Life Time) เท่านั้น เมื่อหมดช่วงชีวิตแล้วก็จะตกลงมายังสถานะพื้น ( $E_1$ ) เองโดยจะปลดปล่อยโฟตอนออกมาดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กระบวนการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง

จากรูปที่ 2.9 อะตอมซึ่งอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น ( $E_2$ ) จะสามารถอยู่ในสถานะนี้ได้เพียงช่วงระยะเวลาหนึ่งซึ่งมีค่าเท่ากับช่วงชีวิตเท่านั้น เมื่อหมดช่วงชีวิตแล้วก็จะตกลงมายังสถานะพื้น ( $E_1$ ) เอง โดยจะคายพลังงานออกมาในรูปโฟตอน การเปล่งแสงแบบนี้จะเกิดขึ้นได้เองซึ่งอัตราการเกิดการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเองนี้จะแปรผันกับจำนวนอิเล็กตรอน  $N_2$  ที่ชั้นพลังงาน  $E_2$  เท่านั้นดังนั้น

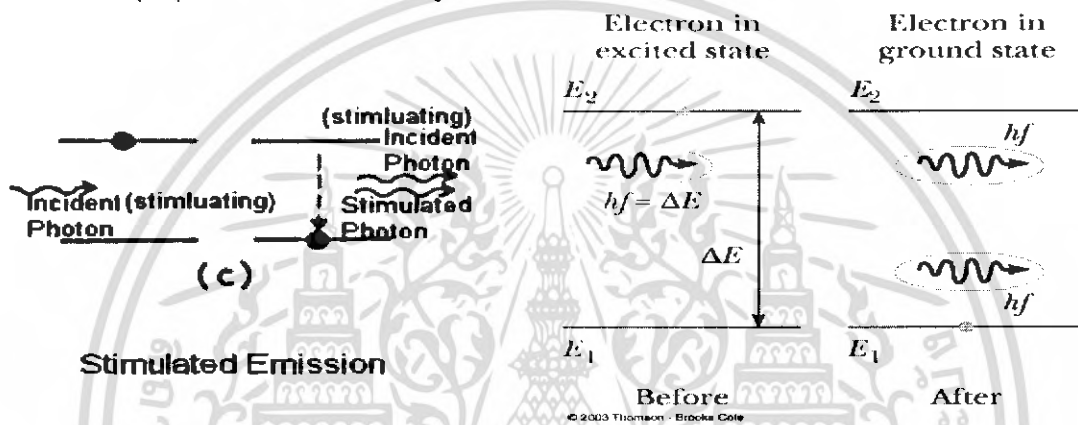
$$\text{อัตราการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง} = A_{12}N_2 \quad (2.6)$$

เมื่อ  $A_{12}$  คือ สัมประสิทธิ์การเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง  
(Spontaneous Emission Coefficient)

$N_2$  คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่ระดับพลังงาน  $E_2$

### 2.2.1.3) การเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น (Stimulated Emission)

ในกรณีที่อิเล็กตรอนอยู่ในสถานะกระตุ้น ( $E_2$ ) ยังไม่ถึงเวลาที่อิเล็กตรอนตกลงสู่สถานะพื้น ( $E_1$ ) แต่มีโฟตอนซึ่งมีค่าพลังงานเท่ากับผลต่างของระดับพลังงานในสถานะกระตุ้นและสถานะพื้นเข้ามา จะทำให้อิเล็กตรอนที่สถานะกระตุ้น ( $E_2$ ) ตกลงมายังสถานะพื้น ( $E_1$ ) และปลดปล่อยโฟตอนออกมาอย่างทันทีทันใด โดยโฟตอนที่ปลดปล่อยออกมานี้จะมีความถี่และเฟสที่เหมือนกับโฟตอนที่เข้ามากระตุ้นทุกประการ ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กระบวนการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น

จากรูปที่ 2.10 การเปล่งแสงแบบนี้จะเรียกว่าการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น ถ้าโฟตอนที่ฉายเข้ามาในระบบมีความหนาแน่นของพลังงาน  $\rho(\nu_{12})$  อัตราการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นจะแปรผันกับจำนวนอิเล็กตรอนใน  $N_2$  ชั้นพลังงาน  $E_2$  และ ความหนาแน่นของพลังงานของโฟตอนที่เข้ามากระตุ้น  $\rho(\nu_{12})$  ดังนั้นอัตราการเกิดการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นจะเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$\text{อัตราการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น} = B_{21}N_2\rho(\nu_{12}) \quad (2.7)$$

โดย  $B_{21}$  คือ สัมประสิทธิ์การเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น  
(Spontaneous Emission Coefficient)

และ  $B_{21}$  คือ  $B_{12}$

การเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น เป็นหลักการอย่างหนึ่งที่ทำให้แสงเลเซอร์มีเฟสเดียวกัน มีค่าความถี่เดียวและยังเป็นที่มาของคำว่า Light Amplification ซึ่งก็คือการขยายแสง เนื่องจากว่าโฟตอนที่เข้าไปกระตุ้น 1 ตัว จะทำให้ได้โฟตอนเพิ่มขึ้นมาอีก 1 ตัวเป็น 2 ตัว ซึ่งก็คือ เกิดการขยายแสงนั่นเอง การเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นนี้จะ เป็นพื้นฐานที่สำคัญประการหนึ่งในการเกิดแสงเลเซอร์ทุกชนิด

ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน อัตราการดูดกลืนแสงและอัตราการเปล่งแสงจะสมดุลกัน ดังนั้นจำนวน  $N_1 + N_2$  ก็จะมีค่าคงที่ซึ่งจะได้ว่า

อัตราการดูดกลืนแสง = อัตราการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง + อัตราการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น  
จากสมการที่ (2.5) , (2.6) และ (2.7) จะได้ว่า

$$B_{12}N_1\rho(\nu_{12}) = A_{12}N_2 + B_{21}N_2\rho(\nu_{12}) \quad (2.8)$$

เรียกค่าสัมประสิทธิ์  $B_{12}$ ,  $A_{21}$  และ  $B_{21}$  ว่าเป็นสัมประสิทธิ์ของไอน์สไตน์ (Einstein Coefficients)

### 2.2.2) การเกิดประชากรผกผัน (Population Inversion)

เมื่อพิจารณาระบบที่มีพลังงานเพียง 2 ระดับพลังงาน คือ  $E_1$  และ  $E_2$  (โดย  $E_2 > E_1$ ) และแต่ละระดับพลังงานมีจำนวนอะตอมเป็น  $N_1$  และ  $N_2$  ตามลำดับ ที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน สัดส่วนของจำนวนอะตอมแต่ละระดับพลังงาน จะ เป็นไปตามหลักการกระจายแบบโบลท์ซมาน (Boltzmann Distribution) ดังสมการที่ (2.9)

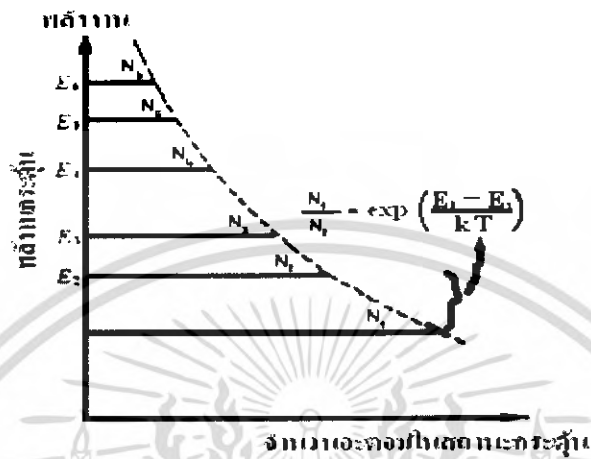
$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-(E_2-E_1)/kT} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $k$  คือ ค่าคงที่ของโบลท์ซมานมีค่าเท่ากับ  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K  
 $T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

ความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.9) เมื่อนำมาเขียนกราฟจะได้ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนว่าในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน ที่ระดับพลังงานต่ำ  $E_1$  จะมีจำนวนมากกว่าที่ระดับพลังงาน

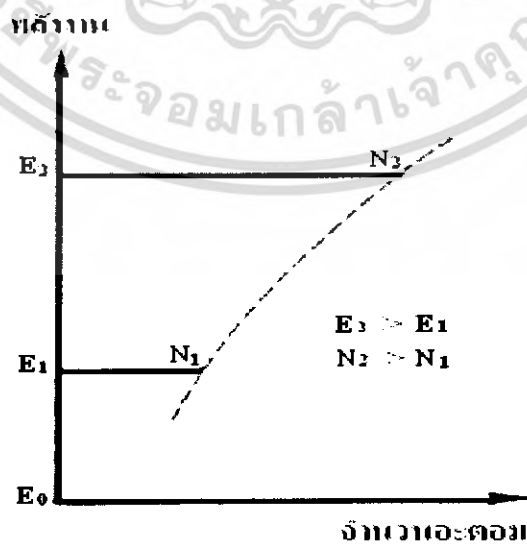
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูง  $E_2$  ( $N_1 > N_2$ ) ดังนั้นถ้าฉายโฟตอนเข้าไปในระบบซึ่งเป็นการรบกวนระบบก็จะทำให้เกิดการดูดกลืนแสงมากกว่าที่จะเกิดการเปล่งแสง



**รูปที่ 2.11** การกระจายแบบโบลท์ซมานของจำนวนอะตอมที่ระดับพลังงาน  $E_1$  และ  $E_2$  ที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน

แต่ถ้าทำการรบกวนระบบโดยการฉายโฟตอนเข้าไปในระบบ จนกระทั่งทำให้ระบบเกิดเงื่อนไข  $N_2 \gg N_1$  แล้ว ก็จะทำให้เกิดการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นมากกว่าการดูดกลืนแสง จากสมการที่ (2.9) พบว่าจะเกิดเงื่อนไขนี้ได้ก็ต่อเมื่อ  $T$  มีค่าติดลบ จึงอาจเรียกสภาวะของระบบเช่นนี้ว่าเป็น Negative Temperature และเรียกสภาวะที่เกิดเงื่อนไข  $N_2 \gg N_1$  นี้ว่าการผกผันของประชากร ดังรูปที่ 2.12



**รูปที่ 2.12** การเกิดประชากรผกผัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาสัดส่วนของอัตราการเกิดการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นสมการที่ (2.7) ต่ออัตราการดูดกลืนแสงแบบถูกกระตุ้นสมการที่ (2.5) จะได้ว่า

$$\frac{\text{อัตราการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น}}{\text{อัตราการดูดกลืนแสงแบบถูกกระตุ้น}} = \frac{B_{21}N_2\rho(\nu_{12})}{B_{12}N_1\rho(\nu_{12})} \quad (2.10)$$

เมื่อ  $B_{21} = B_{12}$  จะได้ว่า

$$\frac{\text{อัตราการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น}}{\text{อัตราการดูดกลืนแสงแบบถูกกระตุ้น}} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.11)$$

จากสมการที่ (2.11) จะแสดงให้เห็นว่าถ้า  $N_2 \gg N_1$  แล้ว จะทำให้ระบบเกิดการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นในอัตราที่มากกว่าการเกิดการดูดกลืนแสงแบบถูกกระตุ้น ซึ่งปรากฏการณ์ที่  $N_2 \gg N_1$  นี้เรียกว่า การเกิดประชากรผกผัน การทำให้เกิดประชากรผกผันนี้มีหลักการสำคัญคือ ต้องเพิ่มพลังงานให้แก่อะตอมหรือโมเลกุลของตัวกลางเลเซอร์ ซึ่งในทางปฏิบัติได้แก่การใช้แสงที่มีความหนาแน่นของโฟตอนสูงเป็นตัวเพิ่มพลังงาน (Optical Pumping) การกระตุ้นโดยใช้แสงเลเซอร์ชนิดอื่นเป็นแหล่งพลังงานเป็นต้น ซึ่งจะเรียกการเพิ่มพลังงานให้กับระบบด้วยวิธีการต่างๆ นี้ว่า Energy Pumping

### 2.2.3) ตัวสะท้อนเชิงทัศน (Optical Resonator)

ระบบเลเซอร์โดยทั่วไปแล้วจำเป็นต้องมีตัวสะท้อนเชิงทัศน ซึ่งประกอบด้วยกระจกเคลือบสารไดอิเล็กทริกโดยกระจกหลังจะมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ 100% ส่วนกระจกหน้าจะมีสัมประสิทธิ์อยู่ระหว่าง 65-95% เพื่อทำหน้าที่ให้โฟตอนที่เกิดจากขบวนการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเองสะท้อนกลับไปกลับมาผ่านตัวกลางเลเซอร์ทำให้โฟตอนมีความเข้มสูงมากขึ้น ซึ่งจะให้อัตราการเกิดการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นเพิ่มสูงขึ้น แต่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อนพบว่าอัตราการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเองจะมากกว่าอัตราการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น ซึ่งพิจารณาได้จากสัดส่วนระหว่างอัตราการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นต่ออัตราการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง (สมการที่ (2.7) และ (2.6) ตามลำดับ) พบว่าจะเป็นไปตามสมการที่ (2.12)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปะหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\text{อัตราการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น}}{\text{อัตราการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง}} = \frac{B_{21}N_2\rho(\nu_{12})}{A_{21}N_2} = \frac{B_{21}}{A_{21}}\rho(\nu_{12}) \quad (2.12)$$

จากสมการที่ (2.8) จัดรูปใหม่จะได้

$$\rho(\nu_{12}) = \frac{A_{21}/B_{21}}{(B_{12}N_1/B_{21}N_2)-1} \quad (2.13)$$

แทนค่า  $(N_1/N_2)$  จากสมการที่ (2.9) จะได้

$$\rho(\nu_{12}) = \frac{A_{21}/B_{21}}{B_{12}/B_{21}\exp(h\nu/kT)-1} \quad (2.14)$$

พิจารณาการแผ่รังสีในวัตถุดำ

$$\rho(\nu_{12}) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \left( \frac{1}{\exp(h\nu/kT)-1} \right) \quad (2.15)$$

เปรียบเทียบสมการที่ (2.14) กับ (2.15) จะได้

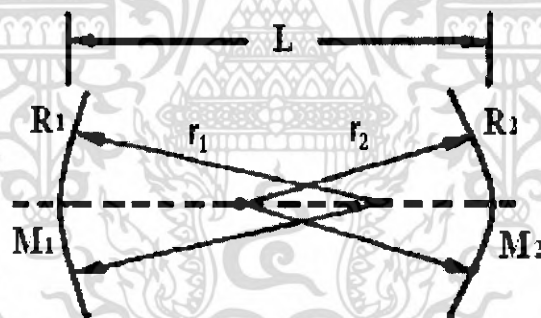
$$\frac{B_{21}}{A_{21}} = \frac{c^3}{8\pi h\nu^3} \quad (2.16)$$

สัดส่วนของอัตราการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นต่ออัตราการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเองจะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{\text{อัตราการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น}}{\text{อัตราการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง}} = \frac{1}{\exp(h\nu/kT)-1} \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.17) พบว่าที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อนอัตราส่วนระหว่างการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นกับอัตราการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง จะมีค่านี้น้อยมาก เช่น แสงที่มีความถี่  $4.74 \times 10^{14}$  เฮิร์ต ที่อุณหภูมิ 370 เคลวิน สัดส่วนของอัตราการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นต่ออัตราการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเองจะมีค่าประมาณ  $10^{-27}$  นั่นคือ เกือบจะไม่มี การเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นเลย ซึ่งจะทำให้ระบบไม่เกิดแสงเลเซอร์ แต่จากสมการที่ (2.12) แสดงให้เห็นว่า ถ้าต้องการให้เกิดการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นในอัตราที่มากกว่าอัตราการเกิดการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเองแล้วนั้น จะต้องมีโฟตอนที่มีความหนาแน่นของพลังงาน  $\rho(\nu_{12})$  สูงมากๆ เข้าไปในระบบ ทำให้ได้โดยการเพิ่มความยาวของตัวกลางเลเซอร์ออกไปมากๆ เพื่อให้เกิดการขยายความเข้มของพลังงาน แต่ในทางปฏิบัติจะมีความยุ่งยากในการจัดวางระบบอย่างมาก จึงใช้วิธีการจัดวางกระจก 2 บานไว้ที่ปลายทั้งสองด้านของระบบเลเซอร์แทน เพื่อให้แสงเกิดการสะท้อนกลับไปกลับมาอยู่ภายในตัวกลางเลเซอร์เป็นการเพิ่มความยาวของระยะทางในการเคลื่อนที่ของแสง และทำให้เสมือนมีความหนาแน่นของพลังงานมีค่ามากขึ้นนั่นเอง ซึ่งจะมีผลให้เกิดการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นที่มากกว่าเกิดการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง การจัดการตัวสันพ้องเชิงทัศนศาสตร์แสดงดังรูปที่ 2.13



**รูปที่ 2.13** ตัวสันพ้องเชิงทัศนศาสตร์ที่ประกอบด้วยกระจก 2 บาน  $M_1$  และ  $M_2$  มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $R_1$  และ  $R_2$  และมีรัศมีความโค้งเป็น  $r_1$  และ  $r_2$  ตามลำดับ

จากรูปจะแสดงถึงตัวสันพ้องเชิงทัศนศาสตร์ ที่ประกอบด้วยกระจกเว้า 2 บาน ที่วางห่างกัน โดยกระจก  $M_1$  และ  $M_2$  มีรัศมีความโค้ง  $R_1$  และ  $R_2$  ตามลำดับ

ในการวิเคราะห์ตัวสันพ้องเชิงทัศนศาสตร์หนึ่งๆ ว่าจะมีลักษณะที่มีการสูญเสียต่ำ (Low Loss) หรือ ไม่จะพิจารณาจากค่าพารามิเตอร์  $g$ -parameter ซึ่งเป็นปริมาณที่ไม่มีหน่วย โดยระบบที่มีเสถียรภาพจะมีเงื่อนไขดังสมการที่ (2.18)

$$0 \leq g_1 g_2 \leq 1 \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $g_1 = 1 - \frac{L}{r_1}$  สำหรับกระจก  $M_1$

และ  $g_2 = 1 - \frac{L}{r_2}$  สำหรับกระจก  $M_2$

จากสมการที่ (2.18) ถ้า  $0 \leq g_1 g_2 \leq 1$  ระบบจะมีเสถียรภาพที่ดี แต่ถ้าหากว่า  $g_1 g_2 < 0$  หรือ  $g_1 g_2 > 1$  พบว่าระบบจะไม่มีเสถียรภาพ (Unstable) คือ เมื่อเกิดการสะท้อนภายในระบบจะทำให้เกิดการสูญเสียมาก (High Loss) ซึ่งมีผลทำให้ไม่เกิดแสงเลเซอร์ขึ้น การจัดวางกระจกมีด้วยกันหลายแบบ แต่จะต้องจัดวางให้เป็นไปตามเงื่อนไขดังสมการที่ (2.18) จึงจะทำให้เกิดแสงเลเซอร์ที่มีเสถียรภาพที่ดี

### 2.3 ทฤษฎีเซล์ฟมิกซิง (Theory of Self – Mixing)

ปรากฏการณ์เซล์ฟมิกซิง (Self – Mixing Phenomena) หรือการย้อนกลับทางแสง (Optical Feedback Effect) เกิดขึ้นเมื่อจัดเรียงองค์ประกอบทางแสงให้มีการสะท้อนกลับของแสงเลเซอร์จากตัวสะท้อนภายนอก (External Reflector) กลับเข้าไปในเลเซอร์แควิตีทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกำลังเอาต์พุตและความถี่ออสซิลเลชันของเลเซอร์

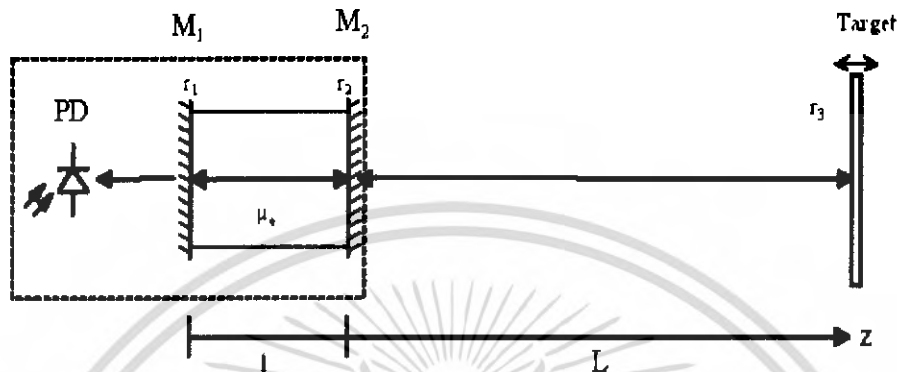
ทฤษฎีเซล์ฟมิกซิงมีการวิเคราะห์ 2 แบบ คือ

1. แบบของ Lang และ Kobayashi เป็นการใช้อนุสมการต่างๆ อธิบายผลของเลเซอร์เมื่อมีการย้อนกลับทางแสงในทอมของตัวแปลทางแสงและทางไฟฟ้า
2. แบบที่ใช้แบบจำลอง Three Mirror Cavity เป็นแบบที่สามารถเข้าใจได้ง่ายกว่า เนื่องจาก ไม่มีสมการที่ซับซ้อน

นอกจากนี้ยังจำแนกการวิเคราะห์ผลของเซล์ฟมิกซิง ตามการแปรเปลี่ยนค่าของความยาวแควิตีภายนอก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงแควิตีภายนอกเป็นช่วงยาว ( ประมาณ 1 มิลลิเมตร ) และการเปลี่ยนแปลงความยาวแควิตีภายนอกเป็นช่วงสั้น ระดับความยาวคลื่นแสง นั้นจะส่งผลให้กำลังของแสงย้อนกลับมีการเปลี่ยนแปลง โดยจะพิจารณาเงื่อนไขของเลเซอร์ออสซิลเลชัน ซึ่งในที่นี้จะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความยาวแควิตีภายนอกเป็นช่วงยาว ซึ่งจะสามารถอธิบายผลที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

### 2.3.1) เงื่อนไขของเลเซอร์ออสซิลเลชันเมื่อมีแควิตี้ภายนอก

พิจารณาแบบจำลองแควิตี้ของเลเซอร์ไดโอดซึ่งมีตัวสะท้อนภายนอกดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แบบจำลองแควิตี้ของเลเซอร์ไดโอดที่มีแควิตี้ภายนอก

เลเซอร์แควิตี้ยาว  $l$  และมีค่าดัชนีหักเหของตัวกลางเลเซอร์เป็น  $n_s$  กำลังเอาท์พุทจากเลเซอร์แควิตี้ถูกสะท้อนด้วยตัวสะท้อนภายนอกซึ่งมีค่าการสะท้อน  $r_3$  และวางอยู่ที่ระยะห่างจากผิวหน้าของเลเซอร์เป็นระยะ  $L$  แสงถูกสะท้อนกลับโดยตรงเข้าสู่เลเซอร์แควิตี้ ซึ่งมีค่าการสะท้อนของผิวหน้าประกบด้านหน้าและด้านหลังของแควิตี้เป็น  $r_2$  และ  $r_1$  ตามลำดับ สำหรับเลเซอร์ไดโอดซึ่งมีตัวสะท้อนภายนอกได้มีการศึกษาโดย Lang และ Kobayashi ถึงการย้อนกลับทางแสงอย่างอ่อนและการเปลี่ยนแปลงความยาวของแควิตี้ภายนอกอยู่ในระดับความยาวคลื่นแสง ซึ่งจะไม่พิจารณาการสะท้อนหลายครั้งในแควิตี้ภายนอก แต่กรณีที่มีการย้อนกลับทางแสงสูง การเปลี่ยนแปลงค่าความยาวแควิตี้ภายนอกเป็นช่วงยาว และการพิจารณาการสะท้อนหลายครั้งในแควิตี้ภายนอกซึ่งจะสามารถอธิบายด้วยสมการ Rate Equation สำหรับสนามเชิงซ้อน  $E(t)\exp(i\Omega t)$  ที่เวลา  $t$  ใดๆ คือ

$$\frac{d}{dt} E(t)e^{i\Omega t} = \left[ i\omega_n + \frac{1}{2}(G - \Gamma_\omega) + \beta(t) \right] E(t)e^{i\Omega t} \quad (2.19)$$

เมื่อ	$\Omega$	คือ	ความถี่เชิงมุมของเลเซอร์ออสซิลเลชัน
	$\omega_n$	คือ	ความถี่เชิงมุมของเลเซอร์แควิตี้โหมดที่ $N$ ใดๆ
	$G$	คือ	สัมประสิทธิ์กำลังขยาย
	$\Gamma_\omega$	คือ	ค่าการสูญเสียในเลเซอร์แควิตี้

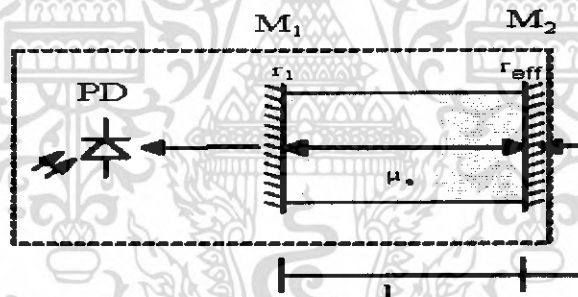
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\beta(t)$  เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับเวลาและเกี่ยวข้องกับการย้อนกลับของแสงรวมถึงการสูญเสีย เนื่องจากการสะท้อนของกระจกหน้าของเลเซอร์แควิตี้และตัวสะท้อนภายนอก ซึ่งเป็นฟังก์ชันเชิงซ้อนดังนี้

$$\beta(t) = -\frac{1}{2}\beta_r(t) + i\beta_i \quad (2.20)$$

เมื่อ  $\beta_r(t)$  แทน แขนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการย้อนกลับทางแสง  
 $\beta_i(t)$  แทน เฟสที่เลื่อนไปของความถี่เลเซอร์

ภายใต้เงื่อนไขสภาวะคงที่ (Steady State Conditions)  $\beta(t)$  จะเป็นฟังก์ชันของเวลาหายไป และขากลับของแสงภายในแควิตี้ภายนอก เมื่อพิจารณาเลเซอร์ไดโอดที่มีการย้อนกลับของแสงภายนอกเป็นวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แบบจำลองวงจรสมมูลของเลเซอร์ไดโอดเมื่อมีตัวสะท้อนภายนอก

จากรูปที่ 2.15 ค่าการสะท้อนยังผลของกระจกหน้าของเลเซอร์ เนื่องจากผลของตัวสะท้อนภายนอกแทนด้วย  $r_{eff}$  ซึ่ง

$$r_{eff} = \frac{r_2 + r_3 \exp(-i\Omega\tau)}{1 + r_2 r_3 \exp(-i\Omega\tau)} \quad (2.21)$$

เมื่อ  $\tau$  คือ เวลาไปกลับของแสงเลเซอร์ในแควิตี้ภายนอกมีค่าเท่ากับ  $2L/c$   
 $c$  คือ ความเร็วแสงในสุญญากาศมีค่าเท่ากับ  $3 \times 10^8$  เมตร / วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจากแบบจำลองจะได้ว่าค่ากำลังขยายเชิงซ้อน ( $\exp(\beta \tau_D)$ ) เท่ากับ ค่าการสูญเสียทั้งหมดของการสะท้อนเนื่องจากแบบจำลองนั้นคือ

$$\exp(\beta \tau_D) = r_1 r_{eff} \quad (2.22)$$

เมื่อ  $\tau_D$  คือ เวลาครบรอบของแสงภายในเลเซอร์แควิตีมีค่าเท่า  $ql$  คือ ความยาวแควิตีขั้วผล (Effective Cavity Length) เนื่องจากมีตัวสะท้อนภายนอก

แทนสมการ (2.21) ในสมการ (2.22) จะได้ความสัมพันธ์

$$\exp(\beta \tau_D) = \exp \left[ -\ln \left( \frac{1}{r_1 r_2} \right) \right] \left[ \frac{1 + r_3 / r_2 \exp(-i\Omega\tau)}{1 + r_2 r_3 \exp(-i\Omega\tau)} \right] \quad (2.23)$$

สามารถเขียนส่วนจำนวนจริงจินตภาพของกำลังขยายเชิงซ้อนได้เป็น

$$\beta_r = \frac{2}{\tau_D} \ln \left( \frac{1}{r_1 r_2} \right) + \frac{2}{\tau_D} g(r_3, \tau, \Omega) \quad (2.24)$$

$$\beta_i = \frac{1}{\tau_D} \phi(r_3, \tau, \Omega) \quad (2.25)$$

ซึ่ง 
$$g(r_3, \tau, \Omega) = \frac{1}{2} \ln \left[ \frac{1 + 2r_2 r_3 \cos(\Omega\tau) + (r_2 r_3)^2}{1 + 2r_3 / r_2 \cos(\Omega\tau) + (r_3 / r_2)^2} \right] \quad (2.26)$$

และ 
$$\phi(r_3, \tau, \Omega) = \arctan \left[ \frac{(r_2 r_3 - r_3 / r_2) \sin(\Omega\tau)}{1 + r_3^2 + (r_2 r_3 + r_3 / r_2) \cos(\Omega\tau)} \right] \quad (2.27)$$

พิจารณาเลเซอร์ออสซิลเลชันภายใต้เงื่อนไขสภาวะคงที่ในแบบจำลอง สามารถกำหนดเงื่อนไขของเลเซอร์ออสซิลเลชันที่จุดเริ่มทำงานได้จากสมการที่ (2.19) และ (2.20) ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{1}{2}(G_{th} - \Gamma_{\omega} - \beta_r) + i(\omega_N - \Omega + \beta_i) = 0 \quad (2.28)$$

เมื่อ  $G_{th}$  คือ กำลังขยายขีดเริ่ม  
ซึ่งจะได้กำลังขยายขีดเริ่มและความถี่ออสซิลเลชันเป็น

$$G_{th} = \Gamma_{\omega} + \beta_r = \Gamma_0 + \frac{2}{\tau_D} g(r_3, \tau, \Omega) \quad (2.29)$$

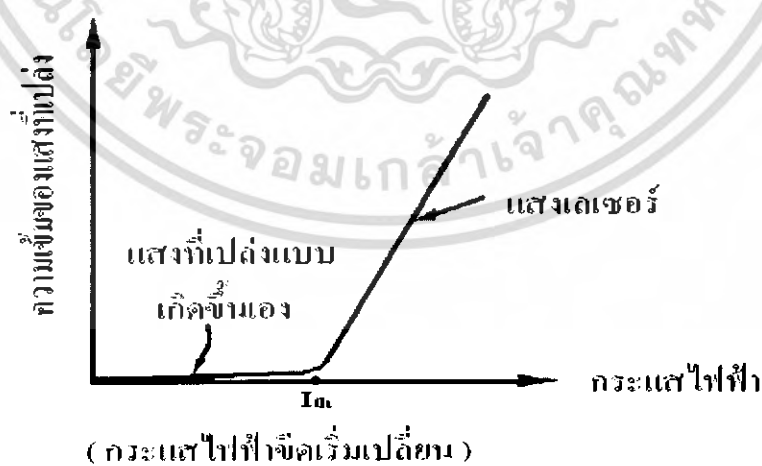
$$\Omega = \omega_N + \beta_i = \omega_N + \frac{1}{\tau_D} \phi(r_3, \tau, \Omega) \quad (2.30)$$

เมื่อ  $\Gamma_0$  คือ ค่าการสูญเสียของแสงเลเซอร์ในแควิตีขณะที่ไม่มีการย้อนกลับของแสง  
ภายนอก

$$\Gamma_0 = \Gamma_{\omega} + \frac{2}{\tau_D} \ln\left(\frac{1}{r_1 r_2}\right) \quad (2.31)$$

### 2.3.2) กำลังเอาต์พุตและความถี่ออสซิลเลชัน

ขณะที่ไม่มีการย้อนกลับทางแสง กำลังเอาต์พุตหรือความเข้มของแสงที่เปล่งออกมาเป็น  
สัดส่วนเชิงเส้นกับค่ากระแสแซบ (Injection Current) และมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่ากระแสแซบดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเอาต์พุตกับค่ากระแสแซบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

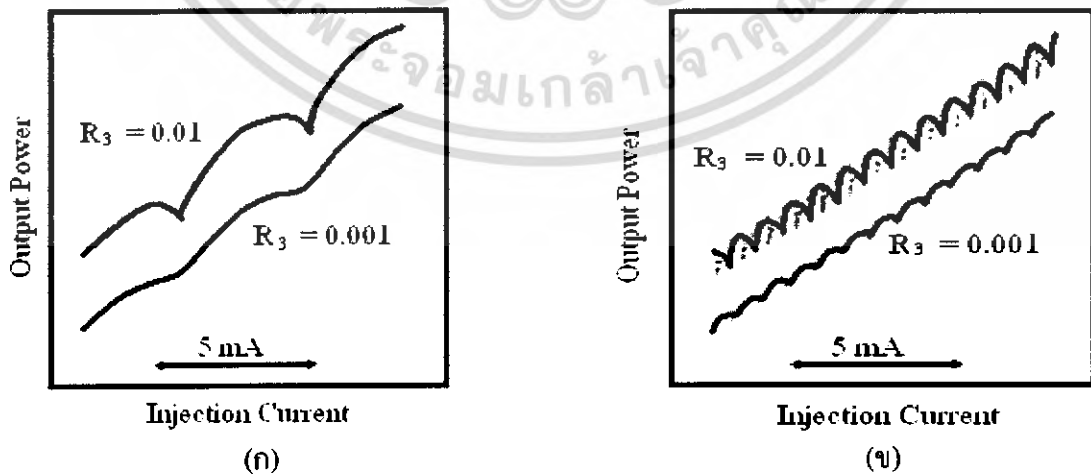
แต่ในกรณีของแบบจำลองหรือเมื่อมีแควิตีภายนอก ความสัมพันธ์นี้จะไม่เป็นเชิงเส้นแต่จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่ากำลังขยายขีดเริ่มและค่าความถี่ออสซิลเลชัน ดังสมการ

$$P = \mu \frac{\Omega}{G_{th}} (I - I_{th}) \tag{2.32}$$

เมื่อ  $I_{th}$  คือ กระแสขั้ว ณ จุดเริ่มทำงานของเลเซอร์  
 $\mu$  คือ สัมประสิทธิ์ที่กำหนดโดยพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ในเลเซอร์แควิตี

$$\mu = \frac{\Gamma \epsilon h}{4\pi \tau_M q} \tag{2.33}$$

เมื่อ  $\Gamma$  คือ คอนไฟน์เมนต์แฟกเตอร์  
 $\epsilon$  คือ ประสิทธิภาพการป้อนกระแสแก่เลเซอร์  
 $h$  คือ ค่าคงที่พลังค์ มีค่าเท่ากับ  $6.63 \times 10^{-34}$  J.s  
 $\tau_M$  คือ ช่วงชีวิตของแสงเนื่องจากการสูญเสียจากการสะท้อน  
 $q$  คือ ประจุไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ  $1.6 \times 10^{-19}$  C  
 ขณะที่ไม่มีการย้อนกลับของแสงภายนอก  $\Omega$  และ  $G_{th}$  จะมีค่าคงที่ ดังนั้นกำลังเอาต์พุตของเลเซอร์ออสซิลเลชันจึงแปรผันเชิงเส้นกับค่ากระแสขั้วเลเซอร์เท่านั้น แต่เมื่อมีการย้อนกลับของแสงภายนอกเข้าสู่เลเซอร์แควิตี ค่า  $\Omega$  และ  $G_{th}$  จะมีค่าเปลี่ยนแปลง ซึ่งความถี่ออสซิลเลชันและกำลังขยายขีดเริ่มมีค่าขึ้นกับกำลังย้อนกลับของแสงภายนอกและแควิตีภายนอกสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ของกำลังเอาต์พุตและค่ากระแสขั้วที่มีค่าความยาวแควิตีภายนอกต่างๆ

กัน (ก)  $L = 10 \mu\text{m}$  และ (ข)  $L = 50 \mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังเอาท์พุทของเลเซอร์กับค่ากระแสขับที่ค่าความยาว  
แควิตีภายนอกต่างๆ กัน เมื่อกระแสขับเพิ่มขึ้นค่ากำลังเอาท์พุทจะมีค่าเพิ่มขึ้น และเนื่องจากมีตัว  
สะท้อนภายนอกทำให้ค่ากำลังเอาท์พุทมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะลูกคลื่น โดยเมื่อความยาวแควิตี  
ตีมากขึ้นคาบของลูกคลื่นจะลดลงและที่ค่าการสะท้อนกลับของแสงมากขึ้นขนาดแอมพลิจูดของลูก  
คลื่นจะใหญ่ขึ้น

### 2.3.3) กำลังเอาท์พุทและความยาวแควิตีภายนอก

ผลของความยาวแควิตีภายนอกที่มีต่อกำลังเอาท์พุทสามารถอธิบายได้ในเชิงคุณภาพ และ  
ด้วยผลการทดลองภายใต้เงื่อนไขสำหรับมัลติโหมดออสซิลเลชันของเลเซอร์ไดโอด ซึ่งให้แต่ละ  
โหมดเป็นอิสระต่อกันทำให้ได้กำลังขยายขีดเริ่มของแต่ละโหมดเป็นดังนี้

$$G_{N_{th}} = \Gamma_0 + \frac{2}{\tau_D} g(r_3, \tau, \Omega_N) \quad \text{สำหรับโหมดที่ } N_{th} \quad (2.34)$$

$$G_{N'_{th}} = \Gamma_0 + \frac{2}{\tau_D} g(r_3, \tau, \Omega_{N'_{th}}) \quad \text{สำหรับโหมดที่ } N'_{th} \quad (2.35)$$

เมื่อ  $\Omega_N$  คือ ความถี่เชิงมุมของการออสซิลเลชันของโหมดที่ N  
 $\Omega_{N'}$  คือ ความถี่เชิงมุมของการออสซิลเลชันของโหมดที่ N' th

จากสมการที่ 2.32 ค่ากำลังเอาท์พุทมีค่าสูงสุดเมื่อ ค่ากำลังขยายขีดเริ่มมีค่าต่ำสุด ซึ่ง  
เงื่อนไขสำหรับค่ากำลังขยายขีดเริ่มมีค่าต่ำสุดพิจารณาได้จากสมการที่ (2.26) ซึ่งจะได้

$$\Omega_N \tau = 2M\pi \quad (2.36)$$

$$\Omega_{N'} \tau = 2M'\pi \quad (2.37)$$

เมื่อ M และ M' เป็นจำนวนจริง

ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมของสมการที่ (2.36) และ (2.37) จะได้ค่ากำลังขยายขีดเริ่มมีค่า

ต่ำสุดเป็นดังสมการที่ 2.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_{th} = G_{Nth} = G_{N'th} = \frac{2}{\tau_D} \ln \left( \frac{1+r_2 r_3}{1+r_3/r_2} \right) \quad (2.38)$$

และให้ความถี่ออสซิลเลชันของแต่ละโหมดเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์เชิงมุม ซึ่งก็คือ

$$\Omega_N \approx \frac{N\pi c}{\eta l} \quad (2.39)$$

$$\Omega_{N'} \approx \frac{N'\pi c}{\eta l} \quad (2.40)$$

จากสมการที่ (2.36) , (2.37) , (2.39) , และ (2.40) พบว่า ค่ากำลังเอาต์พุตมีค่าสูงสุด เมื่อความยาวเลวติภายนอกมีค่าเท่ากับจำนวนเต็มเท่าของความยาวเลวติขงผล  $\eta l$  ทำให้ได้ว่ากำลังของเลเซอร์ออสซิลเลชันมีค่าสูงสุดตามเงื่อนไข

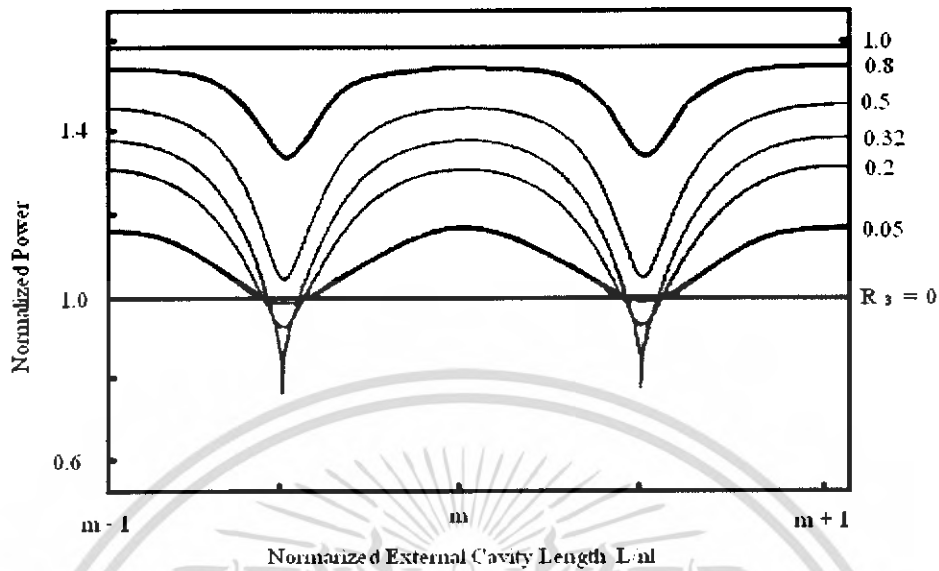
$$\frac{L}{\eta l} = \frac{m}{n} \quad (2.41)$$

เมื่อ  $m = M' - M$  และ  $n = N' - N$  โดย  $N' = N + 1$

และค่ากำลังเอาต์พุตทั้งหมดที่เงื่อนไขสูงสุด สามารถคำนวณได้จากการรวมกันอย่างเป็นเชิงเส้นของแต่ละโหมดกำลังดังสมการที่ 2.42

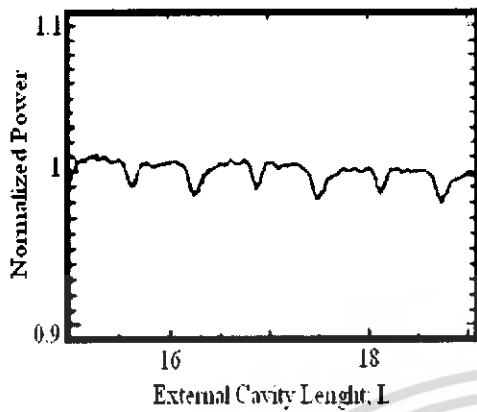
$$P \approx \mu \omega_N \left( \frac{1}{G_{Nth}} + \frac{1}{G_{N'th}} \right) (I - I_{th}) \quad (2.42)$$

และผลจากการคำนวณแสดงดังรูปที่ 2.18

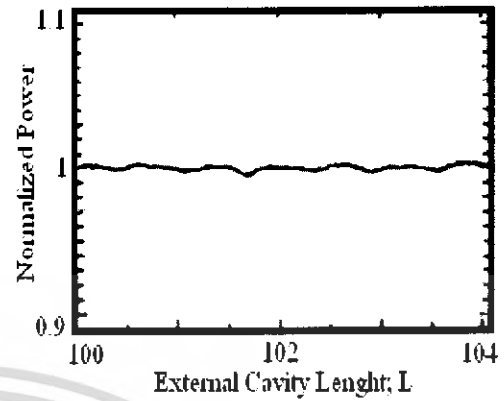


**รูปที่ 2.18** กำลังเอาต์พุตเป็นฟังก์ชันของความยาวแควิตีภายนอก

จากรูปที่ 2.18 เป็นผลจากการคำนวณค่ากำลังเอาต์พุตซึ่งเป็นฟังก์ชันของความยาวแควิตีภายนอกสำหรับการออสซิลเลชันของ 2 โหมดแสงซึ่งอธิบายได้ว่าค่ากำลังเอาต์พุตมีค่าสูงสุดที่ค่าความยาวแควิตีภายนอกมีค่าเท่ากับจำนวนเต็มเท่าของ  $\eta/\lambda$  เส้นโค้งต่างๆ พลอตสำหรับค่าการสะท้อนกลับของแสงที่ต่างกัน พบว่ามีการจมลงของคลื่นที่ระยะครึ่งหนึ่งของความยาวแควิตีภายนอก และมีค่าสูงที่ค่าการสะท้อนกลับของแสงอยู่ในระดับปานกลาง สามารถสรุปผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระยะแควิตีภายนอกและค่าสะท้อนกลับของแสงเนื่องตัวสะท้อนภายนอกที่มีต่อกำลังเอาต์พุตของเลเซอร์ได้ คือ เมื่อมีตัวสะท้อนภายนอกที่ค่าการสะท้อนกลับเท่ากัน แต่วางอยู่ที่ระยะจากเลเซอร์ต่างกัน จะมีการจมลงของกำลังเอาต์พุตมากกว่าเมื่อมีตัวสะท้อนภายนอกวางอยู่ที่ระยะห่างจากเลเซอร์น้อยกว่า ดังรูปที่ 2.19 และในอีกกรณีคือเมื่อวางตัวสะท้อนภายนอกห่างจากเลเซอร์เป็นระยะทางเท่ากันแต่มีค่าการสะท้อนกลับที่สูงกว่า จะมีการจมลงของกำลังเอาต์พุตที่มากกว่าหรือกล่าวได้ว่าเมื่อมีการสะท้อนหลายๆ ครั้งหรือมีการออสซิลเลชันแบบมัลติโหมดเนื่องจากตัวสะท้อนภายนอกจะเกิดลูกคลื่นหรือการกวัดแกว่งสัญญาณย่อยๆ มากมายระหว่างค่ากำลังเอาต์พุตสูงสุดดังรูปที่ 2.20



(ก)

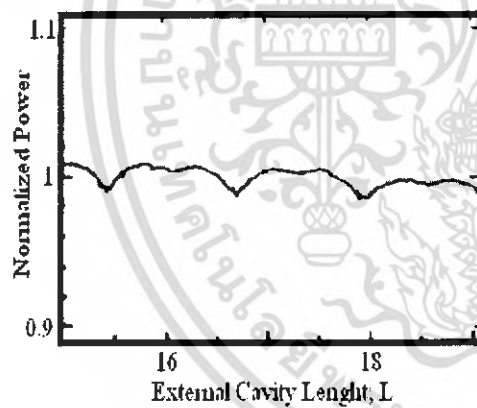


(ข)

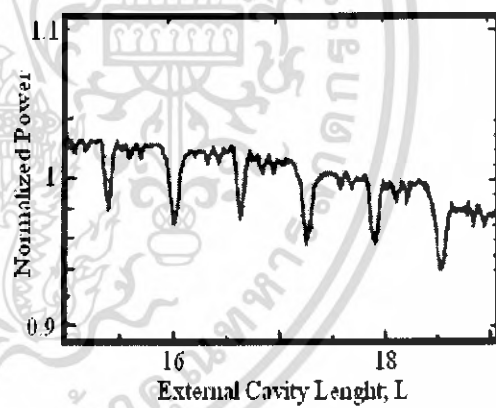
**รูปที่ 2.19** ค่ากำลังเอาต์พุตเป็นฟังก์ชันของความยาวแควิตีภายนอกสำหรับ  
ตำแหน่งของแควิตีภายนอกที่ต่างกัน

(ก)  $R = 0.248$ ,  $L = 15-19$  mm

(ข)  $R = 0.248$ ,  $L = 100-104$  mm



(ก)



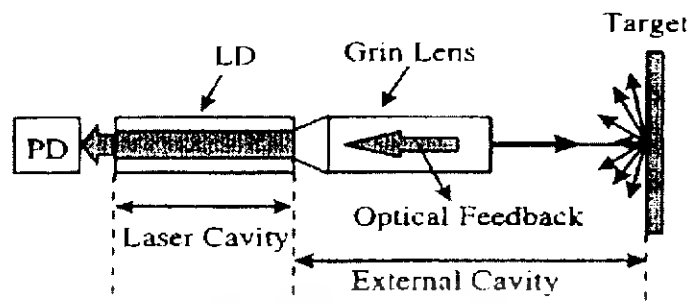
(ข)

**รูปที่ 2.20** ค่ากำลังเอาต์พุตเป็นฟังก์ชันของความยาวแควิตีภายนอกสำหรับ  
ค่าการสะท้อนกลับของแสงที่ต่างกัน

(ก)  $R = 0.0115$ ,  $L = 15-19$  mm

(ข)  $R = 0.387$ ,  $L = 15-19$  mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 2.21** แบบจำลองการเดินทางของแสงภายในแควิตีของเลเซอร์ไดโอดที่มีแควิตีภายนอก

จากรูปที่ 2.21 การแทรกสอดของแสงที่เกิดจากการสะท้อนกลับและแสงเลเซอร์ไดโอดซึ่งแสงทั้งสองส่วนนี้จะมีการเคลื่อนที่ไปในตัวกลางเป็นระยะทางต่างๆ กัน จากนั้นก็จะกลับมาพบกันและแทรกสอดกันภายในเลเซอร์แควิตีแบบฟาบรี-เพอร์โร (Fabry-Perot) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณของแสง

การตรวจวัดรายละเอียดสภาพพื้นผิววัตถุนั้นจะใช้แสงเป็นองค์ประกอบหลักในการตรวจสอบพื้นผิวเป็นหลักโดยใช้สัญญาณแสงที่ตกกระทบวัตถุเป็นตัวใช้วัดรายละเอียดและเป็นแนวเดียวกับตัวมันเองและยังทำการตรวจจับด้วยตัวมันเอง ในการพิจารณาแนวแกนแสงของเทคนิคเซลฟ์มิกซิ่ง จะพิจารณาในแนวแกนแสงเพียง 1 แกนเท่านั้น เซลฟ์มิกซิ่งที่เกิดขึ้นในเลเซอร์ขึ้นอยู่กับขนาดของวัตถุที่ใช้ในการส่งและรับแสงที่ไปกระทบกับวัตถุ

ข้อดีของเทคนิคเซลฟ์มิกซิ่ง นี้คือ เป็นทั้งตัวส่งและรับสัญญาณภายในตัวเอง และการเดินทางของแสงยังเดินทางเป็นแนวเดียวกับตัวมันเอง ประกอบง่าย มีความมั่นคงของตัวอุปกรณ์แข็งแรง และง่ายต่อการเคลื่อนย้าย รวมไปถึงถึงองค์ประกอบทางแสงต่างๆ จะใช้น้อยกว่าวิธีทางแสงอื่นๆ

## 2.4 หน่วยวัด

รายละเอียดของหน่วยวัดในปัจจุบันนี้ ระบบมาตรฐานสากลการเทียบหน่วยวัดใช้หน่วยเมตร (Meter) เป็นหน่วยเทียบของหน่วยวัด อย่างอาทิเช่น กิโลเมตร (kilometer), มิลลิเมตร (millimeter) ไมโครเมตร (micrometer), นาโนเมตร (nanometer) โดย

$$\begin{aligned} 1 \text{ Km} &= 1 \times 10^3 \text{ m} \\ 1 \text{ cm} &= 1 \times 10^{-2} \text{ m} \\ 1 \text{ mm} &= 1 \times 10^{-3} \text{ m} \\ 1 \text{ } \mu\text{m} &= 1 \times 10^{-6} \text{ m} \\ 1 \text{ nm} &= 1 \times 10^{-9} \text{ m} \end{aligned}$$

ซึ่งตามค่าสเกลเครื่องมือวัดระยะในหน่วยของ กิโลเมตร (Kilometer), เซนติเมตร (centimeter), มิลลิเมตร (millimeter) สามารถรับรู้ได้ตามเครื่องมือทั่วไปที่มีอยู่แต่ในระดับของ นาโนเมตร (nanometer) ที่ถือว่าเป็นหน่วยที่มีความเล็กมากยากต่อการที่จะมองด้วยตาเปล่า จำเป็นต้องใช้เครื่องมือเทคโนโลยีสมัยใหม่เข้ามาช่วยในการทดสอบ

เป็นการวัดในสิ่งที่มีขนาดเล็กมากโดยที่ตาเปล่าไม่สามารถมองเห็นได้เช่น ขนาดของ โมเลกุล ขนาดของอะตอม ขนาดของสิ่งเหล่านี้โดยส่วนมากจะอยู่ในระดับสเกลที่เป็นหน่วย ไมโครเมตรและเล็กลงไปอีกจนถึงระดับหน่วยนาโนเมตร จึงเป็นการยากที่จะทำการมองเห็นได้โดยง่าย แต่ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านแสงมีความก้าวหน้าเป็นอย่างมากจึงทำให้สามารถทำการวัดในระดับหน่วยไมโครเมตรและนาโนเมตรได้ เครื่องมือทางแสงจึงนับเป็นทางเลือกหนึ่งที่จัดว่าเป็นเครื่องมือที่มีการวัดได้อย่างละเอียด โดยที่เมื่อทำการปล่อยแสงให้กับชิ้นงาน เช่น ใยแก้ว จะทำให้สามารถรู้ขนาดของโมเลกุลบนใยแก้วได้หรืออย่างเช่น ไม้บรรทัดที่มีสเกลเป็นเซนติเมตรและ มิลลิเมตร เมื่อนำมาวัดทางบแสงจะสามารถแปลงในหน่วยมิลลิเมตรที่เป็นระดับสเกลที่เล็กที่สุดบนหน่วยไม้บรรทัดจะได้เป็นหน่วยไมโครเมตรและหน่วยนาโนเมตรได้

## บทที่ 3

### ขั้นตอนการดำเนินงานและอุปกรณ์การทดลอง

การศึกษาและทดลองหลักการวัด โดยเทคนิคเซลฟ์มิกซิ่ง หรือ การย้อนกลับทางแสง ภายนอกโดยใช้ เลเซอร์ไดโอดและทำการวัดอย่างละเอียดในระดับไมโครเมตร โดยทำการตรวจสอบบนพื้นผิวของโลหะชนิดต่างๆ มีขั้นตอนในการดำเนินงานและรายละเอียดของอุปกรณ์ต่างๆดังนี้

#### 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน มีดังนี้

- 3.1.1 ศึกษาค้นคว้าหลักการพื้นฐานและผลของการเกิดปรากฏการณ์ เซลฟ์มิกซิ่ง
- 3.1.2 นำหลักการที่ได้มาศึกษาและเลือกอุปกรณ์ของระบบการวัดทางแสงโดยอาศัยทฤษฎี เซลฟ์มิกซิ่ง ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่เป็นตัวรับสัญญาณและตัวส่งสัญญาณ
- 3.1.3 ทดสอบอุปกรณ์ที่จัดวางขึ้น
- 3.1.4 เมื่อได้อุปกรณ์ที่ทำให้ระบบมีความสมบูรณ์ที่สุด และทำการทดลองวัดลักษณะพื้นผิวในระดับไมโครเมตรเพื่อให้ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางเปรียบเทียบกับ ปริมาณของความต่างศักย์ที่เป็นมาตรฐานหรือกราฟเปรียบเทียบเพื่อหาช่วงที่เหมาะสมต่อการวัด
- 3.1.5 นำค่าที่ได้มาสร้างกราฟและทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองและนำไปสรุปผลการทดลอง

#### 3.2 รายละเอียดของอุปกรณ์ในดำเนินงาน

ระบบการวัดทางแสงโดยอาศัยหลักการเซลฟ์มิกซิ่ง หรือการย้อนกลับของแสงภายนอก เป็นอุปกรณ์ที่ไม่ซับซ้อนและยุ่งยาก ซึ่งไม่จำเป็นจะต้องนำอุปกรณ์ทางแสงภายนอกอย่างอื่น อย่างเช่น ดีเทคเตอร์ภายนอกมาใช้ แต่ใช้เพียงชุดอุปกรณ์ชุดเลเซอร์ที่มี Power สูง และต่อเข้ากับ วงจรขับกระแสให้กับตัวเลเซอร์ไดโอด วงจรแปลงและขยายสัญญาณแสงจากโฟโตดีเทคเตอร์เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ซึ่ง ในรายละเอียดของอุปกรณ์และส่วนประกอบต่างๆที่ต้องใช้ในการดำเนินงานของโครงการพิเศษนี้ ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1 แหล่งกำเนิดกระแส (Power Supply)

สามารถจ่ายกระแสของเลเซอร์ได้ตั้งแต่ 0-100 mA มีหน้าที่เปลี่ยนไฟ 220 V. ให้เป็น 5 V. ดังรูปที่ 3.1



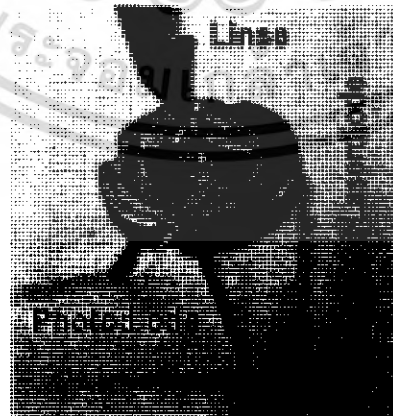
(ก)

(ข)

รูปที่ 3.1 (ก) และ (ข) แหล่งกำเนิดกระแส

### 3.2.2 แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์

แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่ใช้ในโครงการพิเศษนี้เป็นเลเซอร์ไดโอดชนิดที่มีโฟโตไดโอดอยู่ภายในตัวของบริษัท EG&G รุ่น C86135E และเป็นชนิดที่ให้แสงอินฟราเรด มีโครงสร้างเป็นแบบซึ่งเกิดควอนตัมเวล โดยชั้นแอกทีฟเป็น InGaAs แบบสเตรน (A Strained InGaAs Active Layer) ให้ความยาวคลื่น 905 nm และกำลังแสงเอาต์พุต 25 mW ซึ่งที่เลือกใช้เนื่องจากเลเซอร์นี้มีความยาวคลื่นที่มากกว่า ซีเลียมเลเซอร์ ที่มีความยาวคลื่น 620 nm และมีอำนาจการทะลุทะลวงต่ำ จึงมีการสะท้อนที่ดี ลักษณะของเลเซอร์นี้เป็นดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เลเซอร์ไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3 อุปกรณ์เคื่องตำแหน่งแสงเซอร์ (Piezosystem)

อุปกรณ์เป็นรุ่น 200 OEM เป็นอุปกรณ์ที่ทำมาจากโลหะชนิดพิเศษและทำหน้าที่ปรับระยะของแสงเลเซอร์โดยจะนำเลเซอร์ไดโอดมาติดไว้ที่แถบสี่แฉงดังที่แสดงในรูป 4 (ข.)



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.3 (ก.)และ(ข.)Piezosystem

จะทำงาน โดยเชื่อมต่อกับ Piezosystem jena รุ่น ENT 40/20 เมื่อทำการป้อนแรงดัน มันจะยืดหดในระดับนาโนซึ่งไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าและจะยืดหดตามแรงดันที่ป้อน หากป้อนแรงดันมากก็จะยืดมาก และอุณหภูมิยังมีผลต่อแรงดันด้วยดังนั้นการยืดหดจึงขึ้นกับแรงดันด้วยเช่นกัน

### 3.2.4 ชุดเคื่องตำแหน่ง (Piezosystem jena)

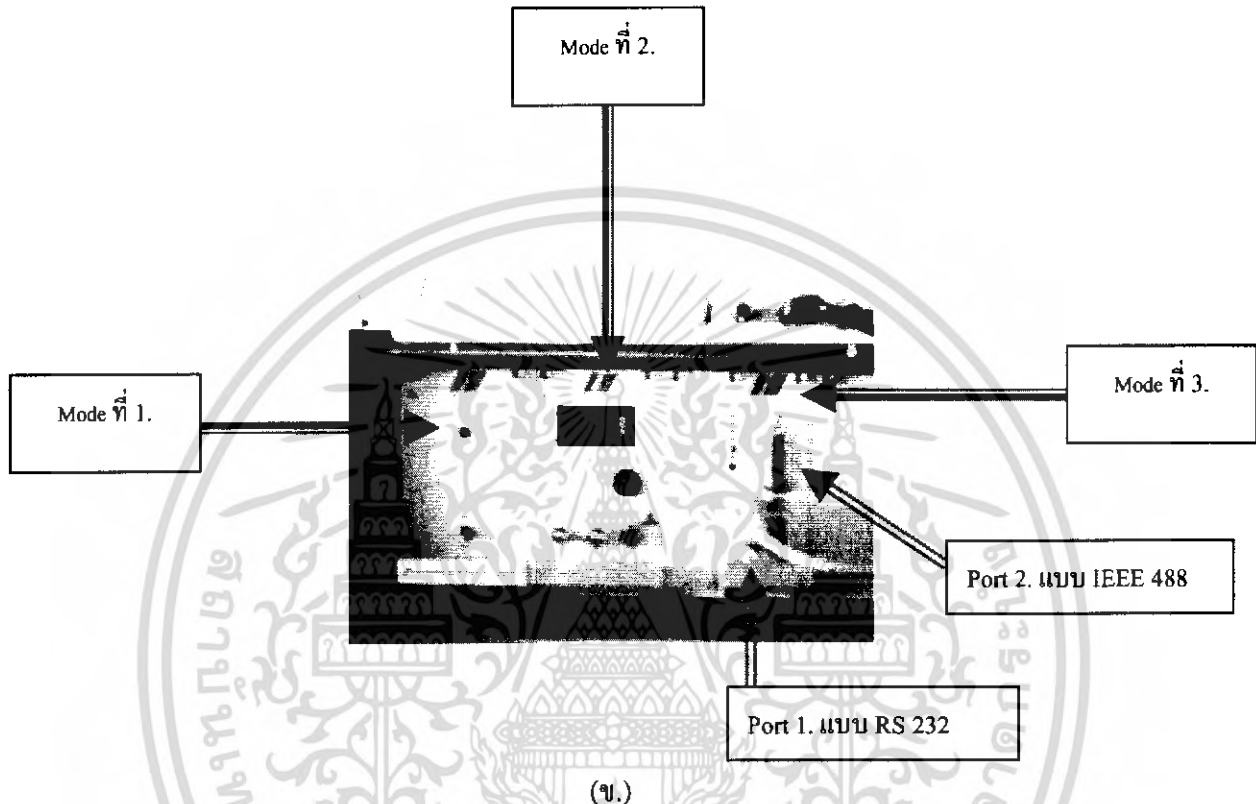
ใช้ในการหาระยะที่ละเอียดตั้งแต่สเกลระดับไมโครเมตร ได้จนถึงสเกลระดับนาโนเมตร โดยเป็นรุ่น ENT 40/20 ตัวกล่องเป็นฉนวนชนิดเซรามิก จะเป็นอุปกรณ์ที่ควบคุมแรงดันให้กับ Piezosystem 75732 .และให้แรงดันสูงอุปกรณ์มีลักษณะดังรูป 3.4 (ก.)



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากต้องการใช้งานต้องทำการเปิดเครื่องทิ้งไว้ก่อนทำการทดลอง 2 ชั่วโมง เพื่อที่ทำการเซตคัวอุปกรณ์ เพราะอุปกรณ์ยังไม่ Stable โดยจะประกอบด้วยระบบการทำงาน 3 mode ดังรูป 3.4 (ข.)

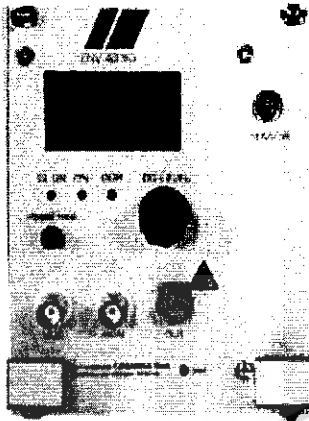


รูปที่ 3.4 (ก.) และ (ข.) Piezosystem jena รุ่น ENT 40/20



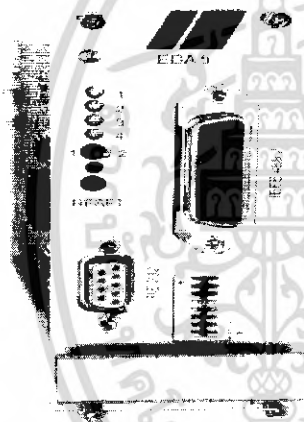
รูปที่ 3.5 Power supply ENT 40/20 ในเครื่อง Piezosystem jena

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- Mode ที่ 2. ภาด Control หรือภาดขับ
- จะควบคุมแรงดันที่จ่ายให้กับตัว

รูปที่ 3.6 Control ในเครื่อง Piezosystem jena



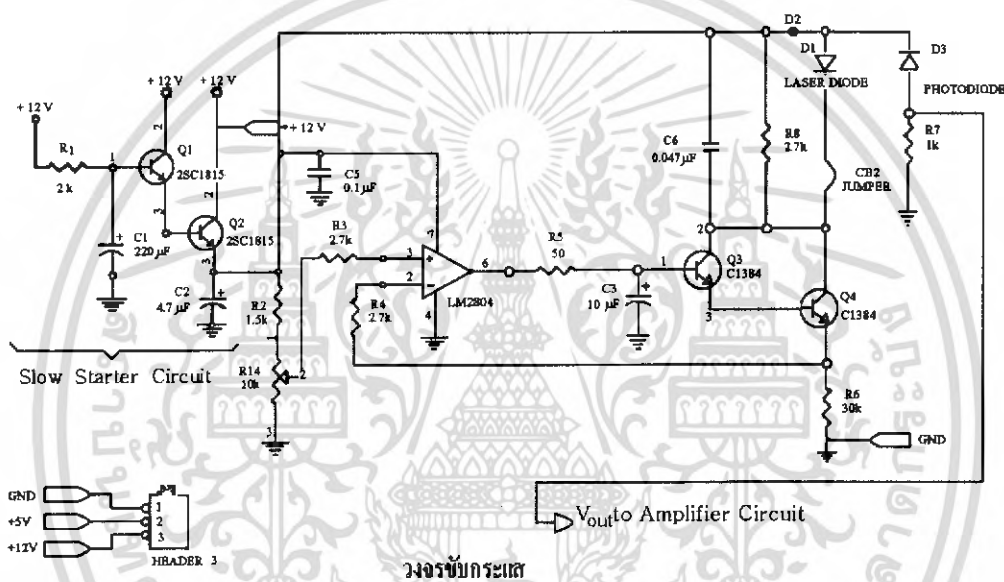
- Mode ที่ 3. ภาด Interred
- จะควบคุมในระดับนาโนสเกล โดยมี 2 port คือ
  - Port 1. แบบ RS 232
  - Port 2. แบบ IEEE 488 จะสามารถปรับได้ละเอียดกว่า
  - ต่อเข้ากับ โปรแกรมคอมพิวเตอร์

รูปที่ 3.7 Interred ในเครื่อง Piezosystem jena

โดยใน โครงการงานพิเศษนี้จะใช้แบบ Port 1 เพราะไม่มีการใช้ card แปลงสัญญาณเนื่องจากอุปกรณ์ดังกล่าวมีราคาสูง และเกินความจำเป็น

### 3.2.5 วงจรขับกระแสและวงจรแปลงกระแสและขยายสัญญาณ

วงจรขับกระแส เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ควบคุมการป้อนกระแสให้แก่เลเซอร์ไดโอด เพื่อให้เลเซอร์ไดโอดสามารถทำงาน ณ จุดทำงานที่กำหนดเฉพาะของเลเซอร์นั้นๆ สำหรับเลเซอร์ไดโอดที่ใช้ในโครงการพิเศษนี้มีค่ากระแสขีดเริ่ม (Threshold Current,  $I_{th}$ ) ที่ 46 mA และกระแสทำงาน (Operating Current,  $I_{op}$ ) ในช่วง 75 – 125 mA ดังนั้นวงจรขับกระแสจะต้องสามารถควบคุมกระแสได้จาก 0 – 130 mA ซึ่งทำได้โดยใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ 10 K ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วงจรขับกระแส

และในวงจรในส่วนที่เป็นวงจร Slow Starter เป็นวงจรที่ป้องกันเลเซอร์ไดโอดเสียหายเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าอย่างฉับพลันในขณะที่เปิดสวิตช์แหล่งจ่ายแรงดันและควบคุมกระแสที่ไหลผ่านเลเซอร์ไดโอดด้วยทรานซิสเตอร์  $Q_3$ ,  $Q_4$  ซึ่งกระแสเอาต์พุต ( $I_C$ ) ของทรานซิสเตอร์แปรผันตรงกับกระแสอินพุต ( $I_B$ )

$$I_C = \beta I_B \quad (3.1)$$

$\beta$  คือ อัตราขยายทางแสง

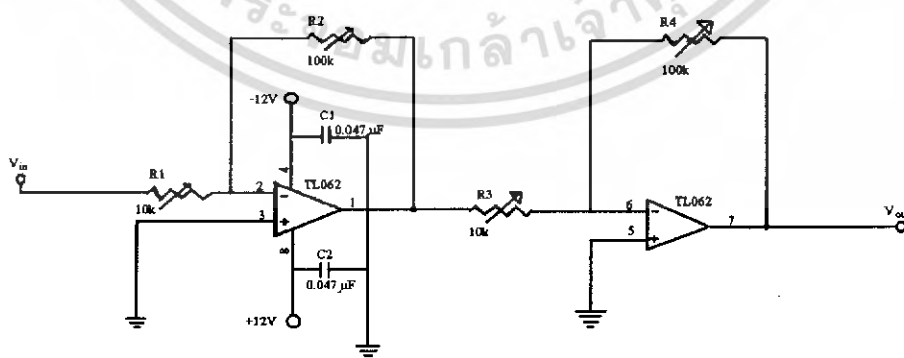
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกระแส  $I_B$  เพิ่มขึ้นปริมาณของกระแส  $I_C$  จะเพิ่มขึ้นด้วย กระแส  $I_B$  ควบคุมได้ด้วยการปรับค่าความต้านทานที่ตัวต้านทานปรับค่า  $R_{14} = 10K$  ผ่านคอมพิวเตอร์ ซึ่งเทียบกับค่ากราวน์ โดยเริ่มต้นก่อนเปิดสวิทช์แหล่งจ่ายแรงดันควรปรับค่าความต้านทานให้มีค่าที่ต่ำสุด จะทำให้กระแส  $I_B$  มีค่าเป็นศูนย์ จากนั้นค่อยๆ ปรับค่าความต้านทานเพิ่มมากขึ้นจะทำให้กระแส  $I_B$  เพิ่มขึ้น และส่งผลให้ค่ากระแส  $I_C$  เพิ่มขึ้นด้วย เมื่อปรับจนถึงค่ากระแสขีดเริ่มที่ 50 mA แล้วจะต้องค่อยๆ ปรับกระแสให้เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนถึงค่ากระแสทำงาน เนื่องจากเมื่อผ่านจุดกระแสขีดเริ่มไปแล้ว เลเซอร์ไดโอดจะเปล่งแสงแบบ Stimulated Emission และกำลังเอาต์พุตจะเพิ่มขึ้นแม้ว่ากระแสจะมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งหากปรับค่ากระแสเกินค่ากระแสทำงานอาจก่อให้เกิดการเสียหายของเลเซอร์ได้ เมื่อเลเซอร์ไดโอดทำงานด้วยกระแสทำงานที่คงที่แล้วจะทำให้ค่ากำลังเอาต์พุตตามที่กำหนดเฉพาะของเลเซอร์นั้น

เมื่อแสงเลเซอร์ตกกระทบวัตถุทดสอบและสะท้อนกลับในแนวเดิมของลำแสงเข้าสู่เลเซอร์ เลวี่ตีแล้วจะเกิดการเปลี่ยนแปลงในคุณสมบัติและกำลังเอาต์พุตของเลเซอร์ ซึ่งสามารถตรวจจับสัญญาณได้ด้วยโฟโตไดโอดที่อยู่ในตัวเลเซอร์ไดโอด โฟโตไดโอดเมื่อได้รับแสงจะสร้างกระแสโฟโตและเข้าสู่วงจรแปลงและขยายสัญญาณ ซึ่งเป็นวงจรขยายสัญญาณจากโฟโตไดโอดซึ่งมีขนาดเล็กมากประมาณระดับ mV ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยอัตราขยายเท่ากับ

$$\frac{R_f}{R_{in}} = \frac{R_2}{R_1} \quad (3.2)$$

โดยในที่นี้  $R_2 = 100K$  และ  $R_1 = 10K$  จะได้อัตราขยายเท่ากับ 100 เท่า เพื่อเป็นการสะดวกในการวัดและวิเคราะห์ผล โดยแสดงผลออกมาแบบของแรงดันไฟฟ้า แผนภาพวงจรแสดงดังรูปที่ 3.9



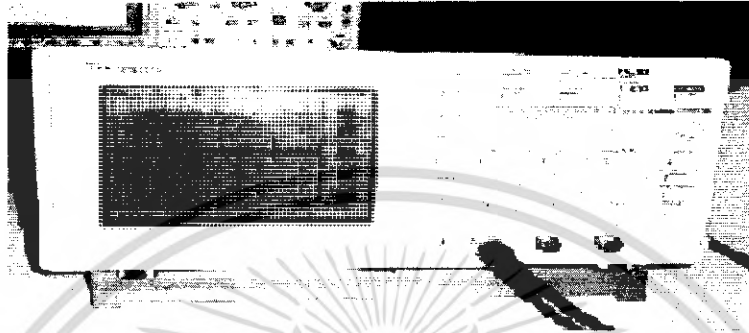
วงจรแปลงและขยายสัญญาณแสง

รูปที่ 3.9 วงจรแปลงและวงจรขยายสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.6 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)

ใช้ดูค่าความเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็น โวลต์ ที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 3.10 ออสซิลโลสโคป

### 3.2.7 วัสดุที่นำมาทำการทดลอง

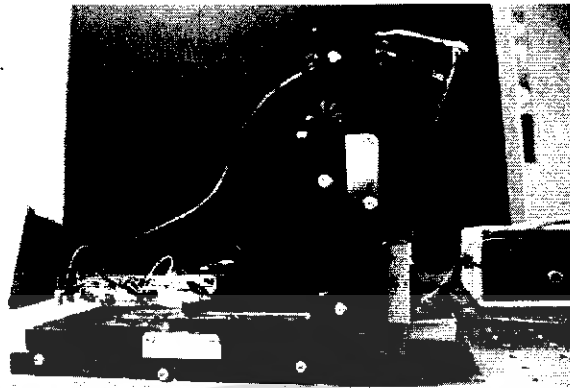


รูปที่ 3.11 แผ่นโลหะทดสอบ

### 3.2.8 ชุดวางเดือนไมโครมิเตอร์

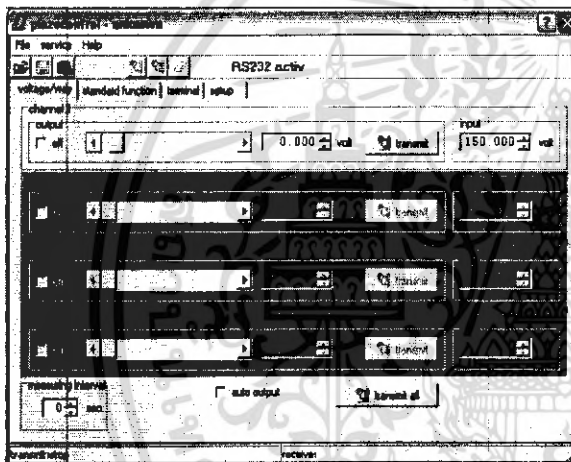
ใช้สำหรับยึดติดกับ Piezosystem 200 OEM เพื่อให้สามารถปรับเลื่อนตำแหน่งและทิศทางต่างๆได้ตามต้องการ โดยงานวิจัยนี้ได้ออกแบบให้สามารถปรับเลื่อนตำแหน่งได้ ทิศทางเดียว ซึ่งมีค่าความละเอียดของสเกลเท่ากับ 10 ไมโครเมตร เป็นของบริษัท Newport Model 443 สามารถปรับได้ระยะทาง 50 มิลลิเมตร ลักษณะของชุดวางเลื่อนจะเป็นดังรูปที่ 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

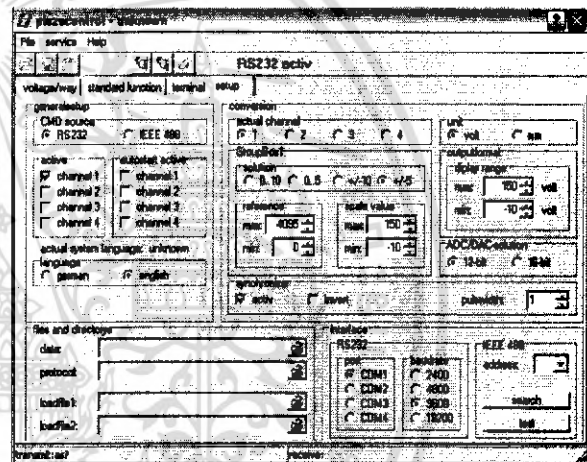


รูปที่ 3.12 ชุดกลางเลื่อนไมโครมิเตอร์

3.3 ระบบการตั้งงาน Piezosystem



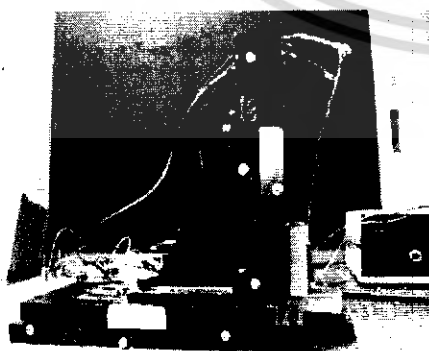
(ก)



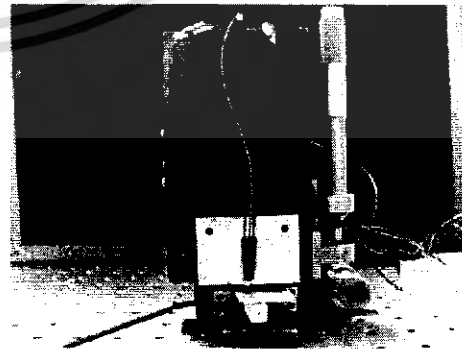
(ข)

รูปที่ 3.13 ก. ระบบป้อนค่าระยะกระจัด และ ข. ระบบ Set up เครื่อง Piezosystem

3.4 ระบบการวางชิ้นทดสอบ



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.14 ก. ด้านข้างวางเลื่อน และ ข. ด้านหน้าวางเลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 ระบบการวางเครื่องมือ

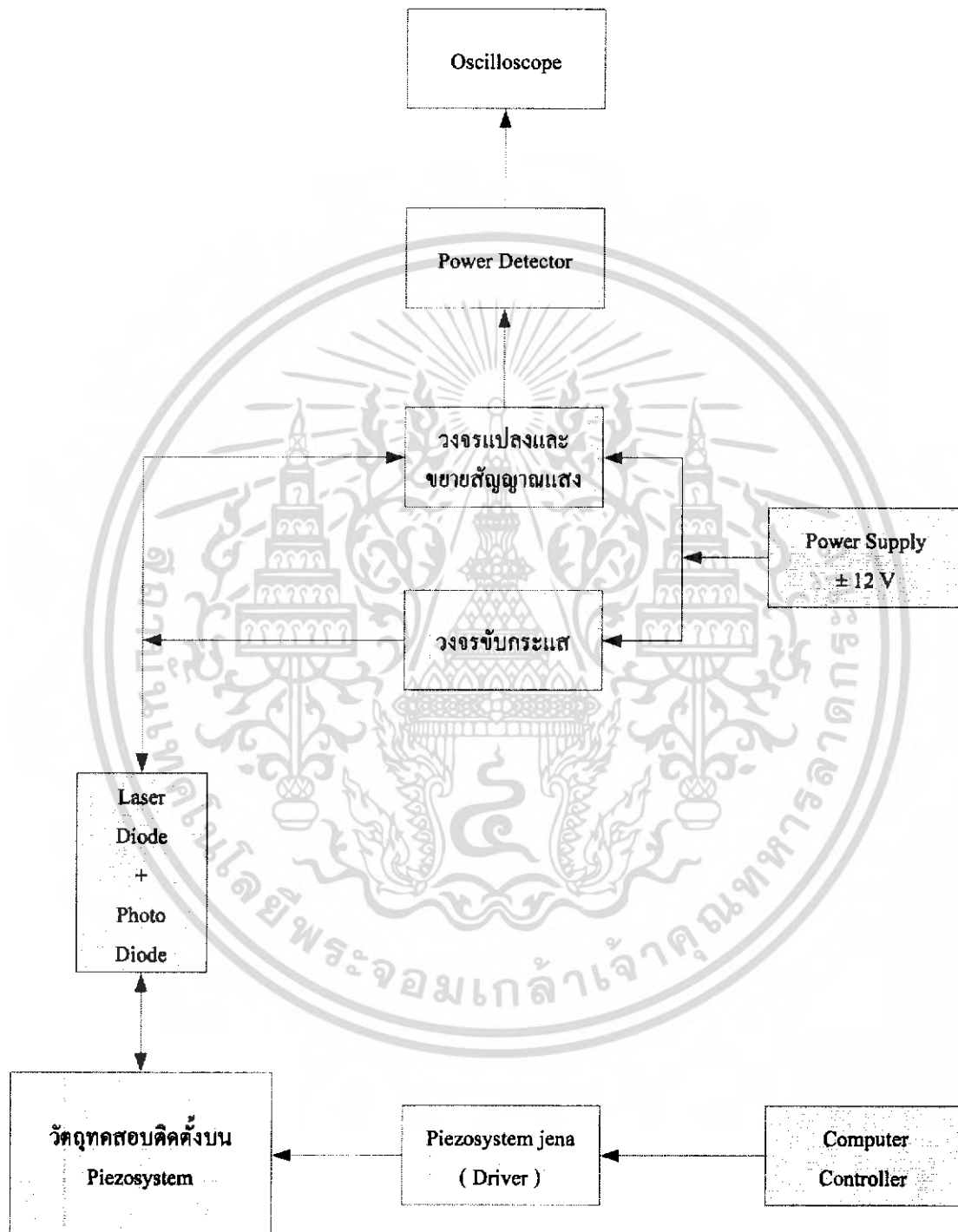


รูปที่ 3.15 ระบบการวัดทางแสง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.1 แผนผังระบบการวางเครื่องมือ



รูปที่ 3.16 แผนผังระบบการวางเครื่องมือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ผลของการทดลองของหลักการวัดโดยเทคนิคเซลฟ์มิกซิ่ง หรือ การย้อนกลับทางแสง ภายนอก ของกราฟการปรับเทียบและการวัดลักษณะของพื้นผิวของแผ่นโลหะต่างๆ ที่มีลักษณะพื้นผิวเรียบ เป็นไปตามนี้คือ

#### 4.1) ผลการทดสอบและการกำหนดเงื่อนไขของระบบการวัด

ก่อนทำการวัดทางแสง จะต้องจัดระบบการวัดทางแสงให้เหมาะสม ซึ่งต้องคำนึงถึงการจัดแนวแสง โดยให้แนวลำแสงที่ออกจากเลเซอร์ มีแนวลำแสงของการตกกระทบและแนวลำแสงของสะท้อนกลับจากพื้นผิวเป็นแนวเดียวกันและทำการกำหนดเงื่อนไขของระบบการวัดได้แก่ ค่าการเปลี่ยนแปลงของระยะกระจัดบนแผ่นโลหะพื้นเรียบ โดยทำการวัดในระยะกระจัดเพิ่มค่าขึ้นและย้อนกลับค่าเดิม

#### 4.2) ค่าการทำงานของกระแส

การเลือกค่ากระแสสำหรับการวัดในงานทดลองนี้ จะพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วกับกำลังเอาต์พุทของเลเซอร์ไดโอด ซึ่งผลจากการวัดบันทึกเป็นดังตารางที่ 4.1 และทำการเขียนรูปกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.1

**ตารางที่ 4.1** ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสขั้วและค่ากำลังเอาต์พุตของเลเซอร์ ครั้งที่ 1

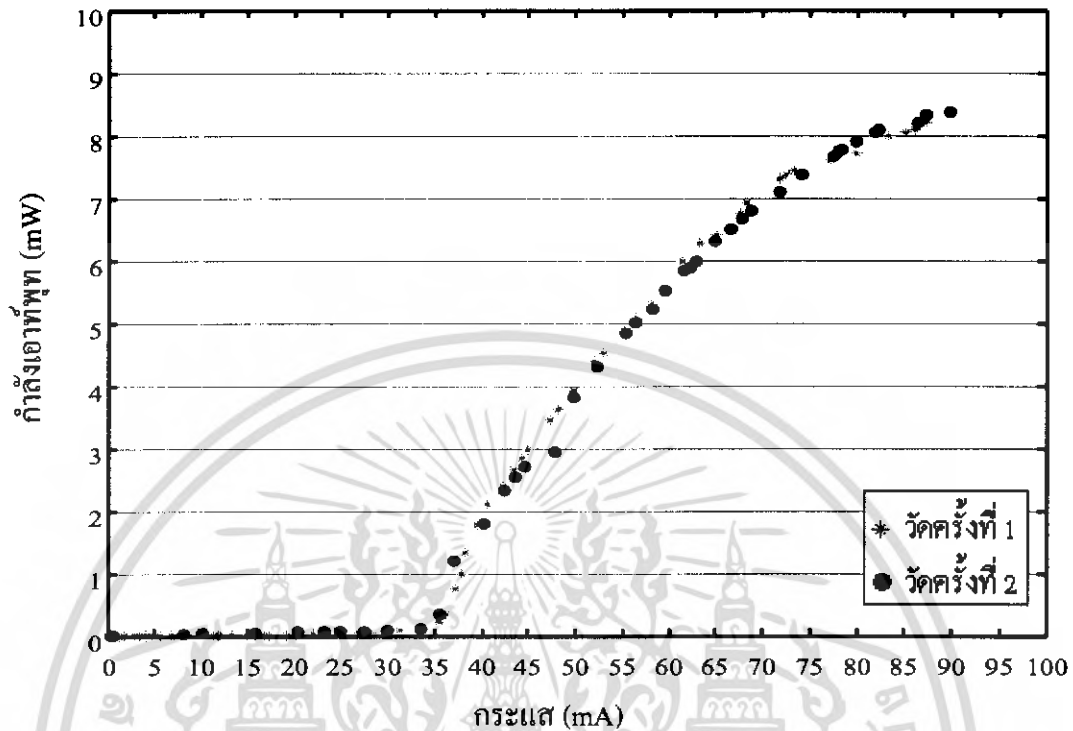
ค่ากระแส (mA)	ค่ากำลังเอาต์พุต (mW)	ค่ากระแส (mA)	ค่ากำลังเอาต์พุต (mW)
1.2	0.000	37.9	1.230
1.8	0.002	38.2	1.470
2.9	0.002	39.5	1.810
3.4	0.002	40.6	2.112
4.1	0.003	42.3	2.391
4.8	0.003	43.4	2.664
5.7	0.005	44.3	2.848
6.8	0.005	45	2.980
7.2	0.006	47.3	3.450
11.3	0.008	48.2	3.620
11.9	0.009	49.8	3.922
12.1	0.009	52	4.400
13.4	0.011	53	4.522
15.1	0.012	55.2	4.876
15.9	0.013	56.4	5.082
16.2	0.013	58	5.300
16.9	0.015	61.5	6.000
17.4	0.016	63.3	6.260
19.2	0.018	65.2	6.420
20.2	0.021	67.6	6.760
22.1	0.024	68.4	6.928
23.5	0.031	71.9	7.300
27	0.049	72.6	7.365
28.2	0.060	73.4	7.430
29.6	0.081	77.2	7.600
31.4	0.121	79.9	7.710
33.5	0.220	83.3	7.990
35.5	0.702	85.1	8.052
36.3	0.814	86.2	8.087
37.2	1.080	87.3	8.210

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.2** ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสขั้วและค่ากำลังเอาต์พุตของเลเซอร์ ครั้งที่ 2

ค่ากระแส (mA)	ค่ากำลังเอาต์พุต (mW)	ค่ากระแส (mA)	ค่ากำลังเอาต์พุต (mW)
0.40	0.008	56.4	5.020
0.60	0.020	58.2	5.216
8.20	0.032	59.6	5.525
10.2	0.044	61.6	5.846
15.8	0.055	62.2	5.878
20.5	0.064	62.9	6.000
23.3	0.07	65.0	6.302
25.0	0.077	66.6	6.500
27.4	0.085	67.8	6.680
30.0	0.090	68.9	6.800
33.6	0.120	71.8	7.100
35.6	0.352	74.2	7.380
37.0	1.210	77.6	7.660
40.2	1.788	78.0	7.750
42.4	2.320	78.4	7.780
43.6	2.535	79.9	7.902
44.6	2.720	82.0	8.050
47.8	2.950	82.3	8.090
49.8	3.828	86.4	8.200
52.4	4.310	87.3	8.340
55.4	4.850	89.8	8.370

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.1** ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วเลเซอร์และค่ากำลังเอาต์พุตของเลเซอร์

จากกราฟดังแสดงดังรูปที่ 4.1 ได้ว่าผลที่ได้เป็นไปตามทฤษฎีของเลเซอร์ที่ว่า ขณะที่ปรับกระแสขั้วเลเซอร์เพิ่มขึ้น ค่ากำลังเอาต์พุตมีค่าเพิ่มขึ้น โดยในช่วงแรกค่ากำลังเอาต์พุตจะเพิ่มขึ้นทีละน้อยและเมื่อมาถึงจุดๆ หนึ่ง ที่เป็นจุดกระแสขีดเริ่ม ค่ากำลังเอาต์พุตมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่มีการปรับเพิ่มกระแสขึ้นเพียงเล็กน้อย และกระแสช่วงที่เหมาะสมสำหรับการใช้ 75 – 87.3 mA เนื่องจากเป็นช่วงที่มีความเป็นเชิงเส้น เพราะฉะนั้นจึงเลือกกระแสที่ใช้ในการวัดที่ค่าประมาณ 85 mA

#### 4.3) ผลการสร้างกราฟจากการวัด

ในการทำการทดสอบนี้จะพิจารณาการสะท้อนกลับของแสงจากพื้นผิวโลหะทดสอบและเข้าสู่โฟโตไดโอด โดยที่มีการควบคุมระยะกระจัดของการเลื่อนวัตถุทดสอบ และที่ตำแหน่งของเลเซอร์ที่ขีดติดอยู่กับที่ โดยจะแบ่งออกเป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.1 การสะท้อนกลับของแสงเข้าสู่โฟโตไดโอด ในลักษณะแชนเนลไดโอดอยู่กับที่และมี การเลื่อนวัตถุทดสอบในแนวแกน X

ขั้นตอนการสร้างกราฟทำโดยใช้ แผ่นโลหะแต่ละชนิด ได้แก่ เหล็กฉนวน แผ่นทองแดง แผ่นสังกะสี และแผ่นอลูมิเนียมนำมาติดตั้งบนตัว Piezosystem ในแนวนอนที่มีทิศทางในไปทาง แกน X และติดตั้งหัววัดเลเซอร์ที่ยึดติดกับชุดรางเลื่อนไมโครมิเตอร์ โดยให้หัววัดเลเซอร์ที่ติดอยู่บน รางเลื่อนในแนวตั้งนั้นยึดติดอยู่กับที่ และมีระยะห่างจากแผ่นทดสอบเป็นระยะ 5 mm แล้วทำการ ควบคุมแรงดันที่ Piezosystem jena ทำการปรับเพิ่มขึ้นทีละ  $3 \mu\text{m}$  โดยจะมีทิศทางในการเลื่อนใน แนวแกน X จะทำการวัดกับชิ้นงานทั้ง 4 ชนิด แต่ละชนิดทำการวัดอย่างละ 3 ครั้ง ผลการทดลอง ของชิ้นงานทั้ง 4 ชนิดเป็นดังตารางที่ 4.2 – 4.5 ตามลำดับ และนำผลของการวัดสำหรับชิ้นงานแต่ละ ชนิดมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณสะท้อนกลับและระยะการกระจัดดังรูปที่ 4.2 – 4.5 และเพื่อเป็นการชดเชยค่าลึงเอาท์พุทที่ไม่เท่ากันเนื่องจากความแตกต่างในเรื่องของการทำการ ทดลองและพลังงานที่ใช้ที่อาจเกิดขึ้นในการวัดสำหรับแต่ละชิ้นงานสามารถทำได้โดยใช้วิธีนอร์ มัลไลซ์ (Normalized) ข้อมูล โดย

$$I_{normalized} = I_d = \frac{V_d}{V_o} \quad (4.1)$$

เมื่อ	$V_d$	คือ	ค่าสัญญาณย้อนกลับที่ตำแหน่งใดๆ
	$V_o$	คือ	ค่าสัญญาณสูงสุดของชุดข้อมูล
	$I_d$	คือ	ความเข้มแสงเปรียบเทียบ

จากนั้นทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงเปรียบเทียบกับระยะการกระจัดที่ เท่ากันของชิ้นงานแต่ละชนิดดังรูปที่ 4.6 – 4.9

**ตารางที่ 4.3** การสร้างกราฟเปรียบเทียบสำหรับเหล็กผิวมันในแนวเลื่อนแกน X

ระยะการกระจัด $\mu\text{m}$	สัญญาณย้อนกลับ ( $v_d, V$ )				ความเข้มแสงเปรียบเทียบ $I_d = v_d/v_0$
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
0	1.4789	1.4731	1.4787	1.4769	0.9987
3	1.4706	1.4784	1.4702	1.4731	0.9961
6	1.4735	1.4757	1.4777	1.4756	0.9978
9	1.4781	1.4737	1.4797	1.4772	0.9989
12	1.4701	1.4770	1.4799	1.4757	0.9978
15	1.4714	1.4755	1.4779	1.4749	0.9973
18	1.4720	1.4744	1.4744	1.4736	0.9964
21	1.4720	1.4769	1.4750	1.4746	0.9971
24	1.4760	1.4762	1.4721	1.4748	0.9972
27	1.4727	1.4779	1.4764	1.4757	0.9978
30	1.4720	1.4796	1.4732	1.4749	0.9973
33	1.4702	1.4752	1.4796	1.4750	0.9974
36	1.4775	1.4788	1.4773	1.4779	0.9993
39	1.4745	1.4717	1.4741	1.4734	0.9963
42	1.4793	1.4798	1.4774	1.4788	1.0000
45	1.4747	1.4727	1.4727	1.4734	0.9963
48	1.4742	1.4725	1.4744	1.4737	0.9965
51	1.4785	1.4788	1.4793	1.4789	1.0000
54	1.4753	1.4774	1.4768	1.4765	0.9984
57	1.4720	1.4714	1.4721	1.4718	0.9952
60	1.4767	1.4701	1.4784	1.4751	0.9974
63	1.4784	1.4789	1.4763	1.4779	0.9993
66	1.4702	1.4720	1.4713	1.4712	0.9948
69	1.4768	1.4730	1.4721	1.4740	0.9967
72	1.4738	1.4766	1.4761	1.4755	0.9977
75	1.4783	1.4728	1.4763	1.4758	0.9979

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีฉุกเฉินเพื่อจัดการกับภัยพิบัติเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.3** การสร้างกราฟเปรียบเทียบสำหรับเหล็กฉนวนในแนวเดือนแกน X (ต่อ)

ระยะการกระจัด $\mu\text{m}$	สัญญาณย้อนกลับ ( $v_d, V$ )				ความเข้มแสงเปรียบเทียบ $I_d = v_d/v_0$
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
78	1.4750	1.4747	1.4737	1.4745	0.9970
81	1.4771	1.4706	1.4758	1.4745	0.9971
84	1.4743	1.4799	1.4745	1.4762	0.9982
87	1.4730	1.4758	1.4704	1.4731	0.9961
90	1.4719	1.4742	1.4703	1.4721	0.9955
93	1.4719	1.4752	1.4731	1.4734	0.9963
96	1.4768	1.4733	1.4701	1.4734	0.9963
99	1.4730	1.4743	1.4738	1.4737	0.9965
102	1.4754	1.4723	1.4768	1.4748	0.9973
105	1.4715	1.4758	1.4709	1.4727	0.9959
108	1.4770	1.4776	1.4704	1.4750	0.9974
111	1.4738	1.4753	1.4761	1.4751	0.9974
114	1.4786	1.4764	1.4761	1.4770	0.9988
117	1.4785	1.4721	1.4702	1.4736	0.9964
120	1.4759	1.4738	1.4702	1.4733	0.9962
123	1.4750	1.4778	1.4719	1.4749	0.9973
126	1.4790	1.4768	1.4759	1.4772	0.9989
129	1.4782	1.4746	1.4706	1.4745	0.9970
132	1.4764	1.4757	1.4737	1.4753	0.9976
135	1.4782	1.4779	1.4763	1.4775	0.9991
138	1.4766	1.4706	1.4772	1.4748	0.9973
141	1.4734	1.4760	1.4769	1.4754	0.9977
144	1.4729	1.4705	1.4708	1.4714	0.9950
147	1.4734	1.4742	1.4745	1.4740	0.9967
150	1.4753	1.4730	1.4744	1.4742	0.9969

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.4** การสร้างกราฟเปรียบเทียบสำหรับแผ่นทองแดงในแนวเดือนแกน X

ระยะการกระจัด $\mu\text{m}$	สัญญาณย้อนกลับ ( $v_d, V$ )				ความเข้มแสงเปรียบเทียบ $I_d = v_d/v_0$
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
0	1.3990	1.3937	1.3972	1.3966	0.9966
3	1.4025	1.3937	1.3996	1.3986	0.9980
6	1.3959	1.3931	1.3997	1.3962	0.9963
9	1.4019	1.3953	1.4026	1.3999	0.9989
12	1.3940	1.3982	1.3949	1.3957	0.9959
15	1.3937	1.3976	1.3941	1.3951	0.9955
18	1.3953	1.4000	1.3987	1.3980	0.9976
21	1.4023	1.3988	1.4027	1.4013	0.9999
24	1.3936	1.3981	1.3932	1.3950	0.9954
27	1.3956	1.3937	1.4017	1.3970	0.9968
30	1.4030	1.3949	1.3933	1.3971	0.9969
33	1.3951	1.3968	1.3982	1.3967	0.9966
36	1.3980	1.3958	1.3949	1.3962	0.9963
39	1.3959	1.4007	1.4002	1.3989	0.9982
42	1.3997	1.3961	1.3955	1.3971	0.9969
45	1.4026	1.3994	1.4023	1.4014	1.0000
48	1.4007	1.4029	1.3944	1.3993	0.9985
51	1.3997	1.3980	1.3982	1.3986	0.9980
54	1.3943	1.4025	1.4020	1.3996	0.9987
57	1.3940	1.4013	1.4024	1.3992	0.9984
60	1.3931	1.4022	1.3964	1.3972	0.9970
63	1.3959	1.3941	1.3974	1.3958	0.9960
66	1.4012	1.4011	1.3977	1.4000	0.9990
69	1.4029	1.4021	1.3945	1.3998	0.9989
72	1.3932	1.3946	1.3944	1.3941	0.9947
75	1.4012	1.3942	1.3983	1.3979	0.9975

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.4** การสร้างกราฟเปรียบเทียบสำหรับแผ่นทองแดงในแนวเดือนแกน X (ต่อ)

ระยะการกระจัด $\mu\text{m}$	สัญญาณย้อนกลับ ( $v_d, V$ )				ความเข้มแสงเปรียบเทียบ $I_d = v_d/v_0$
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
78	1.3992	1.4006	1.4003	1.4000	0.9990
81	1.3986	1.4002	1.3970	1.3986	0.9980
84	1.3954	1.3995	1.3966	1.3972	0.9970
87	1.4012	1.4005	1.3959	1.3992	0.9984
90	1.3956	1.3996	1.4017	1.3990	0.9982
93	1.4005	1.4018	1.3993	1.4005	0.9994
96	1.3996	1.3957	1.3954	1.3969	0.9968
99	1.3951	1.3972	1.4028	1.3984	0.9978
102	1.3990	1.3951	1.3994	1.3978	0.9974
105	1.3990	1.3934	1.3953	1.3959	0.9961
108	1.3996	1.3938	1.3998	1.3977	0.9974
111	1.3948	1.4015	1.3997	1.3987	0.9980
114	1.3994	1.3964	1.3943	1.3967	0.9966
117	1.3947	1.3977	1.3932	1.3952	0.9956
120	1.3984	1.4021	1.3956	1.3987	0.9981
123	1.3992	1.3953	1.3942	1.3962	0.9963
126	1.3999	1.4016	1.3937	1.3984	0.9978
129	1.3998	1.3996	1.4015	1.4003	0.9992
132	1.4018	1.4019	1.3948	1.3995	0.9986
135	1.3931	1.3979	1.3933	1.3948	0.9952
138	1.3961	1.4029	1.4003	1.3998	0.9988
141	1.4008	1.3967	1.3984	1.3986	0.9980
144	1.3961	1.3983	1.3958	1.3967	0.9967
147	1.4023	1.3948	1.3967	1.3979	0.9975
150	1.3998	1.3980	1.3931	1.3970	0.9968

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.5** การสร้างกราฟเปรียบเทียบสำหรับแผ่นสังกะสีในแนวเลื่อนแกน X

ระยะการกระจัด $\mu\text{m}$	สัญญาณย้อนกลับ ( $v_d, V$ )				ความเข้มแสงเปรียบเทียบ $I_d = v_d/v_0$
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
0	1.4617	1.4614	1.4605	1.4612	0.9966
3	1.4623	1.4648	1.4615	1.4629	0.9978
6	1.4639	1.4585	1.4599	1.4608	0.9963
9	1.4637	1.4616	1.4629	1.4627	0.9977
12	1.4652	1.4630	1.4621	1.4634	0.9981
15	1.4631	1.4623	1.4626	1.4627	0.9976
18	1.4658	1.4636	1.4641	1.4645	0.9989
21	1.4629	1.4642	1.4587	1.4619	0.9971
24	1.4599	1.4591	1.4611	1.4600	0.9958
27	1.4650	1.4670	1.4641	1.4654	0.9995
30	1.4678	1.4655	1.4598	1.4644	0.9988
33	1.4661	1.4659	1.4642	1.4654	0.9995
36	1.4650	1.4661	1.4605	1.4639	0.9984
39	1.4628	1.4647	1.4639	1.4638	0.9984
42	1.4591	1.4600	1.4631	1.4607	0.9963
45	1.4646	1.4607	1.4626	1.4626	0.9976
48	1.4617	1.4643	1.4634	1.4631	0.9979
51	1.4594	1.4634	1.4674	1.4634	0.9981
54	1.4637	1.4586	1.4614	1.4612	0.9966
57	1.4662	1.4589	1.4620	1.4624	0.9974
60	1.4647	1.4607	1.4611	1.4622	0.9973
63	1.4680	1.4621	1.4621	1.4641	0.9986
66	1.4676	1.4627	1.4609	1.4637	0.9983
69	1.4586	1.4671	1.4619	1.4625	0.9975
72	1.4616	1.4640	1.4630	1.4629	0.9978
75	1.4635	1.4613	1.4652	1.4633	0.9981

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.5** การสร้างกราฟเปรียบเทียบสำหรับแผ่นสังกะสีในแนวเลือนแกน X (ต่อ)

ระยะการกระจัด $\mu\text{m}$	สัญญาณย้อนกลับ ( $v_d, V$ )				ความเข้มแสงเปรียบเทียบ $I_d = v_d/v_0$
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
78	1.4606	1.4628	1.4611	1.4615	0.9968
81	1.4640	1.4640	1.4591	1.4624	0.9974
84	1.4585	1.4596	1.4624	1.4602	0.9959
87	1.4637	1.4663	1.4627	1.4642	0.9987
90	1.4650	1.4676	1.4581	1.4636	0.9982
93	1.4676	1.4640	1.4646	1.4654	0.9995
96	1.4655	1.4583	1.4652	1.4630	0.9978
99	1.4654	1.4661	1.4608	1.4641	0.9986
102	1.4623	1.4641	1.4606	1.4623	0.9974
105	1.4643	1.4650	1.4651	1.4648	0.9991
108	1.4660	1.4589	1.4658	1.4636	0.9982
111	1.4588	1.4622	1.4679	1.4630	0.9978
114	1.4675	1.4618	1.4627	1.4640	0.9985
117	1.4672	1.4597	1.4670	1.4646	0.9990
120	1.4640	1.4663	1.4625	1.4643	0.9987
123	1.4605	1.4664	1.4660	1.4643	0.9987
126	1.4667	1.4625	1.4663	1.4652	0.9993
129	1.4631	1.4676	1.4597	1.4635	0.9982
132	1.4653	1.4595	1.4619	1.4622	0.9973
135	1.4622	1.4667	1.4632	1.4640	0.9985
138	1.4676	1.4657	1.4652	1.4662	1.0000
141	1.4587	1.4624	1.4637	1.4616	0.9969
144	1.4635	1.4642	1.4626	1.4634	0.9981
147	1.4609	1.4675	1.4625	1.4636	0.9983
150	1.4666	1.4644	1.4589	1.4633	0.9980

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.6** การสร้างกราฟเปรียบเทียบสำหรับแผ่นอลูมิเนียมในแนวเดือนแกน X

ระยะการกระจัด $\mu\text{m}$	สัญญาณย้อนกลับ ( $v_d, V$ )				ความเข้มแสงเปรียบเทียบ $I_d = v_d/v_0$
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
0	1.3839	1.3758	1.3841	1.3813	0.9986
3	1.3837	1.3832	1.3826	1.3832	1.0000
6	1.3775	1.3769	1.3788	1.3778	0.9961
9	1.3807	1.3795	1.3783	1.3795	0.9974
12	1.3766	1.3751	1.3800	1.3773	0.9957
15	1.3809	1.3781	1.3806	1.3799	0.9976
18	1.3783	1.3838	1.3827	1.3816	0.9989
21	1.3816	1.3834	1.3828	1.3826	0.9996
24	1.3836	1.3783	1.3798	1.3806	0.9982
27	1.3807	1.3838	1.3830	1.3825	0.9995
30	1.3848	1.3798	1.3797	1.3814	0.9988
33	1.3829	1.3806	1.3770	1.3802	0.9979
36	1.3765	1.3812	1.3808	1.3795	0.9974
39	1.3833	1.3816	1.3817	1.3822	0.9993
42	1.3769	1.3812	1.3818	1.3800	0.9977
45	1.3814	1.3819	1.3844	1.3826	0.9996
48	1.3817	1.3801	1.3827	1.3815	0.9988
51	1.3827	1.3821	1.3824	1.3824	0.9995
54	1.3788	1.3802	1.3837	1.3809	0.9984
57	1.3794	1.3811	1.3849	1.3818	0.9990
60	1.3798	1.3847	1.3800	1.3815	0.9988
63	1.3811	1.3832	1.3813	1.3819	0.9991
66	1.3768	1.3782	1.3829	1.3793	0.9972
69	1.3750	1.3809	1.3795	1.3785	0.9966
72	1.3829	1.3763	1.3802	1.3798	0.9976
75	1.3801	1.3775	1.3767	1.3781	0.9964

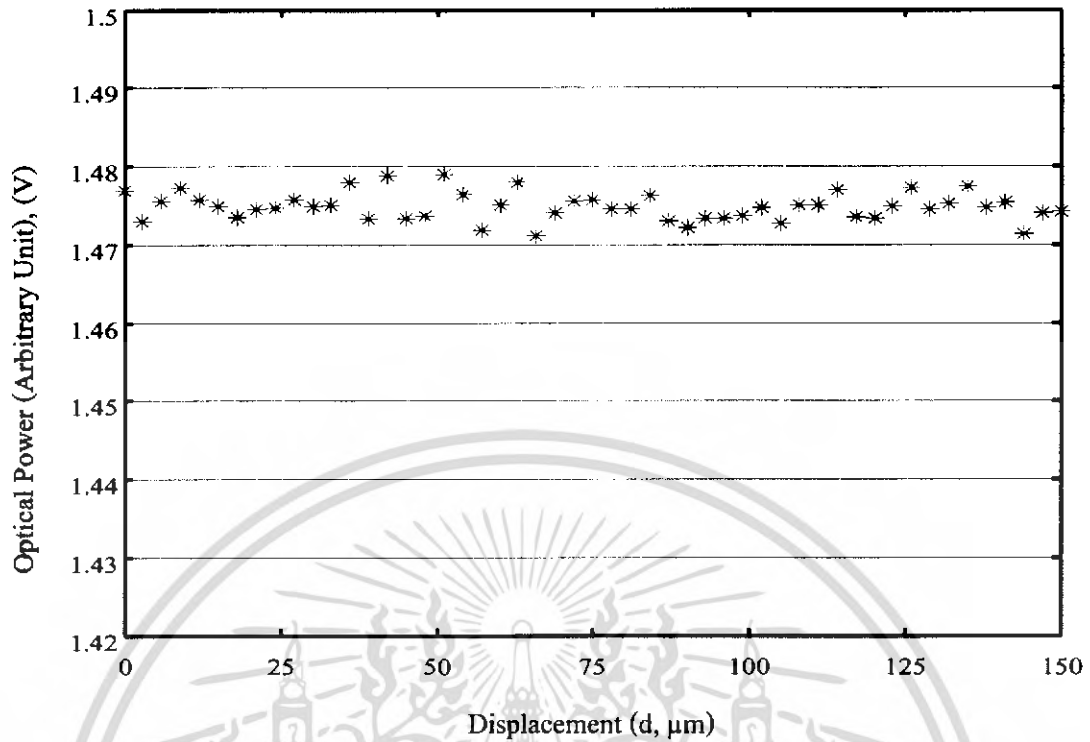
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับอาจารย์ที่สอนในหลักสูตรที่ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

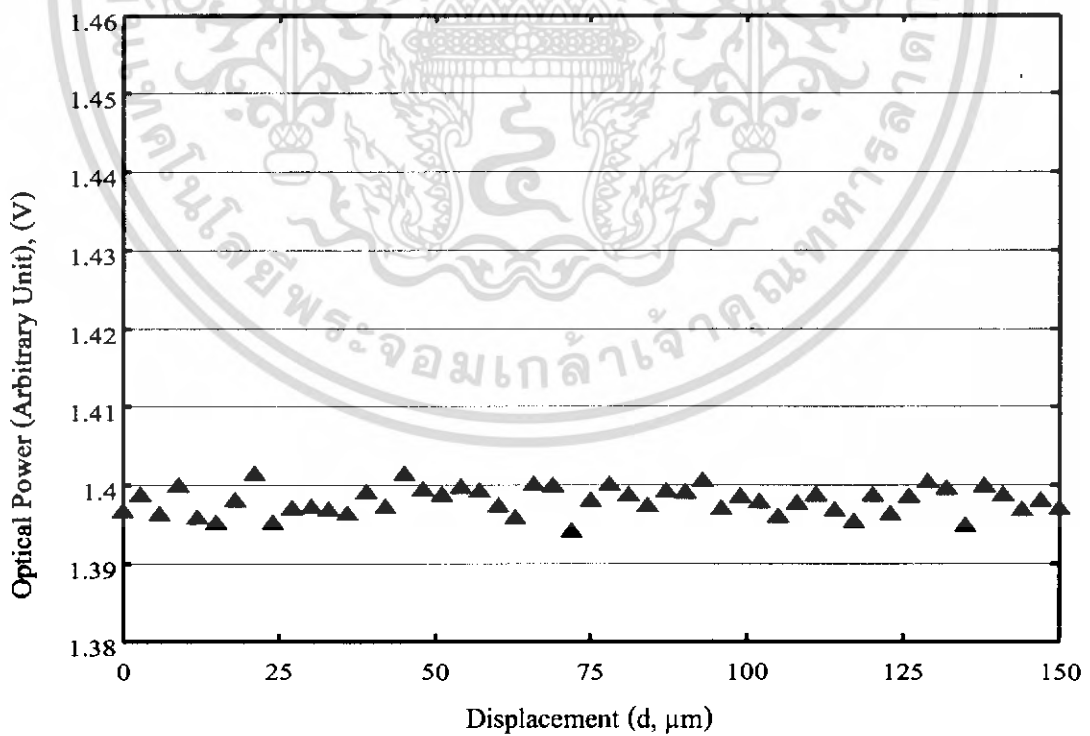
**ตารางที่ 4.6** การสร้างกราฟเปรียบเทียบสำหรับแผ่นอคูมิเนียมในแนวเดือนแกน X (ต่อ)

ระยะการกระจัด $\mu\text{m}$	สัญญาณย้อนกลับ ( $v_d, V$ )				ความเข้มแสงเปรียบเทียบ $I_d = v_d/v_0$
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
78	1.3771	1.3830	1.3763	1.3788	0.9969
81	1.3760	1.3817	1.3772	1.3783	0.9965
84	1.3766	1.3751	1.3761	1.3759	0.9948
87	1.3791	1.3806	1.3764	1.3787	0.9968
90	1.3791	1.3795	1.3796	1.3794	0.9973
93	1.3755	1.3840	1.3829	1.3808	0.9983
96	1.3844	1.3778	1.3778	1.3800	0.9977
99	1.3765	1.3757	1.3772	1.3765	0.9952
102	1.3788	1.3798	1.3841	1.3809	0.9984
105	1.3781	1.3848	1.3751	1.3793	0.9972
108	1.3767	1.3842	1.3809	1.3806	0.9982
111	1.3840	1.3806	1.3804	1.3817	0.9989
114	1.3782	1.3815	1.3815	1.3804	0.9980
117	1.3823	1.3827	1.3781	1.3811	0.9985
120	1.3791	1.3761	1.3773	1.3775	0.9959
123	1.3790	1.3750	1.3792	1.3777	0.9961
126	1.3801	1.3804	1.3780	1.3795	0.9974
129	1.3767	1.3751	1.3817	1.3778	0.9962
132	1.3802	1.3795	1.3844	1.3814	0.9987
135	1.3814	1.3770	1.3784	1.3789	0.9970
138	1.3752	1.3829	1.3806	1.3796	0.9974
141	1.3834	1.3812	1.3762	1.3802	0.9979
144	1.3830	1.3752	1.3767	1.3783	0.9965
147	1.3820	1.3839	1.3778	1.3812	0.9986
150	1.3796	1.3826	1.3806	1.3809	0.9984

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

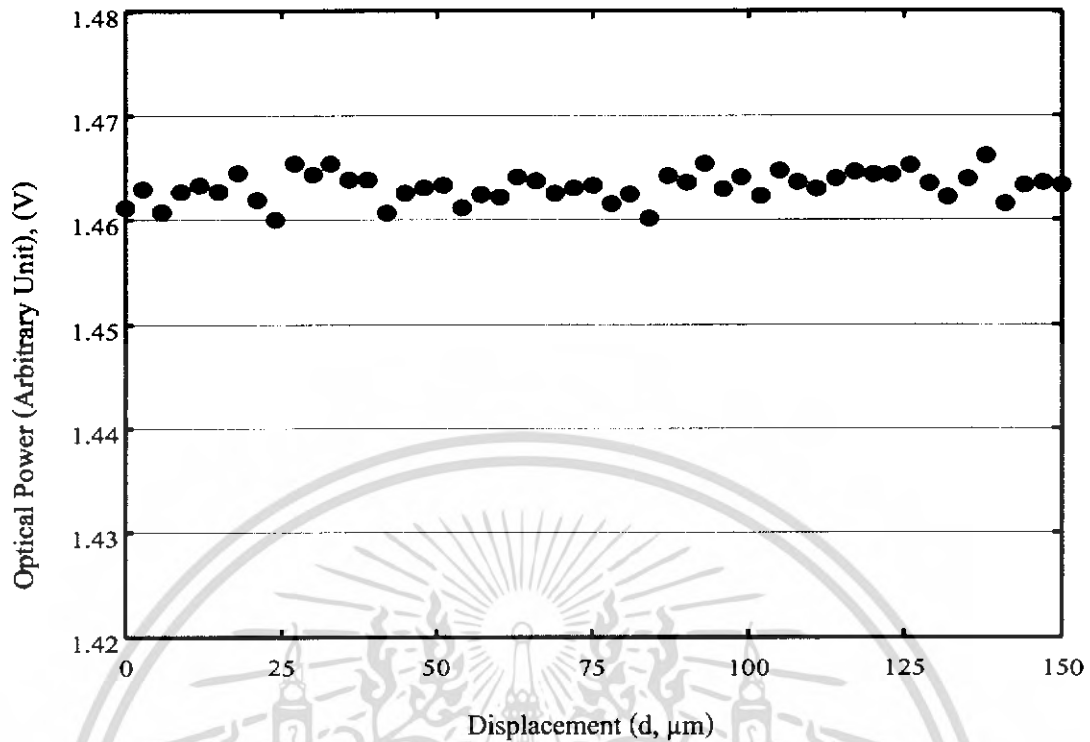


**รูปที่ 4.2** ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณสะท้อนกลับและที่ระยะการกระจัดทีละ  $3 \mu\text{m}$  ของผลเฉลี่ยของเหล็กผิวมันในแนวเลื่อนแกน X

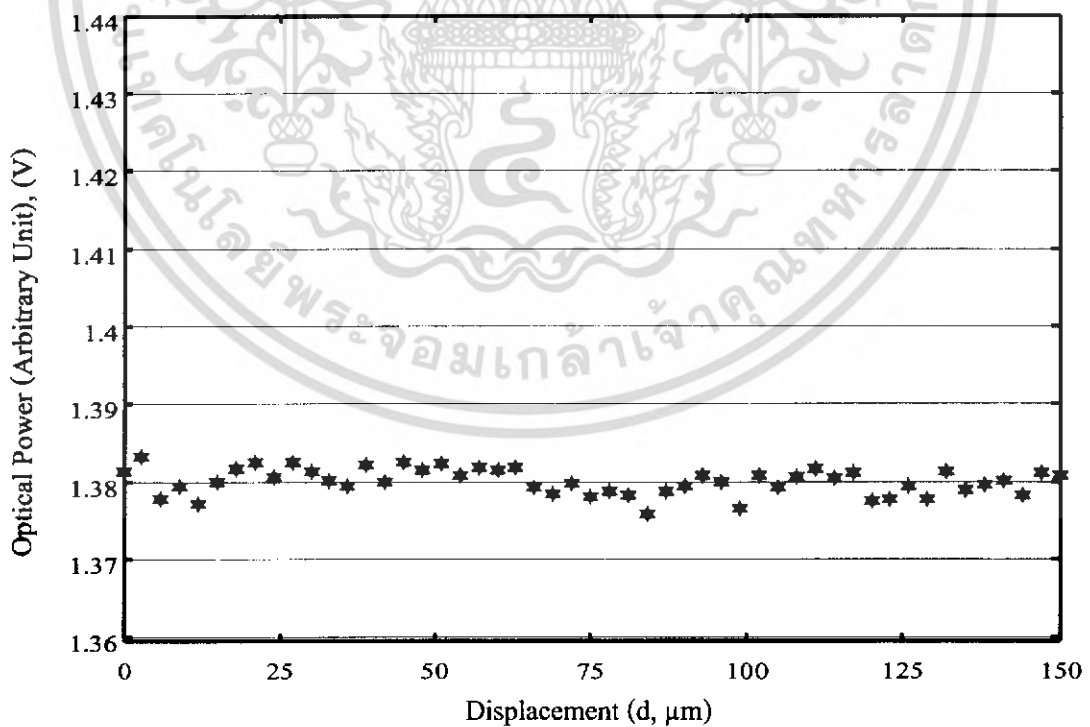


**รูปที่ 4.3** ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณสะท้อนกลับและที่ระยะการกระจัดทีละ  $3 \mu\text{m}$  ของผลเฉลี่ยของแผ่นทองแดงในแนวเลื่อนแกน X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



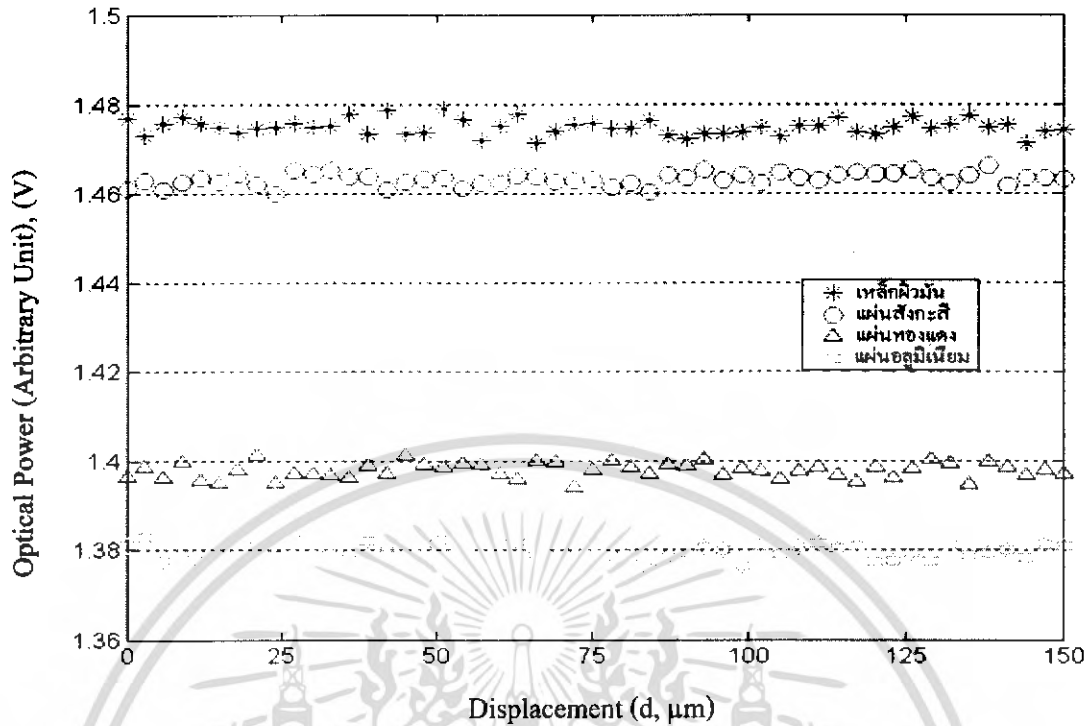
**รูปที่ 4.4** ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณสะท้อนกลับและที่ระยะการกระจัดทีละ  $3 \mu\text{m}$  ของผลเฉลี่ยของแผ่นสังกะสีในแนวเดือนแกน X



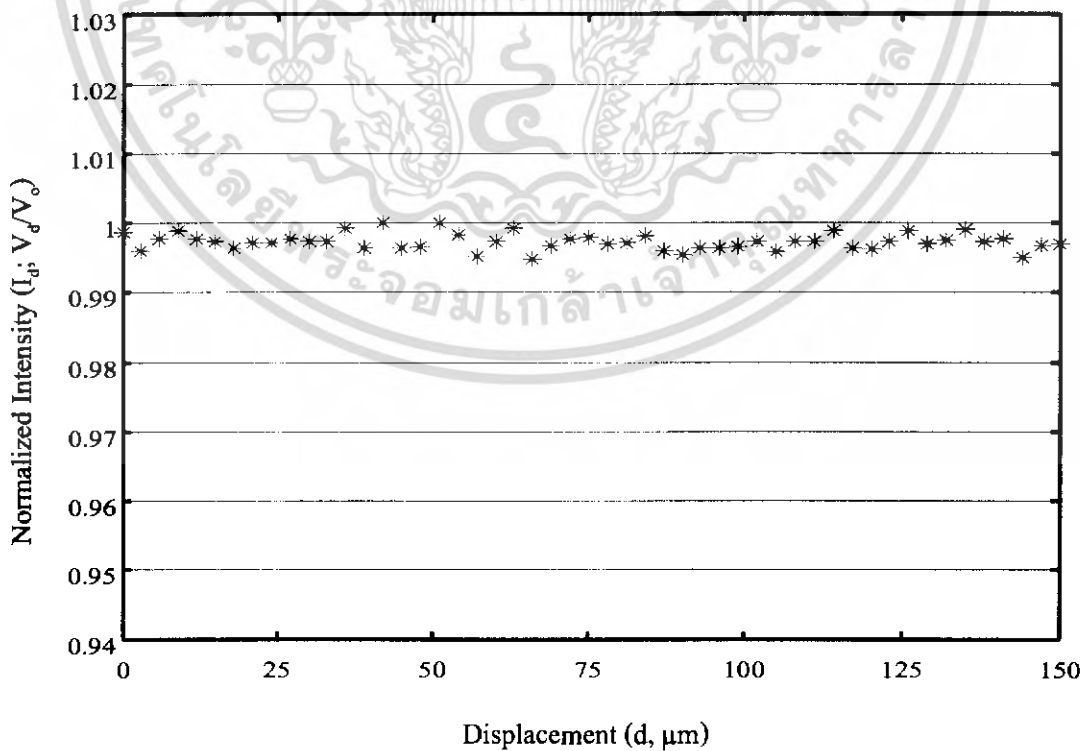
**รูปที่ 4.5** ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณสะท้อนกลับและที่ระยะการกระจัดทีละ

$3 \mu\text{m}$  ของผลเฉลี่ยของแผ่นอลูมิเนียมในแนวเดือนแกน X

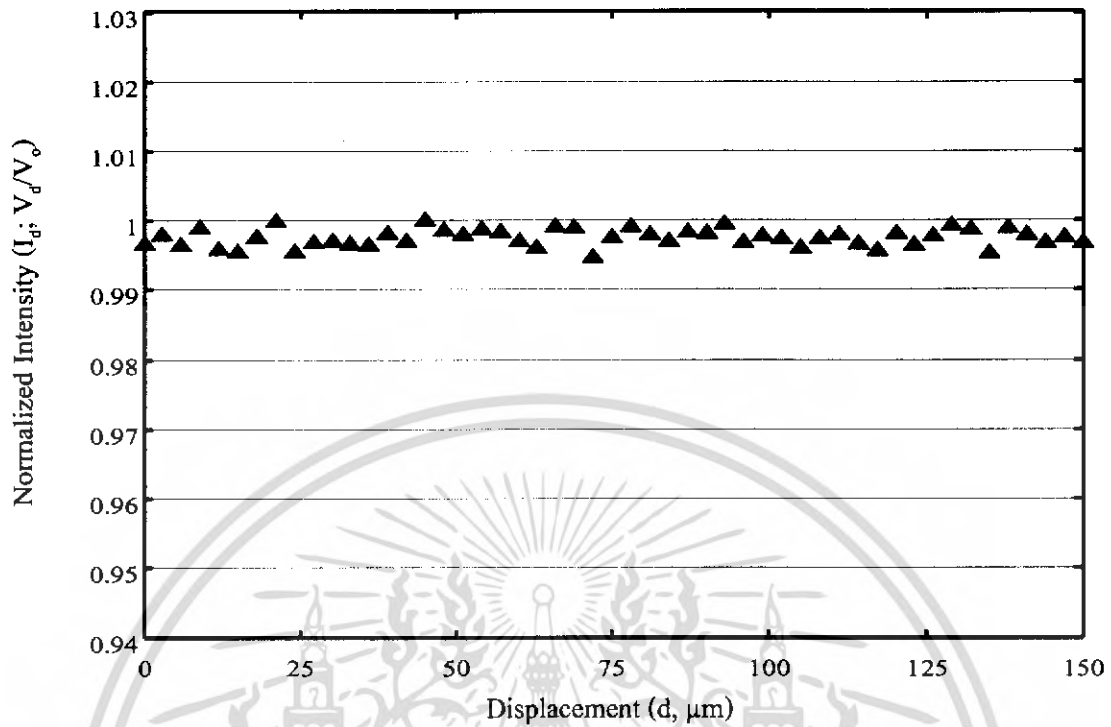
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



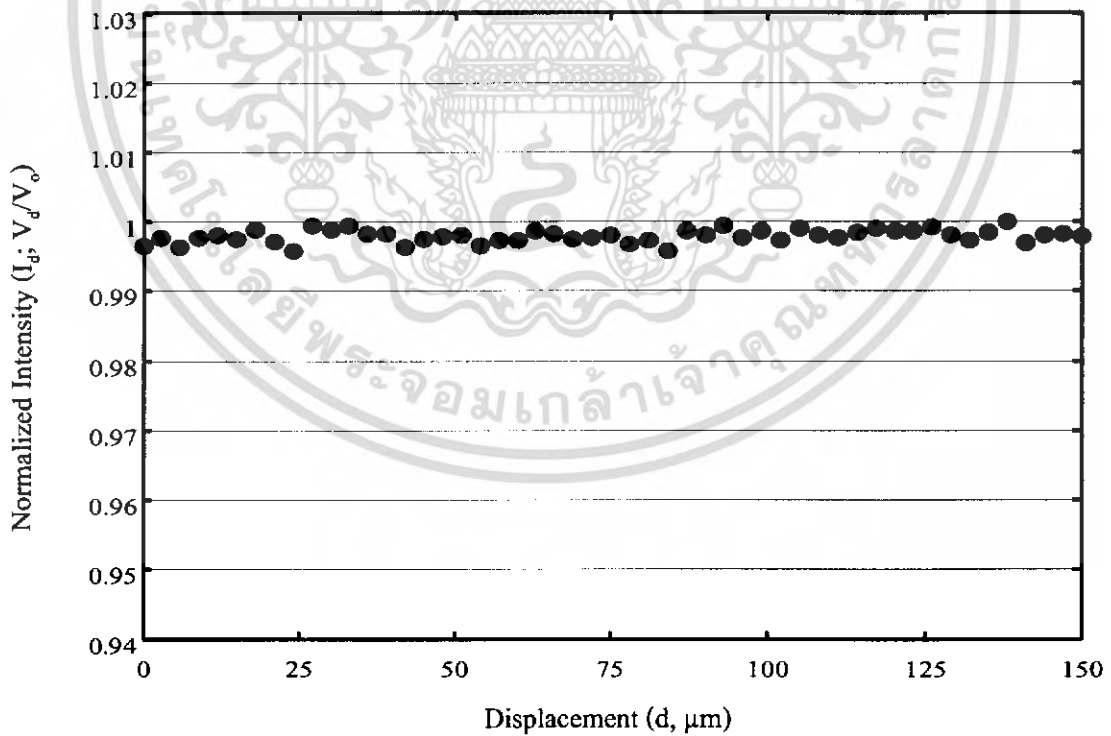
**รูปที่ 4.6** ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณสะท้อนกลับและที่ระยะการกระจัดทีละ  $3 \mu\text{m}$  ของผลเฉลยของเหล็กผิวมัน แผ่นสังกะสี แผ่นทองแดง และแผ่นอะลูมิเนียมในแนวเลื่อนแกน X



**รูปที่ 4.7** กราฟนอร์มัลไลซ์ผลเฉลยและสมการเปรียบเทียบสำหรับเหล็กผิวมันในแนวเลื่อนแกน X เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

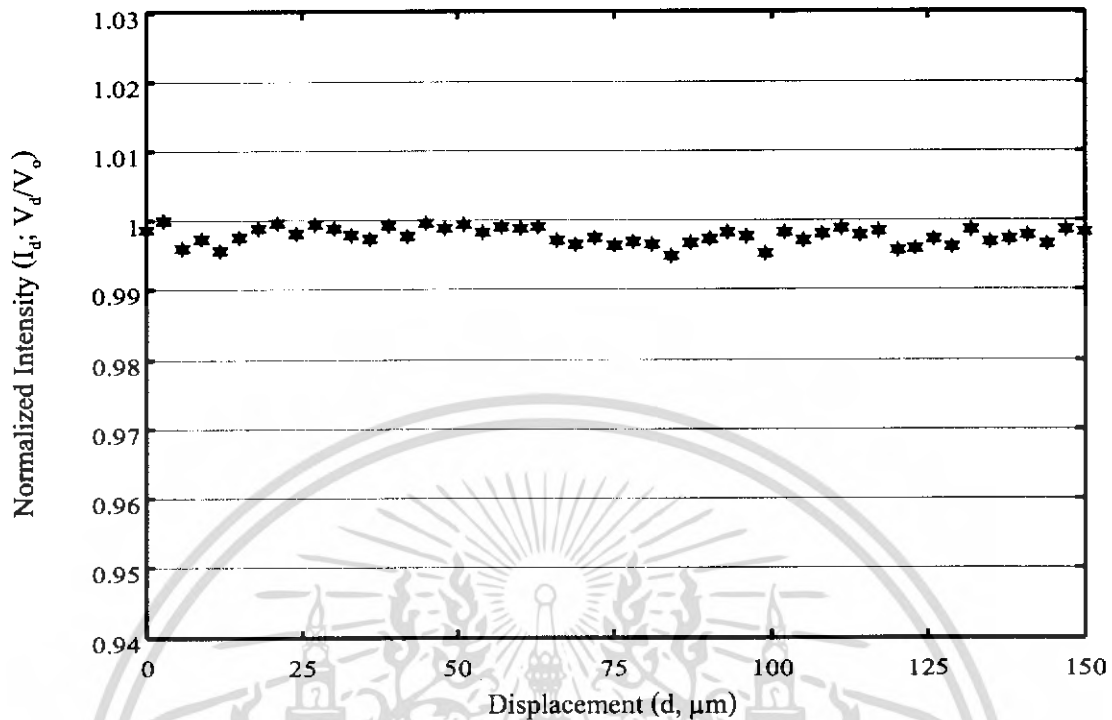


**รูปที่ 4.8** กราฟนอร์มัลไลซ์ผลเฉลี่ยและสมการปรับเทียบสำหรับแผ่นทองแดงในแนวเลื่อนแกน X



**รูปที่ 4.9** กราฟนอร์มัลไลซ์ผลเฉลี่ยและสมการปรับเทียบสำหรับแผ่นสังกะสีในแนวเลื่อนแกน X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.10** กราฟนอร์มัลไลซ์ผลเฉลี่ยและสมการปรับเทียบสำหรับแผ่นอลูมิเนียมในแนวเลื่อนแกน X

#### 4.3.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองการสะท้อนกลับของแสงเข้าสู่อิโทไดโอด ในลักษณะ

##### เลเซอร์ไดโอดอยู่กับที่และมีการเลื่อนวัตถุทดสอบในแนวแกน X

จากรูปที่ 4.2 – 4.5 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการกระจัดและสัญญาณย้อนกลับจากโฟโตดีเทคเตอร์ภายในของเหล็กผิวมัน แผ่นทองแดง แผ่นสังกะสี และแผ่นอลูมิเนียม ตามลำดับพบว่า เมื่อโลหะชนิดต่างๆ มีระยะห่างจากเลเซอร์ในระยะที่เท่ากัน และทำการเลื่อนระยะในแนวแกน X ค่าการสะท้อนที่ได้กลับมามีค่าที่แตกต่างกันของโลหะแต่ละชนิด และโลหะแต่ละชนิดมีสัญญาณที่ได้จากการสะท้อนกลับเข้ามายังโฟโตดีเทคเตอร์มีค่าที่ไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงมากนัก เกือบที่จะเป็นเส้นตรงและมีกราฟลักษณะของความเป็นลูกคลื่นของสัญญาณเป็นตลอดของช่วงเส้นกราฟที่ได้ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงอัตราที่ไม่สม่ำเสมอของสัญญาณเนื่องจากผลของการรบกวนของแสงสะท้อนภายนอกที่มีต่อแสงเลเซอร์ที่มีอยู่เดิมภายในเลเซอร์แควิตีทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังเอาท์พุทของเลเซอร์ซึ่งเป็นดังทฤษฎีข้างต้น และเมื่อพิจารณาลักษณะความเป็นลูกคลื่นหรือรอยหยักของกราฟ พบว่าช่วงห่างของความเป็นลูกคลื่นของโลหะทั้ง 4 ชนิดมีความแตกต่างกันคือเหล็กผิวมันมีลักษณะของเส้นกราฟที่มีช่วงห่างของลูกคลื่นที่สั้นกว่าและมีจำนวนลูกคลื่นมากเมื่อดูกราฟของแผ่นทองแดงต่อมา มีลักษณะของเส้นกราฟที่มีช่วงห่างของลูกคลื่นที่สั้นและมีจำนวนลูกคลื่นที่ค่อนข้างมาก แต่น้อยกว่าของแผ่นสังกะสีมีลักษณะของเส้นกราฟที่มีช่วงห่างของลูกคลื่นที่มากกว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สั้นกว่าและมีจำนวนลูกคลื่นที่ค่อนข้างมากกว่าเมื่อเทียบกับเส้นกราฟของอลูมิเนียม และสามารถพิจารณาการเปรียบเทียบลักษณะกราฟของโลหะทั้ง 4 ชนิดได้ชัดเจนเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.6 – 4.9 ซึ่งเป็นผลของการนอร์มัลไลซ์ข้อมูลของโลหะทั้ง 4 ชนิด จากกราฟเห็นได้ว่าลักษณะเส้นกราฟของเหล็กผิวมันมีช่วงห่างของลูกคลื่นที่สั้นและมีมากกว่า แสดงให้เห็นว่าโลหะแต่ละชนิดทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อค่ากำลังเอาท์พุทของเลเซอร์ที่ต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะผิวของโลหะและคุณสมบัติการสะท้อนแสงเป็นสำคัญ จากทฤษฎีกล่าวว่า สำหรับระยะทางที่เท่ากัน เมื่อเปรียบเทียบสัญญาณการเปลี่ยนแปลงต่อค่ากำลังเอาท์พุท เนื่องจากตัวสะท้อนแสงที่วางอยู่ด้านหน้าระหว่างตัวสะท้อนที่ให้ค่าการสะท้อนสูงกับค่าการสะท้อนต่ำจะพบว่าผิวที่มีการสะท้อนสูงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังเอาท์พุทของแสงที่มีความเป็นลูกคลื่นสูงกว่า ดังนั้นจากทฤษฎีและผลการทดลองที่ได้ โลหะที่ใช้ในการวิจัยนี้จึงมีคุณสมบัติการสะท้อนแสงได้ดี คือเหล็กผิวมัน สังกะสี ทองแดง และอลูมิเนียมตามลำดับ เมื่อพิจารณากราฟนอร์มัลไลซ์และสมการเปรียบเทียบ จากรูปที่ 4.6 – 4.9 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณย้อนกลับและระยะการกระจัดมีแนวโน้มในลักษณะที่มีความใกล้เคียงกันมากหรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อย โดยกราฟมีลักษณะแถบจะเป็นเส้นตรงแต่มีความเป็นลูกคลื่นนั้นทำให้ทราบได้อีกอย่างว่าแผ่นโลหะแต่ละชนิดที่ทำการทดสอบนั้นยังมีความไม่เรียบบนผิวของตัวแผ่นทดสอบเองด้วย

#### 4.3.3 การสะท้อนกลับของแสงเข้าสู่โฟโตไดโอด ในลักษณะเอเซอร์ไดโอดอยู่กับและมี การเลื่อนวัดทดสอบในแนวนอน Y

ขั้นตอนการสร้างกราฟทำโดยใช้ แผ่นโลหะแต่ละชนิด ได้แก่ เหล็กผิวมัน แผ่นทองแดง แผ่นสังกะสี และแผ่นอลูมิเนียมตามลำดับนำมาติดตั้งบนตัว Piezosystem ในแนวนอน และติดตั้งหัววัดเลเซอร์ที่ยึดติดกับชุดรางเลื่อนไมโครมิเตอร์ โดยให้หัววัดเลเซอร์ที่ติดอยู่บนรางเลื่อนในแนวตั้งนั้นยึดติดอยู่กับที่ และมีระยะห่างจากแผ่นทดสอบเป็นระยะ 5 mm แล้วทำการควบคุมแรงดันที่ Piezosystem jena ทำการปรับเพิ่มขึ้นทีละ 3  $\mu\text{m}$  โดยจะมีทิศทางในการเลื่อนลงในแนวแกน Y จะทำการวัดกับชิ้นงานทั้ง 4 ชนิด แต่ละชนิดทำการวัดอย่างละ 3 ครั้ง ผลการทดลองของชิ้นงานทั้ง 4 ชนิดเป็นดังตารางที่ 4.7 – 4.10 และนำผลของการวัดสำหรับชิ้นงานแต่ละชนิดมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณสะท้อนกลับและระยะการกระจัดจากรูปที่ 4.11 – 4.14 และเพื่อเป็นการชดเชยกำลังเอาท์พุทที่ไม่เท่ากันเนื่องจากความแตกต่างในเรื่องของการทำการทดลองและพลังงานที่ใช้ที่อาจเกิดขึ้นในการวัดสำหรับแต่ละชิ้นงานสามารถทำได้โดยใช้วิธีนอร์มัลไลซ์ (Normalized) ข้อมูล ดังสมการที่ (4.1)

**ตารางที่ 4.7** การสร้างกราฟเปรียบเทียบสำหรับเหล็กผิวมันในแนวเลื่อนแกน Y

ระยะการกระจัด $\mu\text{m}$	สัญญาณย้อนกลับ ( $v_d, V$ )				ความเข้มแสงเปรียบเทียบ $I_d = v_d/v_0$
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
0	1.48	1.480	1.481	1.480	1.0000
3	1.479	1.477	1.480	1.479	0.9993
6	1.478	1.478	1.480	1.479	0.9993
9	1.474	1.474	1.475	1.474	0.9960
12	1.476	1.475	1.475	1.475	0.9966
15	1.475	1.476	1.475	1.475	0.9966
18	1.476	1.477	1.475	1.476	0.9973
21	1.475	1.475	1.475	1.475	0.9966
24	1.477	1.477	1.477	1.477	0.9980
27	1.475	1.475	1.475	1.475	0.9966
30	1.474	1.474	1.474	1.474	0.9960
33	1.473	1.474	1.474	1.474	0.9960
36	1.471	1.470	1.469	1.470	0.9932
39	1.47	1.472	1.470	1.471	0.9939
42	1.472	1.472	1.473	1.472	0.9946
45	1.473	1.473	1.474	1.473	0.9953
48	1.47	1.471	1.471	1.471	0.9939
51	1.469	1.469	1.469	1.469	0.9926
54	1.47	1.470	1.471	1.470	0.9932
57	1.468	1.467	1.469	1.468	0.9919
60	1.467	1.467	1.467	1.467	0.9912
63	1.469	1.468	1.469	1.469	0.9926
66	1.468	1.469	1.468	1.468	0.9919
69	1.467	1.469	1.466	1.467	0.9912
72	1.466	1.465	1.466	1.466	0.9905
75	1.465	1.466	1.465	1.465	0.9899

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเปิดเผยต่อสาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.7** การสร้างกราฟเปรียบเทียบสำหรับเหล็กผิวมันในแนวเดือนแกน Y (ต่อ)

ระยะการกระจัด $\mu\text{m}$	สัญญาณย้อนกลับ ( $v_d, V$ )				ความเข้มแสงเปรียบเทียบ $I_d = v_d/v_0$
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
78	1.467	1.468	1.467	1.467	0.9912
81	1.465	1.463	1.466	1.465	0.9899
84	1.464	1.463	1.464	1.464	0.9892
87	1.463	1.464	1.464	1.464	0.9892
90	1.464	1.464	1.465	1.464	0.9892
93	1.466	1.467	1.467	1.467	0.9912
96	1.465	1.466	1.464	1.465	0.9899
99	1.464	1.465	1.464	1.464	0.9892
102	1.463	1.464	1.463	1.463	0.9885
105	1.462	1.463	1.461	1.462	0.9878
108	1.463	1.464	1.462	1.463	0.9885
111	1.462	1.461	1.463	1.462	0.9878
114	1.461	1.461	1.461	1.461	0.9872
117	1.462	1.462	1.462	1.462	0.9878
120	1.463	1.461	1.463	1.462	0.9878
123	1.461	1.461	1.460	1.461	0.9872
126	1.462	1.461	1.461	1.461	0.9872
129	1.461	1.462	1.461	1.461	0.9872
132	1.46	1.459	1.459	1.459	0.9858
135	1.461	1.462	1.462	1.462	0.9878
138	1.462	1.462	1.463	1.462	0.9878
141	1.46	1.459	1.459	1.459	0.9858
144	1.461	1.459	1.461	1.460	0.9865
147	1.46	1.460	1.459	1.460	0.9865
150	1.46	1.459	1.458	1.459	0.9858

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.8** การสร้างกราฟเปรียบเทียบสำหรับแผ่นทองแดงในแนวเลือนแกน Y

ระยะการกระจัด $\mu\text{m}$	สัญญาณย้อนกลับ ( $v_d, V$ )				ความเข้มแสงเปรียบเทียบ $I_d = v_d/v_0$
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
0	1.400	1.401	1.400	1.400	1.0000
3	1.399	1.399	1.399	1.399	0.9993
6	1.399	1.399	1.399	1.399	0.9993
9	1.396	1.396	1.396	1.396	0.9971
12	1.395	1.395	1.397	1.396	0.9971
15	1.394	1.393	1.392	1.393	0.9950
18	1.396	1.395	1.394	1.395	0.9964
21	1.395	1.395	1.396	1.395	0.9964
24	1.397	1.396	1.395	1.396	0.9971
27	1.395	1.394	1.394	1.394	0.9957
30	1.393	1.395	1.394	1.394	0.9957
33	1.394	1.394	1.395	1.394	0.9957
36	1.390	1.389	1.390	1.390	0.9929
39	1.392	1.392	1.392	1.392	0.9943
42	1.391	1.390	1.388	1.390	0.9929
45	1.393	1.392	1.392	1.392	0.9943
48	1.391	1.391	1.393	1.392	0.9943
51	1.389	1.390	1.391	1.390	0.9929
54	1.390	1.390	1.388	1.389	0.9921
57	1.388	1.389	1.389	1.389	0.9921
60	1.387	1.386	1.385	1.386	0.9900
63	1.389	1.389	1.388	1.389	0.9921
66	1.388	1.388	1.387	1.388	0.9914
69	1.386	1.385	1.385	1.385	0.9893
72	1.384	1.383	1.383	1.383	0.9879
75	1.385	1.386	1.386	1.386	0.9900

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.8** การสร้างกราฟเปรียบเทียบสำหรับแผ่นทองแดงในแนวเส้นแกน Y (ต่อ)

ระยะการกระจัด $\mu\text{m}$	สัญญาณย้อนกลับ ( $v_d, V$ )				ความเข้มแสงเปรียบเทียบ $I_d = v_d/v_0$
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
78	1.387	1.387	1.387	1.387	0.9907
81	1.385	1.384	1.384	1.384	0.9886
84	1.384	1.385	1.385	1.385	0.9893
87	1.383	1.383	1.384	1.383	0.9879
90	1.384	1.383	1.385	1.384	0.9886
93	1.386	1.387	1.386	1.386	0.9900
96	1.385	1.385	1.384	1.385	0.9893
99	1.382	1.384	1.385	1.384	0.9886
102	1.383	1.384	1.384	1.384	0.9886
105	1.380	1.379	1.378	1.379	0.9850
108	1.383	1.382	1.382	1.382	0.9871
111	1.382	1.382	1.384	1.383	0.9879
114	1.381	1.381	1.382	1.381	0.9864
117	1.382	1.381	1.383	1.382	0.9871
120	1.382	1.383	1.384	1.383	0.9879
123	1.380	1.382	1.384	1.382	0.9871
126	1.381	1.381	1.381	1.381	0.9864
129	1.381	1.380	1.379	1.380	0.9857
132	1.379	1.379	1.379	1.379	0.9850
135	1.380	1.381	1.382	1.381	0.9864
138	1.382	1.381	1.380	1.381	0.9864
141	1.379	1.378	1.379	1.379	0.9850
144	1.378	1.378	1.377	1.378	0.9843
147	1.380	1.380	1.381	1.380	0.9857
150	1.379	1.380	1.379	1.379	0.9850

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.9** การสร้างกราฟเปรียบเทียบสำหรับแผ่นสังกะสีในแนวเดือนแกน Y

ระยะการกระจัด $\mu\text{m}$	สัญญาณย้อนกลับ ( $v_d, V$ )				ความเข้มแสงเปรียบเทียบ $I_d = v_d/v_0$
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
0	1.460	1.461	1.460	1.460	1.0000
3	1.457	1.458	1.457	1.459	0.9993
6	1.459	1.458	1.460	1.459	0.9993
9	1.459	1.458	1.457	1.458	0.9986
12	1.456	1.456	1.455	1.456	0.9973
15	1.456	1.457	1.456	1.455	0.9966
18	1.451	1.452	1.451	1.452	0.9945
21	1.453	1.457	1.455	1.455	0.9966
24	1.455	1.458	1.456	1.456	0.9973
27	1.455	1.452	1.456	1.454	0.9959
30	1.454	1.452	1.454	1.454	0.9959
33	1.454	1.453	1.453	1.454	0.9959
36	1.451	1.450	1.449	1.450	0.9932
39	1.450	1.452	1.454	1.452	0.9945
42	1.449	1.451	1.452	1.450	0.9932
45	1.451	1.451	1.454	1.452	0.9945
48	1.451	1.451	1.451	1.452	0.9945
51	1.450	1.450	1.450	1.450	0.9932
54	1.451	1.449	1.449	1.449	0.9925
57	1.449	1.449	1.449	1.449	0.9925
60	1.447	1.447	1.445	1.446	0.9904
63	1.448	1.450	1.448	1.449	0.9925
66	1.448	1.446	1.448	1.448	0.9918
69	1.444	1.446	1.446	1.445	0.9897
72	1.444	1.444	1.445	1.443	0.9884
75	1.446	1.447	1.446	1.446	0.9904

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การบริการ หรือการอื่นใด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.9** การสร้างกราฟเปรียบเทียบสำหรับแผ่นสังกะสีในแนวเดือนแกน Y (ต่อ)

ระยะการกระจัด $\mu\text{m}$	สัญญาณย้อนกลับ ( $v_d, V$ )				ความเข้มแสงเปรียบเทียบ $I_d = v_d/v_0$
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
78	1.448	1.448	1.447	1.447	0.9911
81	1.445	1.444	1.445	1.444	0.9890
84	1.445	1.444	1.445	1.445	0.9897
87	1.444	1.443	1.445	1.443	0.9884
90	1.446	1.442	1.445	1.444	0.9890
93	1.447	1.447	1.445	1.446	0.9904
96	1.445	1.445	1.444	1.445	0.9897
99	1.445	1.443	1.445	1.444	0.9890
102	1.444	1.443	1.444	1.444	0.9890
105	1.438	1.438	1.439	1.439	0.9856
108	1.443	1.442	1.440	1.442	0.9877
111	1.443	1.443	1.443	1.443	0.9884
114	1.441	1.441	1.442	1.441	0.9870
117	1.443	1.442	1.441	1.442	0.9877
120	1.445	1.443	1.442	1.443	0.9884
123	1.442	1.442	1.442	1.442	0.9877
126	1.441	1.440	1.440	1.441	0.9870
129	1.439	1.441	1.440	1.440	0.9863
132	1.440	1.439	1.439	1.439	0.9856
135	1.439	1.442	1.442	1.441	0.9870
138	1.442	1.441	1.441	1.441	0.9870
141	1.439	1.438	1.439	1.439	0.9856
144	1.438	1.439	1.440	1.438	0.9849
147	1.441	1.440	1.441	1.440	0.9863
150	1.439	1.438	1.439	1.439	0.9856

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.10** การสร้างกราฟเปรียบเทียบสำหรับแผ่นอลูมิเนียมในแนวเลือนแกน Y

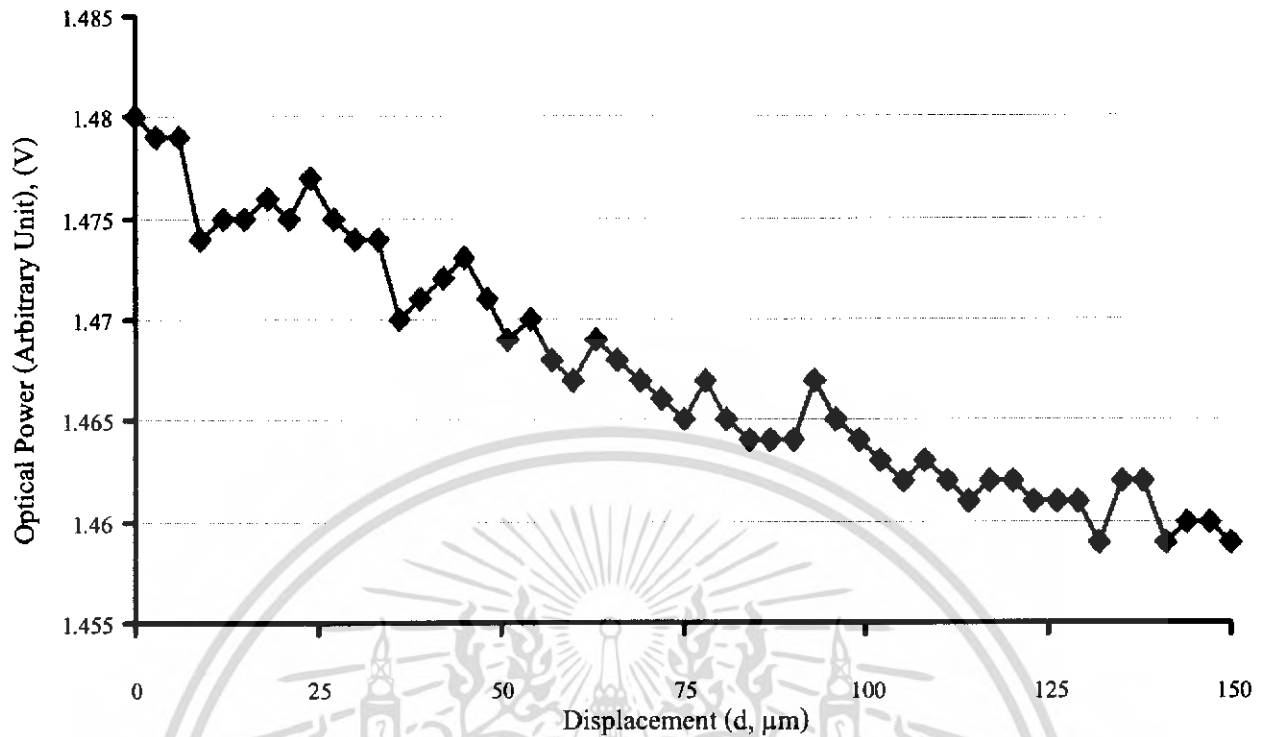
ระยะการกระจัด $\mu\text{m}$	สัญญาณย้อนกลับ ( $v_d, V$ )				ความเข้มแสงเปรียบเทียบ $I_d = v_d/v_0$
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
0	1.383	1.382	1.380	1.382	1.0000
3	1.379	1.379	1.379	1.38	0.9986
6	1.381	1.381	1.380	1.381	0.9993
9	1.379	1.378	1.379	1.379	0.9978
12	1.378	1.378	1.379	1.378	0.9971
15	1.375	1.375	1.375	1.375	0.9949
18	1.375	1.379	1.377	1.377	0.9964
21	1.376	1.377	1.373	1.376	0.9957
24	1.376	1.375	1.375	1.375	0.9949
27	1.373	1.372	1.371	1.372	0.9928
30	1.374	1.374	1.374	1.374	0.9942
33	1.375	1.377	1.376	1.376	0.9957
36	1.372	1.374	1.371	1.372	0.9928
39	1.374	1.374	1.375	1.374	0.9942
42	1.370	1.371	1.370	1.37	0.9913
45	1.371	1.372	1.371	1.371	0.9920
48	1.374	1.374	1.374	1.373	0.9935
51	1.370	1.373	1.374	1.372	0.9928
54	1.371	1.371	1.369	1.37	0.9913
57	1.367	1.368	1.368	1.368	0.9899
60	1.367	1.366	1.365	1.366	0.9884
63	1.367	1.369	1.370	1.369	0.9906
66	1.368	1.369	1.369	1.368	0.9899
69	1.365	1.366	1.365	1.365	0.9877
72	1.364	1.364	1.363	1.364	0.9870
75	1.366	1.367	1.365	1.366	0.9884

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

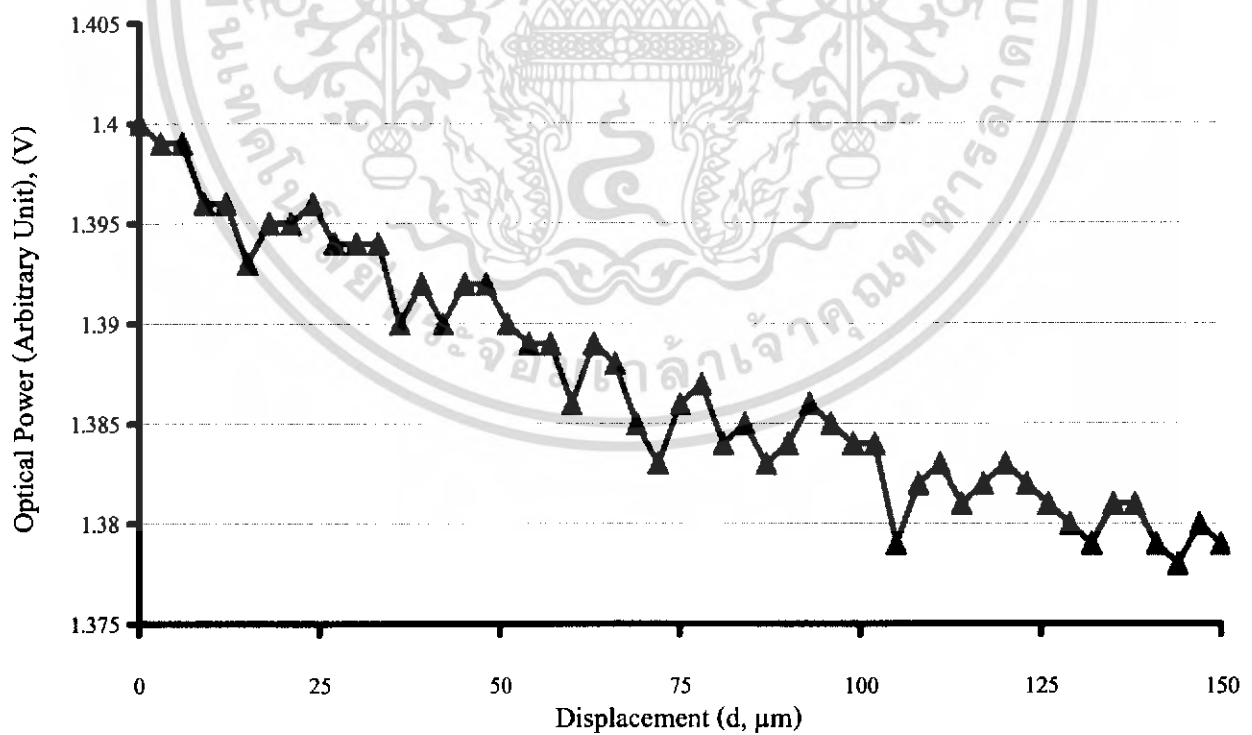
**ตารางที่ 4.10** การสร้างกราฟเปรียบเทียบสำหรับแผ่นอคูมิเนียมในแนวเส้นแกน Y (ต่อ)

ระยะการกระจัด $\mu\text{m}$	สัญญาณย้อนกลับ ( $v_d, V$ )				ความเข้มแสงเปรียบเทียบ $I_d = v_d/v_0$
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
78	1.362	1.363	1.364	1.363	0.9863
81	1.363	1.364	1.364	1.364	0.9870
84	1.361	1.363	1.362	1.362	0.9855
87	1.364	1.365	1.363	1.364	0.9870
90	1.364	1.364	1.365	1.365	0.9877
93	1.368	1.365	1.369	1.366	0.9884
96	1.363	1.363	1.363	1.363	0.9863
99	1.360	1.363	1.361	1.362	0.9855
102	1.358	1.358	1.358	1.358	0.9826
105	1.358	1.361	1.358	1.359	0.9834
108	1.361	1.361	1.361	1.361	0.9848
111	1.359	1.360	1.357	1.359	0.9834
114	1.358	1.357	1.359	1.358	0.9826
117	1.356	1.356	1.358	1.357	0.9819
120	1.358	1.359	1.360	1.358	0.9826
123	1.359	1.359	1.361	1.36	0.9841
126	1.360	1.358	1.358	1.359	0.9834
129	1.357	1.357	1.358	1.358	0.9826
132	1.354	1.354	1.356	1.355	0.9805
135	1.359	1.360	1.358	1.359	0.9834
138	1.357	1.357	1.357	1.357	0.9819
141	1.358	1.357	1.359	1.358	0.9826
144	1.358	1.355	1.355	1.356	0.9812
147	1.359	1.356	1.356	1.357	0.9819
150	1.357	1.356	1.357	1.356	0.9812

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

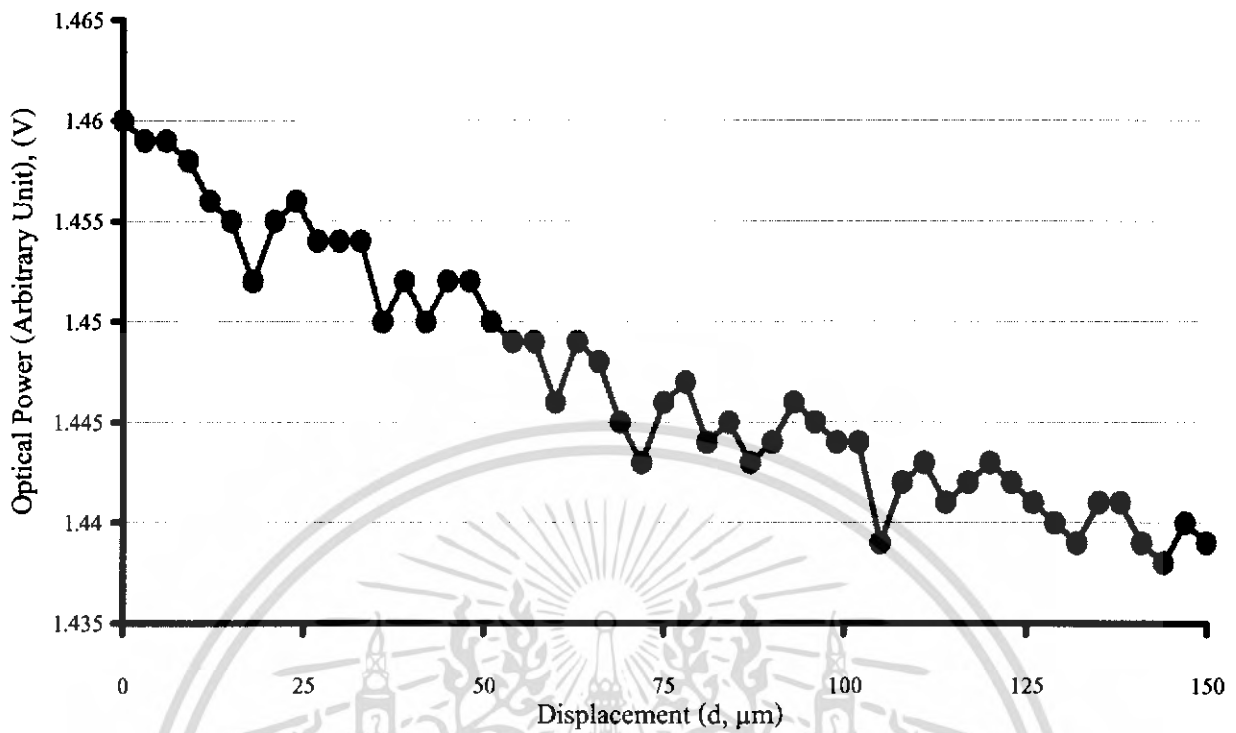


**รูปที่ 4.11** ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณสะท้อนกลับและที่ระยะการกระจัดทีละ  $3 \mu\text{m}$  ของผลเฉลี่ยของเหล็กคิวมันในแนวเลื่อนแกน Y

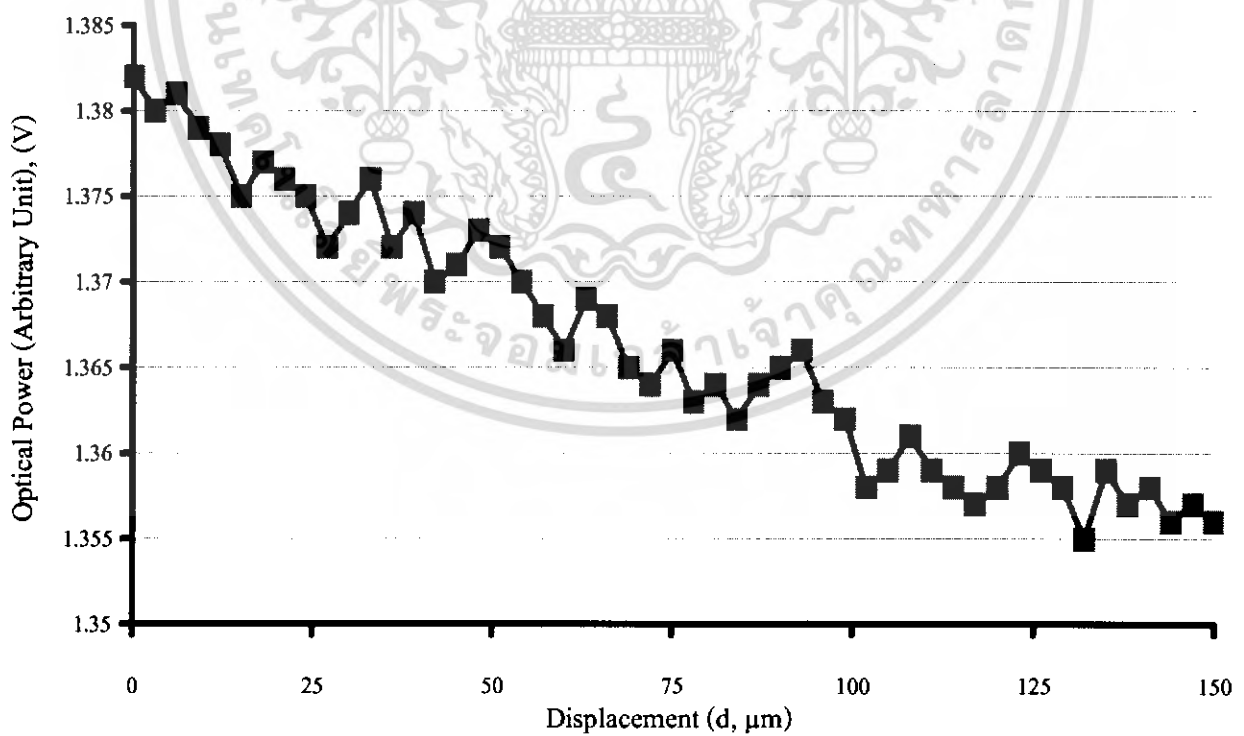


**รูปที่ 4.12** ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณสะท้อนกลับและที่ระยะการกระจัดทีละ  $3 \mu\text{m}$  ของผลเฉลี่ยของแผ่นทองแดงในแนวเลื่อนแกน Y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.13** ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณสะท้อนกลับและที่ระยะการกระจัดทีละ  $3 \mu\text{m}$  ของผลเฉลยของแผ่นสังกะสีในแนวเลื่อนแกน Y



**รูปที่ 4.14** ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณสะท้อนกลับและที่ระยะการกระจัดทีละ  $3 \mu\text{m}$  ของผลเฉลยของแผ่นออกไซด์ในแนวเลื่อนแกน Y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.4 การวิเคราะห์ผลการทดลองการสะท้อนกลับของแสงเข้าสู่โฟโตไดโอด ในลักษณะ เลเซอร์ไดโอดคู่กับที่และมี การเลื่อนวัตถุทดสอบในแนวแกน Y

จากรูปที่ 4.11 – 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะกระจัดและสัญญาณจาก โฟโตดีเทคเตอร์ภายใน ของเหล็กผิวมัน แผ่นทองแดง แผ่นสังกะสี และแผ่นอลูมิเนียมตามลำดับ จากกราฟทั้ง 4 รูปพบว่า เมื่อแผ่นโลหะชนิดต่างๆ ห่างออกจากด้านหน้าเลเซอร์ออกไป สัญญาณที่ตรวจจับด้วยโฟโตดีเทคเตอร์นั้น มีค่าลดลง และยังพบความเป็นลูกคลื่นของสัญญาณเป็นช่วงตลอดเส้นกราฟ พร้อมทั้งพบความเป็นรอยหยักเป็นบางช่วงของสัญญาณของ โลหะทดสอบแต่ละชนิดที่มีลักษณะแตกต่างกันคือ เหล็กผิวมันมีลักษณะเส้นกราฟที่มีจำนวนลูกคลื่นที่ค่อนข้างมากและมีรอยหยักของลูกคลื่นในระยะที่ใกล้กัน ในเส้นกราฟเมื่อเทียบกับลักษณะเส้นกราฟของทองแดงที่มีจำนวนลูกคลื่นน้อยและมีช่วงระยะจากรอยหยักของลูกคลื่นที่ค่อนข้างมาก พิจารณาต่อมาของแผ่นสังกะสีและแผ่นอลูมิเนียม เส้นกราฟเกิดลูกคลื่นเช่นเดียวกับของเหล็กผิวมันและแผ่นทองแดง เมื่อเทียบกันแล้วแผ่นสังกะสีจะมีลูกคลื่นและระยะช่วงรอยหยักของเส้นกราฟที่มากกว่าแผ่นอลูมิเนียม และแผ่นทองแดงแต่น้อยกว่าของเหล็กผิวมัน สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงค่ากำลังเอาท์พุทของเลเซอร์แตกต่างกันเป็นผลมาจากชนิดของโลหะที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะผิวของโลหะและคุณสมบัติการสะท้อนแสง จากทฤษฎีที่กล่าวว่า เมื่อวางตัวสะท้อนที่ให้ค่าการสะท้อนสูงและค่าการสะท้อนต่ำห่างจากเลเซอร์เป็นระยะทางที่เท่ากัน เมื่อเปรียบเทียบสัญญาณการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังเอาท์พุทผิวที่มีการสะท้อนสูงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังเอาท์พุทของแสงที่มีค่าความเป็นลูกคลื่นสูงกว่าหรือเกิดการกวัดแกว่งของสัญญาณ ดังนั้นจากทฤษฎีและผลการทดลองที่ได้โลหะที่ใช้ในการทดสอบนี้จึงมีคุณสมบัติการสะท้อนแสงได้โดยเรียงลำดับจากเหล็กผิวมัน แผ่นสังกะสี แผ่นทองแดง และแผ่นอลูมิเนียมตามลำดับ

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้เป็นส่วนสรุปผลการดำเนินงานวิจัย ของการศึกษาการตรวจดูรายละเอียดของสภาพพื้นผิวด้วยเทคนิคเซลฟ์มิกซิ่ง โดยทดสอบกับโลหะ 4 ชนิดคือ เหล็กผิวมัน แผ่นทองแดง แผ่นสังกะสี และแผ่นอลูมิเนียม ตลอดจนปัญหาที่พบระหว่างดำเนินงานวิจัยรวมถึงผลการทดลองที่ได้ ข้อเสนอแนะ แนวทางในการปรับปรุงและพัฒนาประยุกต์ใช้งาน และเพื่อเป็นแนวทางในการดำเนินงานต่อไป

#### 5.1) สรุปผล

1. การตรวจดูค่าการสะท้อนกลับบนสภาพพื้นผิวของวัตถุด้วยหลักการเซลฟ์มิกซิ่งจะอาศัยหลักการสะท้อนของแสง โดยใช้เลเซอร์ไดโอดที่มีตัวโฟโตไดโอดอยู่ภายใน ซึ่งทำให้การจัดระบบไม่ต้องมีผลึกแยกลำแสง กระจกอ้างอิง และจัดวางอุปกรณ์ ที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน สัญญาณการสะท้อนกลับมานี้จะเกิดการแทรกสอดแบบเซลฟ์มิกซิ่งแบบฟาบริ-เพอร์โร และสามารถวัดสัญญาณเปลี่ยนแปลง ได้จากตัวโฟโตไดโอด โดยค่าการเปลี่ยนแปลงนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น กำลังเอาต์พุตของเลเซอร์ ในระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดเลเซอร์กับพื้นผิววัตถุที่วางไว้ในระยะใกล้กัน โดยเมื่อปล่อยแสงเลเซอร์ไดโอดไปยังตัวสะท้อนภายนอกแล้วสะท้อนกลับจากวัตถุที่ต้องการวัด ในโครงการพิเศษนี้จะทำการพิจารณาพื้นผิววัตถุที่มีลักษณะของชนิดที่แตกต่างชนิดกัน โดยในที่นี้คือ เหล็กผิวมัน แผ่นทองแดง แผ่นสังกะสี และแผ่นอลูมิเนียมซึ่งจะนำค่าสัญญาณการเปลี่ยนแปลงนี้ไปวิเคราะห์เพื่อหาช่วงความเป็นเชิงเส้นของสัญญาณ ลักษณะของพื้นผิวซึ่งจะบอกถึงค่าการสะท้อนกลับของแสงของพื้นผิววัตถุได้ว่าชนิดไหนมีการสะท้อนได้ดีกว่า ซึ่ง เหล็กผิวมัน แผ่นสังกะสี แผ่นทองแดง และแผ่นอลูมิเนียมและตามลำดับ

2. ระบบที่ใช้ในโครงการนี้จะใช้ เลเซอร์ไดโอดของบริษัท EG&G รุ่น C86135E และเป็นชนิดที่ให้แสงอินฟราเรด มีโครงสร้างเป็นซิงเกิลวันเต็มเวล ให้ความยาวคลื่น 906 nm และกำลังแสงเอาต์พุต 25 mW

3. ในโครงการพิเศษนี้ระบบสแกนสามารถที่จะสแกนในแนวระนาบ XY โดยให้วัตถุติดไว้กับ Piezosystem รุ่น 200 OEM ที่มีการต่อเข้ากับ Piezosystem Jana รุ่น ENT 40/20 ซึ่งจะเชื่อมต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้ากับคอมพิวเตอร์และปรับระยะต่างๆลงใน โปรแกรมคอมพิวเตอร์ และจะขีดคดตามแรงดันที่ป้อนและยังมีความละเอียดในการขีดคดตั้งแต่สเกลระดับไมโครเมตร

4. คุณภาพของสัญญาณที่ได้ จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายๆอย่าง เช่น ความเรียบของพื้นผิววัตถุ ระยะห่างระหว่างปลายหัวเลเซอร์กับพื้นผิววัตถุที่วางไว้ระยะ 5 mm ในโครงการพิเศษนี้ ใช้วัสดุ 4 ลักษณะที่คล้ายคลึงกัน แท่นสแกนระยะในแนวแกน XY ที่ให้ตัวเลขจะนิ่งอยู่กับที่ ในแนวแกนตั้งและวัตถุในแนวแกนนอน ทำให้สัญญาณที่ได้ออกมามีความคมชัดและความคงที่ของระยะกระจัดที่ป้อนเข้าไป

5. กระแสไฟที่ใช้เป็นกระแสที่ไม่สูงมากนักทำให้ง่ายต่อการนำมาใช้งานและปลอดภัยกับผู้ทำการทดลอง

6. ลักษณะที่ไม่ค่อยเรียบสม่ำเสมอของพื้นผิววัตถุจึงทำให้สัญญาณแสงที่ได้ออกมามีลักษณะเป็นลูกคลื่นที่ไม่เท่ากัน

7. ในการจัดแนวแสงต้องปรับให้ลำแสง ที่ออกจากหัววัดไปยังวัตถุทดสอบและสะท้อนกลับเข้ามาในเส้นทางเดิมเป็นแนวเดียวกันมากที่สุดเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังเอาท์พุทเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงระยะทางของตัวสะท้อนภายนอกได้สูงสุด

## 5.2) ปัญหาที่พบ แนวทางการแก้ไขปัญหาและข้อเสนอแนะ

1. สัญญาณและภาพที่ได้มีบางจุดที่เกิดการผิดพลาด ซึ่งอาจเกิดจากพื้นผิววัตถุ ที่นำมาทดสอบอาจมีบางจุดที่มีเนื้อวัตถุแตกต่างกัน เพื่อลดข้อผิดพลาดของสัญญาณควรเลือกวัตถุที่มีเนื้อเดียวกัน

2. เนื่องจากในบางครั้งระบบมีการหยุดชะงัก สัญญาณขาดหายไป ทำให้ต้องขยับระบบและต้องทำการวัดใหม่ในบางค่า เพราะคุณสมบัติของ Piezosystem รุ่น 200 OEM ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วย ดังนั้นจึงควรวัดค่าในเวลาเดียวกันเพื่อให้ค่าที่ได้สอดคล้องกัน และต้องมีการวัดค่าสัญญาณหลายๆครั้งและหลายๆค่าเพื่อความแม่นยำและนำข้อมูลไปใช้ได้ถูกต้อง

3. ค่าความต่างศักย์ของสัญญาณต่างๆที่วัดได้จะไม่มีการเปรียบเทียบกับจุดอ้างอิงเดียวกัน ดังนั้นค่าที่แสดงในกราฟอาจจะมีค่ามากกว่าความเป็นจริงอยู่ ดังนั้นจึงควรมีการปรับปรุงการวัดค่าความต่างศักย์ของสัญญาณต่างๆให้มีการเปรียบเทียบกับจุดอ้างอิงเดียวกันเพื่อให้ค่าที่ได้มีค่าถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น

4. ค่าที่ได้ปีนการวัดในระนาบแนวแกนเดียวเท่านั้น ทำให้อาจเกิดการเคลื่อนที่ของตำแหน่งในการวัดหลายๆครั้งเพราะการขีดคดของ Piezosystem รุ่น 200 OEM ทำให้เกิดการสั่นจึงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้วัตถุอาจเคลื่อนที่ในการวัดทำให้ค่าที่ได้ อาจเกิดความคลาดเคลื่อนและไม่แม่นยำ จึงควรยึดทำให้วัตถุอยู่กับที่โดยอาจจะหาเทปกาวมาติดไว้ข้างใต้วัตถุและติดไว้กับแท่นวางเพื่อไม่ให้เกิดความคลาดเคลื่อน

5. ควรคำนึงถึงการจัดของแนวแสงในขั้นตอนการวัดด้วยและหาวิธีที่ทำให้แสงสะท้อนกลับมายังแนวเดิมให้ได้มากที่สุด

ในการศึกษาของโครงการพิเศษนี้ ในการใช้หลักการเซเลฟติกยังมีข้อจำกัดและปัญหาอยู่บ้าง แต่ผลการทดลองในการศึกษาพบว่ามีความสามารถเทียบเท่าเครื่องมือของต่างประเทศ ซึ่งระบบที่สร้างขึ้นไม่มีความยุ่งยากทั้งในการใช้งานและการประกอบมากนัก สามารถที่จะพัฒนาเป็นเครื่องมือตรวจสอบพื้นผิววัตถุแบบไม่ทำลาย เพื่อที่จะหาจุดบกพร่องของพื้นผิว, วัดความเรียบของชิ้นงานที่เล็กมาก และใช้ความแตกต่างของสัญญาณการสะท้อนที่เกิดจากลักษณะพื้นผิวที่แตกต่างกันมาสร้างเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ลักษณะของพื้นผิวต่อการสะท้อนของสัญญาณที่แตกต่างกัน รวมไปถึงการนำไปใช้กับเทคนิคการวัดขนาดภาคตัดขวางด้วย เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในโลหะทรงกลมที่มีขนาดเล็กมากๆ แต่การวัดประเภทนี้ต้องคำนึงถึงเรื่องของสัดส่วนระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำแสงขนาดของวัตถุ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ปรีชา อุพาพิน, 2544, เครื่องข่ายใยแก้วนำแสง, บริษัท ส. เอเชีย เพรส จำกัด, กรุงเทพฯ
- [2] มนัส สังวรศิลป์. คู่มือการใช้งาน MATLAB ฉบับสมบูรณ์
- [3] รัชณี แสงสุริยา. การใช้เทคนิคเซลล์ฟิมิกซิงในแหล่งกำเนิดเลเซอร์ไดโอดกับงานมาตรวิทยา. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี. 2545
- [4] สุรศักดิ์ พิพัฒน์ศาสตร์. การสร้างภาพพื้นผิววัตถุด้วยหลักการเซลล์ฟิมิกซิงในเลเซอร์ไดโอด. กรุงเทพมหานคร : สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547
- [5] สุวรรณ กุสุราญ. ทัศนศาสตร์กายภาพ. คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [6] Measurable-Range Extension of Range-Finding Speedometer Using Self-Mixing Laser Diode Derong Pan, Shigenobu Shinohara, Hiroaki Ikeda, Hirofami Yoshida and Masao Sumi\* Shizuoka University, 3-5- 1 Johoku Hamamatsu, 432 Japan
- [7] Velocity Measurement by a Self-Mixing Laser Diode Using Speckle Correlation Sahin Kaya Ozdemir, Satoshi Ito, Sotetsu Takamiya, Shigenobu Shinohara, Hirobmi Yoshida, and Masao Sumi\* Shizuoka University, Hamamatsu, 432-8561 Japan
- [8] [http://physics.sc.kku.ac.th/thai/lesson/315321\\_Optics/optics\\_pdf/file\\_pdf/OPTXCH8.pdf](http://physics.sc.kku.ac.th/thai/lesson/315321_Optics/optics_pdf/file_pdf/OPTXCH8.pdf)
- [9] <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/6561/17533/00811939.pdf?tp=&arnumber=811939&isnumber=17533>
- [10] <http://www.piezोजना.com/index.php4>
- [11] <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/7218/19483/00900719.pdf?arnumber=900719>
- [12] [http://www.linos-photonics.co.uk-img-produkte-piezo-TRITOR/200-20\\_with\\_controller.PG](http://www.linos-photonics.co.uk-img-produkte-piezo-TRITOR/200-20_with_controller.PG)
- [13] <http://www.RUS.ac.th>
- [14] <http://www.nimt.or.th>
- [15] <http://www.colorado.edu/physics/2000/lasers/lasers4.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





## Instruction manual

power supply

- ENV40 C
- ENV40 CSG
- ENV40 CCP

***Read carefully before switching on the power!  
Please see also at the end of this manual the instruction for safety and for  
using piezoelectrical actuators and power supplies!***

**serial no.:**

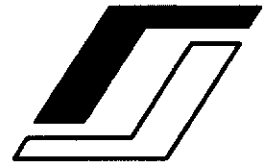
**piezosystem jena GmbH**

Pruessingstrasse 27 • D - 07745 Jena, Germany

Tel.: + 49 (3641) 66 88-0 • Fax: +49 (3641) 66 88 - 66 • e-mail: [info@piezojena.com](mailto:info@piezojena.com)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะในโรงงานเท่านั้น กรุณาอย่าได้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**Instruction for using**  
**(Read carefully before switching on the power!)**

**Safety notices**

**Some remarks for piezoelectrical actuators:**

Actuators are capacitive loads. Do not discharge actuators by short-circuiting the leads. Ensure dielectric strength of your power supplies, wiring and connectors to prevent accidental arcing.

Abrupt discharging may cause damaging of the stacks.

Attention has to be paid during highly dynamic operation. Piezoceramic stacks are sensitive to tensile forces. Depending on amplitude and frequency, internal stress may be induced without external load.

Piezoelectrical actuators such as stacks or various other elements electrically work as a capacitance. These elements are able to store electrical energy over a long time and the stored energy may be dangerous for persons.

Before you begin to work with any piezoelectrical actuating system note:

Connect and disconnect the elements only when the power supply is switched off.

Because of the piezoelectrical effect, piezoactuators can generate electrical charges by changing the mechanical load or the temperature of the actuator.

Discharge the actuator properly by setting the supplies to zero. If the actuator is disconnected use a resistor for discharging the actuator.

Do not switch on the power supply, when the actuators are disconnected. Be sure that electrical contact of persons to the output connectors of the power supply is not possible, when the supply is switched on!

**Do not operate in an explosive atmosphere**

Do not operate the pc card or piezoelements from piezosystem jena in the presence of flammable gasses or fumes. Operation of any electrical instrument in such an environment constitutes a safety hazard.

**Do not service or adjust alone**

Do not attempt internal service or adjustment unless another person, capable of rendering first aid and resuscitation, is present.

**The power supply ENV 40 C (SG, CP) produce voltages up to 160V and currents up to 40mA.**

**These values can cause danger to your life! Therefore read the installations instructions carefully and handle the power supply only by authorized personal!**



## Power supply ENV 40 C (SG, CP)

The power supply system ENV 40 C (SG, CP) was developed especially for one dimensional positioning problems in optics, laser physics, microbiology, machining ... . With an output noise of 3mV and less it is excellent suited for positioning in the sub- $\mu$ m and nm range.

The system consists of various modules which can be combined to your own special system.

The power supply can work as an amplifier via input lines. By this way it is possible to work dynamically with piezoelectrical elements.

Control by hand can be realized using a potentiometer.

The present output voltage for the piezoelements will be shown on a display.

The power supply system has an excellent noise behavior which allows fine positioning in the nm range.

### technical data

### E-104-00 (.. 20)

output power	6 W
output voltage:	-10 to 150V
output current:	40 mA
noise (absolute value):	< 5mV
noise (relative value):	< $3 \times 10^{-5}$
modulation input:	0 + 10V;
connector:	SMB
polarity:	positive
manual control:	3/4 turn potentiometer
output connector:	LEMOSA; (FFA OS 250.CTAC 32)

### dimensions (in mm)

dimensions: 19" module 3 HE 6 TE x 160 mm

main supply ENT 40/20:

main voltage: 110/220V 50/60Hz  
(actual value see at the supply and in front of this instruction)

output power: 25W  
width of the module: 14 TE

width of the free space for modules (1TE = 5,1mm):

### piezosystem jena GmbH

Pruessingstrasse 27 • D - 07745 Jena, Germany

Tel.: + 49 (3641) 66 88-0 • Fax: +49 (3641) 66 88 - 66 • e-mail: info@piezojena.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ <http://www.piezojena.com/> อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ตามการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## Functions of the modules:

### potentiometer 3/4 turn

It allows manual control of the amplifier module. By turning the potentiometer a constant output voltage will be given to the piezo actuator. If you are working simultaneously with the modulation input, both signals (OFFSET and modulation signal) will be added.

### LEMOSA connector - OUT

The piezoelement will be connected (plug LEMOSA OS 250.CTAC 32). The output voltage is  $-10 + 150V$ .

### SMB connection - MON (in the middle)

Via this output line, the voltage of the piezoelement can be controlled. The output voltage will be divided by  $10 : 1$ , so the voltage range at this line will be  $-1 + 15V$ .

We recommend to control the output voltage via this connection especially if you work dynamically. Please note the inner resistance of your measurement system (multimeter). Use only high omic multimeters for measurement to avoid failures!

Using the SG – or the CP – option the MON – output show the signal of the measurement system.

### SMB connection - MOD (at the left)

This is the input connection for the modulation signal. The range of the signal should be  $0 + 10V$ . It can be the signal of a function generator.

### red LED - ON

After switching on the main supply on the output voltage for the piezo elements will be switched on with a delay of approx. 0.5 sec. Thus electrical pulses at the output because of the switching can be suppressed.

If the LED "ON" is illuminated the voltage will be given to the output - the amplifier is ready for work.

### red LED - overload - OVL

Voltages simultaneously given by the modulation input and by offset potentiometer will be added. By this way it is possible to generate voltages overcoming  $>150V$ . High voltages can damage the piezo elements. This situation will be indicated by illuminating the red LED OVL- overload.

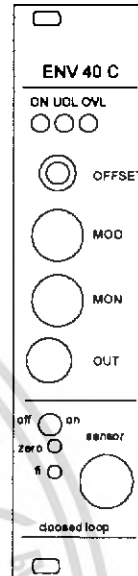
#### Attention:

**If you work with high voltages we strongly recommend to use the monitor output for voltage control. Please use a high omic measurement system for controlling to avoid falsification of the monitor output signal!**

### red LED - underload - UDL

Voltages simultaneously given by the modulation input and by offset potentiometer will be added. By this way also negative voltages higher than  $-10V$  can be generated. Depolarisation effects of the piezo elements can be the result of such voltages.

In this situation the LED underload will be illuminated and the voltage will be reduced to  $-10V$ .





### Closed loop option

In this unit there is integrated the complete electronic to direct the measurement system so as the electronic for evaluation of the signals from the measurement system (strain gauges).

At the frontside you find the elements:

#### switch for closed loop - on / off

Using this switch you can realize two operating modes:

- ON** The module ENV 40 CSG / ENV 40 CCP works in closed loop regime. With the potentiometer, with the EDA 2/3 and with the modulation input you give a motion. The electronic of the ENV 40 CSG / - CCP will keep the motion to be constant. If there are changes of the position from outside the piezoelement which will be measured by the measurement system, the closed loop regime will return the position in the wanted position.
- OFF** The measurement system works normally without closed loop. A change in the position will be measured and will be indicated at the display. But it will not returned to the further position.

#### connection for measurement system – SENSOR

This line is for connecting the measurement system integrated in the piezoelectric positioning system. Usually *piezosystem jena* deliver complete mounted and calibrated systems, the positioning system will have the matched connector for this line.

#### ZERO

If you have a display you can shift the zero position by using a fine screw driver. This is convenient for some applications. The ZERO shift does not influence on the measurement and on the positioning system! If you don't have a display, this option not important for you.

#### fi

The time for regulating the closed loop is passed with the specific used piezoelements. It depends on the special construction and parameters of the element (mass; stiffness, resonant frequency). Normally the regulation time is set to be 10ms. On the ENV 40 CSG / - CCP you can change the integration frequency of the PID – controller, and so you can change the time for regulating.

#### Please note:

**As shorter the regulation time, as higher is the danger an oscillation of the piezoelements.**

**This can destroy the piezoelement.**

The accuracy that can be reached with a closed loop system depends also of the element and also of the environment conditions.

Using strain gauges we normally reach values of 0,2% and better (related to the full motion). The repeatability is usually better than 0,1%.

#### Please note:

**Piezoelements and power supplies with closed loop option are adjusted each to the other. By changing the elements or modules, the calibration will be lost. Please ask for help if you have such a problem!**

**piezosystem jena GmbH**

Pruessingstrasse 27 • D - 07745 Jena, Germany

Tel.: + 49 (3641) 66 88-0 • Fax: +49 (3641) 66 88 - 66 • e-mail: [info@piezोजना.com](mailto:info@piezोजना.com)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ <http://www.piezोजना.com/> อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### 3. Pin Connection X3 (C64)

pin	A		C	
	signal	description	signal	description
1	GND	digital ground	GND	digital ground
2	GND	digital ground	GND	digital ground
3	-	NC	-	NC
4	VCC	+5V/50mA digital	VCC	+5V/50mA digital
5	-	NC	-	NC
6	+15V	+15V/50mA analogue	+15V	+15V/50mA analogue
7	-	NC	-	NC
8	AGND	analogue ground	AGND	analogue ground
9	AGND	analogue ground	AGND	analogue ground
10	-	NC	-	NC
11	-15V	-15V/100mA analogue	-15V	-15V/100mA analogue
12	MON	To JP5: 1-2	MON	To JP5: 3-4
13	MON	To JP5: 5-6	MOD	To JP6: 1-2
14	MOD	To JP6: 3-4	MOD	To JP6: 5-6
15	SOU	To JP7: 1-2	SOU	To JP7: 3-4
16	SOU	To JP7: 5-6	-	NC
17	-	NC	-	NC
18	-	NC	-	NC
19	-	NC	-	NC
20	-	NC	-	NC
21	+160V	+160V/50mA analogue	+160V	+160V/50mA analogue
22	+160V	+160V/50mA analogue	+160V	+160V/50mA analogue
23	-	NC	-	NC
24	-	NC	-	NC
25	-	NC	-	NC
26	-	NC	-	NC
27	-	NC	-	NC
28	-	NC	-	NC
29	-	NC	-	NC
30	AGND	analogue ground	AGND	analogue ground
31	-	NC	-	NC
32	-	NC	-	NC

**MON – backside**

**MOD – backside**

**SOU (source) active low,**

- **low MOD, OFFSET on frontside is used, MOD – backside is not active**
- **High MOD MOD – backside is used, frontside is not active**

**= Uout/10**

**modulation input 0 ... 10 V**

**piezosystem jena GmbH**

Pruessingstrasse 27 • D - 07745 Jena, Germany

Tel.: + 49 (3641) 66 88-0 • Fax: +49 (3641) 66 88 - 66 • e-mail: info@piezोजना.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ <http://www.piezोजना.com/> อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## Instruction for use:

### 1. general

The power supply should be operated only by authorized personal!  
It is not allowed to open the casing of the supply .

At the backside you find the connector for the main.

### 2. switching on:

At first be sure that the power supply is switched off and the potentiometer of the DC-voltage are in the left position (-10 volt position). Connect the piezoelectrical actuators.

If modulation is necessary connect the input signals (e.g. of a frequency generator) to the input BNC connectors.

The ENT module should not be switched on within 30 seconds after switched off the device.

Switch on the power supply at the ENT 40/20 module. The LED on the ENT 40/20 will be illuminated. If the output of the amplifier module is switched on, the "ON" LED at the amplifier modules will be also illuminated.

## Hints for using:

**If you want to realize positioning with a high resolution in the sub- $\mu\text{m}$  range you should switch on the supply for about 30 minutes before you start to work!**

**It is necessary to work in rooms with constant temperatures, air circulation in the near of your experiment should be avoided!**

### Please note:

**Temperature changes of  $\Delta T = 5\text{K}$  result changes of the length (for 20cm steel) of approx.  $20\mu\text{m}$ !**

**Please note special characteristics of piezoelectric elements like creep and hysteresis. For more detailed information read the special chapters of our piezoline or ask our team or your dealer.**

## output operation

### 1. control by hand

Turning the potentiometer at the amplifier ENV 40 C (SG, CP) hand, you can realize a fine motion of your piezoelements. The present output voltage will be indicated at the MON - output.

### 2. control via modulation input

With the modulation input, the power supply can work as an amplifier. As it will be given a signal to the SMB input MOD, this signal will be amplified by 16 times. The maximum input signal of 10V will produce an output signal of 150V for the piezoelements.

Simultaneously with the modulation signal, the potentiometer on the frontside can be used for offset control. Both signals will be added.

### 3. end of work

If you stop with work, set the DC voltage to -10V. All potentiometers should be in their left position! **Then** switch off the power supply.

### 4. before switching on the main supply:

**piezosystem jena GmbH**

Pruessingstrasse 27 • D - 07745 Jena, Germany

Tel.: + 49 (3641) 66 88-0 • Fax: +49 (3641) 66 88 - 66 • e-mail: info@piezोजना.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ <http://www.piezोजना.com/> อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- all cables connected
- modulation signal is zero
- potentiometer in the left position (zero position)

**5. switching off**

- setting the modulation signal to zero
- turning the potentiometer to their left position (zero position)

**6. problems with the power supply**

If the power supply does not work and the display is not illuminated, please control all cables and connections. Do you switched on the power supply?

If there are any other problems, please contact your dealer or our company!  
Do not open the cover of the supply, inside are high voltages which can be dangerous for live.

The power supply should be operated only by authorized personal.

**We wish you full success with our piezoelectrical system!**





### **Notes for mounting and use of piezo electrically driven positioning stages**

Piezo electrically driven positioning stages are built for high precision positioning. Please handle careful. Especially for mounting other parts on the top plate. Please avoid torque forces when fastening screws in order to avoid damage to the actuator. Please avoid tensile forces greater than the given pre-load!

Please note, for standard actuators and actuators equipped with strain gauge sensors, the tolerance of the open loop motion is -10% to +40%. The tolerance of the capacitance is +/- 20%. The closed loop travel is 80% of the open loop travel. The resolution is only limited by the noise of the amplifier, and all given resolution values are based on measurements with the E-103-18 amplifier.

Standard calibration will be done without any load on the actuator. On customer request, defined loads (up to the max. load) can be calibrated during manufacturing once to optimize a system. Additional calibration has to be paid by the customer.

The standard cable length is 1m. The vacuum and cryogenic version cable length of the actuator is 0.6m. The extension cable length outside the vacuum chamber is 1.2m.

The total cable length of actuators equipped with strain gauge feed back sensors is 1m.

Actuators equipped with strain gauge feed back sensors and external pre-amplifier – please see added "E" on the part number - have a total cable length of 2m. A signal pre-amplifier box is in line with the cable 0.3m behind the actuator. The size of the cable box is BxHxL=12x16x45mm.

Actuators equipped with capacitive feed back sensors have a total cable length of 2m. A signal pre-amplifier box is in line with the cable 0.3m behind the actuator. The size of the cable box is (BxHxL=55x12x105mm).

**For further question please ask us!**

**piezosystem jena GmbH**  
**Pruessingstr. 27**  
**D-07745 Jena**  
**Germany**  
**Tel.: +49-(0)3641-6688-0**  
**Fax: +49-(0)3641-6688-66**  
**[info@piezोजना.com](mailto:info@piezोजना.com)**

**piezosystem jena Inc.**  
**54 Hopedale St.**  
**MA 01747**  
**USA**  
**Tel.: 508-634-6688**  
**Fax: 508-634-6868**  
**[usa@piezोजना.com](mailto:usa@piezोजना.com)**

**piezosystem jena GmbH**

Pruessingstr. 27 • 07745 Jena • HRB Gera 2823 • VAT ID-Nr. DE 150531409  
© piezोजना  
account: Commerzbank, BLZ 820 400 00, KTO 258 420 9 • Deutsche Bank, BLZ 820 700 24, KTO 531 571 8  
Tel. + 49 (3641) 66 88-0 • Fax +49 (3641) 66 88 66 • E-Mail [info@piezोजना.com](mailto:info@piezोजना.com) • <http://www.piezोजना.com/>

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ENV - the modular plug-in-system

The amplifier system ENV is a modular system with a 19" housing.

In special applications it is possible to combine one or more amplifier modules with different characteristics.

Each amplifier module has its own display which shows the output voltage.

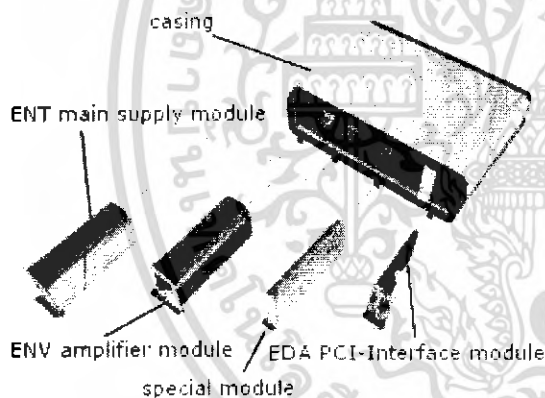
If used with a measurement system and closed loop module, it displays the calibrated motion.

Different modules for closed loop and PC connections are available.

Each amplifier system consists of at least three modules:

1. the casing; size and type can be changed after customer requirements
2. the ENT module supplies the main voltages for the piezo amplifier module
3. the ENV piezo amplifier; verifies depending on the requirements of power

On the front side of each module are the input and output connections, the display and the potentiometer for manual control.



Additional modules can be:

- PC interface card EDA for D/A and D/A data transfer
- closed loop sensor modul ER; available for strain gauge and capacitive sensor systems

In the casing the ENT and ENV modules can be placed individually. The casing can be delivered as a 19" rack mount. Depending on the application several amplifier modules can be combined with one power supply module ENT into one casing.

For each application **piezosystem jena** provides the most cost effective solution for highest precision positioning systems.

**piezosystem jena** GmbH

Prüssingstraße 27 • 07745 Jena • HRB Gera 2823 • VAT ID-Nr. DE 150531409

Konten: Commerzbank BLZ 820 400 00, KTO 258 420 9 • Deutsche Bank BLZ 820 700 24, KTO 531 571 8

Tel. + 49 (3641) 66 88 0 • Fax +49 (3641) 66 88 66 • e-Mail [info@piezojena.com](mailto:info@piezojena.com) •

<http://www.piezojena.com/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**electronics  
series ENV 40**

**150 V**

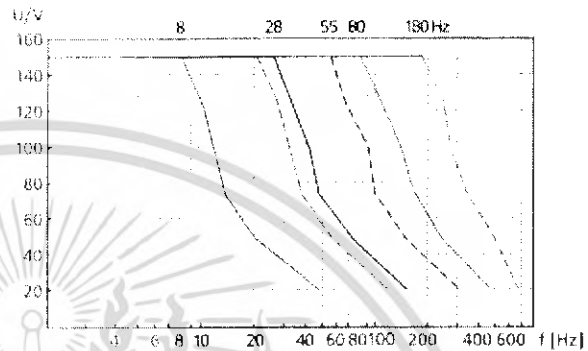
- amplifier system for adjustment with highest resolution
- output current 40mA permanent
- each channel with separate display
- excellent signal-to-noise ratio
- protection circuit for piezoelements
- OEM versions available

**system 40 – adjustment with highest resolution**

The amplifier system 40 was developed for static and low frequency applications. The system has very low noise characteristics (typ. 0.3 mV<sub>RMS</sub> @500 Hz) and thus provides resolutions in the nm and sub nm range.



amplifier module  
ENV 40 SG



PU 100 NVHL, PAHL 18/20 NV (typ. 6 µF)  
PSH 3 z, P 25/10 NV (typ. 2.4 µF)  
PU 90 NV, PXY 100 NV, PA 16/12 NV (typ. 1.7 µF)  
PU 40 NV, PSH 1 z, PA 8/12 NV (typ. 600 nF)  
P 16/8 NV (typ. 400 nF)  
Miniaktor (100 nF)

Diagram shows the typical frequency which can be reached as a function of the capacitance of the piezoelectric actuator and the driving voltage.

part no.	ENV 40 E-103-10	ENV 40 SG SG-sensor controller E-240-100	ENV 40 CAP capacitive sensor controller E-103-60	ENV 40 low noise E-103-18
module wide	14TE	20TE	20TE	21TE
output power	6W	6W	6W	6W
output current (permanent)	40mA	40mA	40mA	40mA
output voltage	-10V...+150V	-10V...+150V	-10V...+150V	-10V...+150V
signal noise (absolute)	<0.4mV	<0.4mV	<0.4mV	200µVpp
signal noise (relative)	< 2x10 <sup>-5</sup>	< 2x10 <sup>-5</sup>	< 2x10 <sup>-5</sup>	-
control input signal	0 to 10V; BNC	0 to 10V; BNC	0 to 10V; BNC	0 to 10V; BNC
input impedance	10kOhm	10kOhm	10kOhm	10kOhm
inner impedance	100kOhm	100kOhm	100kOhm	100kOhm
display	3.5digits	3.5digits	3.5digits	3.5digits
DC-offset setting	10-turn potentiometer	10-turn potentiometer	10-turn potentiometer	10-turn potentiometer
connector	LEMO OS 250	LEMO OS 250	LEMO OS 302	LEMO OS 250
monitor output	-1 to 15V; BNC	0 to 10V; BNC	0 to 10V; BNC	-1 to 15V; BNC

**piezosystem jena GmbH**

Prüssingstraße 27 • 07745 Jena • HRB Gera 2823 • VAT ID-Nr. DE 150531409

Konten: Commerzbank BLZ 820 400 00, KTO 258 420 9 • Deutsche Bank BLZ 820 700 24, KTO 531 571 8

Tel. + 49 (3641) 66 88 0 • Fax +49 (3641) 66 88 66 • e-Mail [info@piezojena.com](mailto:info@piezojena.com) •

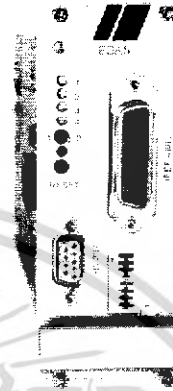
<http://www.piezojena.com/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**series EDA**

- universal AD/DA interface boards
- 4 channel DAC
- 8 channel ADC
- 12 /16 bit resolution
- 8 bit µP, 64 k RAM, 128 k Flash on-board programmable



**applications:**

- PC control of analog amplifiers
- automatic process control EDA 5

The EDA interface modules are universal I/O boards designed as a 19" slot card. The modules provide additional analog input and digital I/Os used for recording measurement signals or operating additional electronics. The programming of special scan functions can be facilitated with additional software. The main advantages of these modules are the built-in micro-controller and a free programmable memory capacity. The micro-controller is capable of input and output procedures or voltage values programmed in the memory. The EDA 3 and EDA 5 also have an IEEE 488.2 interface, as well as the RS 232 which is integrated into all of our EDA interface boards. The EDA 4 and EDA 5 have the same resolution of 16bit, the EDA 2 and the EDA 3 12bit.

		EDA 2	EDA 3	EDA 4	EDA 5
part.no.		E-202-20	E-202-30	E-202-40	E-202-50
type of interface		RS 232-C, 9600 or 19200 or 57600 baud	RS 232-C, 9600 or 19200 or 57600 baud and IEEE 488.2	RS 232-C, 9600 or 19200 or 57600 baud	RS 232-C, 9600 or 19200 or 57600 baud and IEEE 488.2
resolution		12 bit	12 bit	16 bit	18 bit
sample rate		32ksamples/s	32ksamples/s	32ksamples/s	32ksamples/s
number of analog	outputs	4	4	4	4
	inputs	8	8	8	8
number of digital	outputs	8 TTL (HCT573)	8 TTL (HCT573)	8 TTL (HCT573)	8 TTL (HCT573)
	inputs	8 as analog inputs programmable	8 as analog inputs programmable	4 as analog inputs programmable	4 as analog inputs programmable
output voltage range		0 ... 10 V	0 ... 10 V	0 ... 10 V	0 ... 10 V
modul width		6TE	10TE	6TE	10TE

**piezo**

Prüssingstraße 27 • 07745 Jena • HRB Gera 2823 • VAT ID-Nr. DE 150531409  
 Konten: Commerzbank BLZ 820 400 00, KTO 258 420 9 • Deutsche Bank BLZ 820 700 24, KTO 531 571 8  
 Tel. + 49 (3641) 66 88 0 • Fax +49 (3641) 66 88 66 • e-Mail info@piezोजना.com •  
<http://www.piezोजना.com/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## PZ 200 OEM

- accurate parallel motion in one direction because of parallelogram principles
- easy adjustment
- motion without any mechanical play because of solid state hinges
- integrated lever transmission
- motion up to 200  $\mu\text{m}$
- easily combined with other piezoelectric systems (especially xy and tilting systems)
- easily combined with mechanical positioning systems
- precision pin holes for accurate adjustment



### applications:

- fiber positioning, laser optics
- scanning systems
- micro manipulation

Due to the nature of the solid state flexure and parallelogram construction, the travel of these stages is without mechanical play. A much higher resolution, achievable with mechanical or electromechanical systems, is possible. The PZ series stages can be easily combined with XY-elements of the XYZ series or with tilting piezoelectric modules of the series PSH to give positioning in all degrees of freedom. Dynamic work is possible.

The elements of the series PZ can be equipped with measurement systems (strain gauge or capacitive sensors) that overcome the effect of hysteresis.

series PZ OEM			PZ 200	PZ 200 SG	PZ 400	PZ 400 SG
part no.		unit	S-628-00	S-628-01	S-628-00	S-628-01
motion**	open loop	$\mu\text{m}$	200	200	400	400
	closed loop	$\mu\text{m}$	-	160	-	320
integrated feed back system		-	-	strain gauge	-	strain gauge
max. load		N	100	100	100	100
max. voltage		V	150	150	150	150
capacitance each dir. ***( $\pm 20\%$ )		nF	2500	2500	14400	14400
resolution	open loop*	nm	0.3	0.3	0.75	0.75
	closed loop*	nm	-	3.0	-	7.5
typ. repeatability		nm	-	45	-	47
typ. non-linearity		%	-	0.05	-	0.08
resonant frequency		Hz	625	625	295	295
stiffness		N/ $\mu\text{m}$	0.3	0.3	0.37	0.37
force generation		N	75	75	100	100
dimensions	length L	mm	50	50	66	66
	width B	mm	16	18	20	20
	height H	mm	17	17	24	24
thread		mm	M4-6H x 5	M4-6H x 5	M4-6H x 6	M4-6H x 6
connector	voltage	-	LEMO 0S.250	LEMO 0S.250	LEMO 0S.250	LEMO 0S.250
	sensor	-	-	LEMO 0S.304	-	LEMO 0S.304
weight		g	140	165	155	175

\* measured with E-103-18 amplifier

\*\* typical value measured with  $-10$  to  $+150$  V

\*\*\* typical value for small electrical field strength

### piezosystem jena GmbH

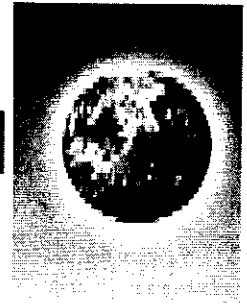
Prüssingstraße 27 • 07745 Jena • HRB Gera 2823 • VAT ID-Nr. DE 150531409

Konten: Commerzbank BLZ 820 400 00, KTO 258 420 9 • Deutsche Bank BLZ 820 700 24, KTO 531 571 8

Tel. + 49 (3641) 66 88 0 • Fax +49 (3641) 66 88 66 • e-Mail [info@piezोजना.com](mailto:info@piezोजना.com) •

<http://www.piezोजना.com/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



IN A  
NEW  
LIGHT

## Description

The C86135E CW laser diode is produced using an advanced MOCVD growth process employing a strained InGaAs active layer which offers high efficiency and excellent reliability.

The performance of this device benefits from a single quantum well chip structure combined with a lateral ridge wave guide. These design features enhance performance by producing a narrow spectral width, low astigmatism and near diffraction limited emission.

The C86135E is offered in a convenient package outline (9mm CD) which is equipped with an integral silicon rear facet monitor photodiode for precise power output control.

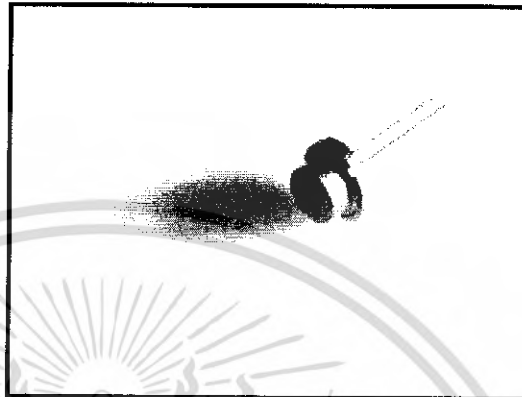
## Operating Considerations

The laser diode is operated by biasing it in the forward direction. Maximum ratings and limiting values must never be exceeded. This is a class IIIb laser.

Exposure of the diode to even very brief transient current spikes can cause catastrophic failure. It is recommended that the device be protected by connecting a resistor (5 - 10 Ohms) in series with the current source.

EG&G Canada is pleased to consider variations in performance and packaging to more fully address a user's particular application.

## 905nm CW Laser Diode C86135E



## Features

- CW Operation
- Strained active layer
- Near diffraction limited source
- Operation to 85°C

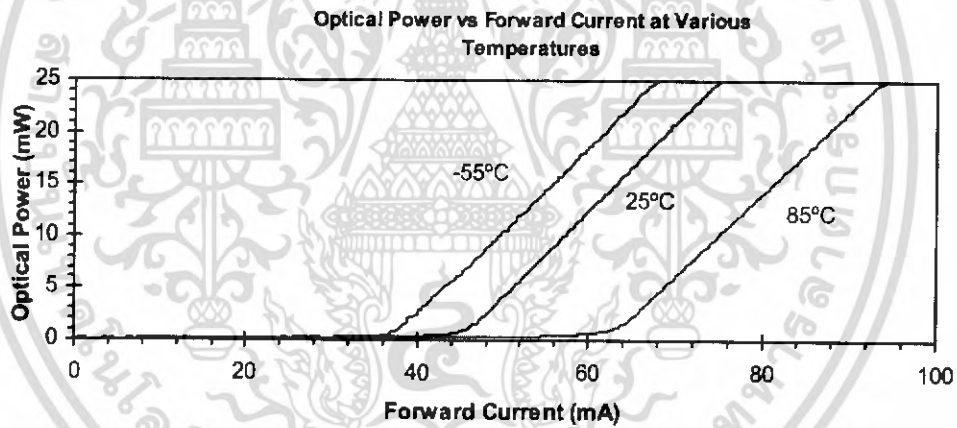
## Applications

- Point to point data communications
- Range finding

## Handling Precautions

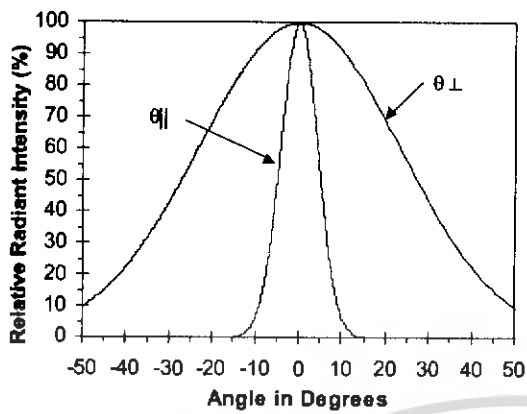
Adequate heat sinking should be supplied to dissipate up to 0.5 Watts. This device is static sensitive.

Characteristics at 25mW and 25°C					
Parameters	Symbol	Minimum	Typical	Maximum	Units
Forward Current	$I_F$		75	125	mA
Forward Voltage	$V_F$		1.6	3	V
Center Wavelength	$\lambda_c$	895	905	915	nm
Spectral Width (FWHM)	$\Delta\lambda$		0.6	2	nm
Threshold Current	$I_{TH}$		46		%
Monitor Current	$I_M$	7	10		$\mu$ A
Monitor Bias Voltage	$V_R$		-5	-45	Volts
Monitor Dark Current	$I_D$		0.43		nA
Source Size			1 X 3		$\mu$ m
Package Inductance	$L_P$		5.2		nH
<b>Maximum Ratings</b>		<b>Limiting Values</b>			
Optical Power	$P_O$			25	mW
Reverse Voltage	$V_{RM}$			3.0	V
Storage Temperature Range		-55		100	°C
Operating Temperature Range		-40		85	°C
Soldering (Leads only) 5 seconds				200	°C

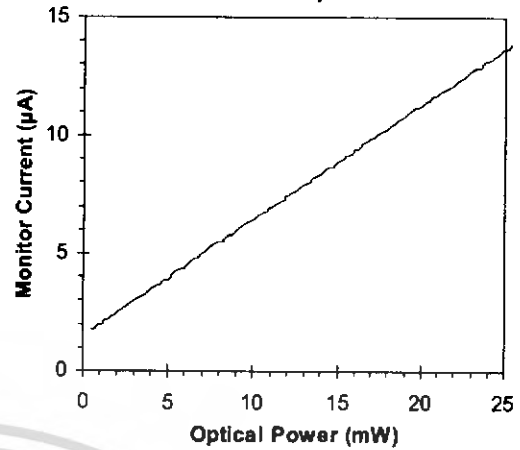


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

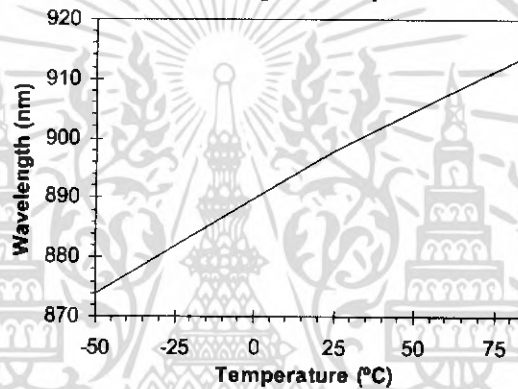
**Farfield Emission Pattern (Beam Divergence)**  
Perpendicular and Parallel to the Plane of the Junction



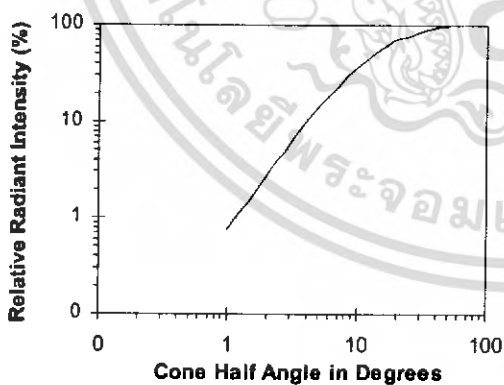
**Monitor Current vs Optical Power**



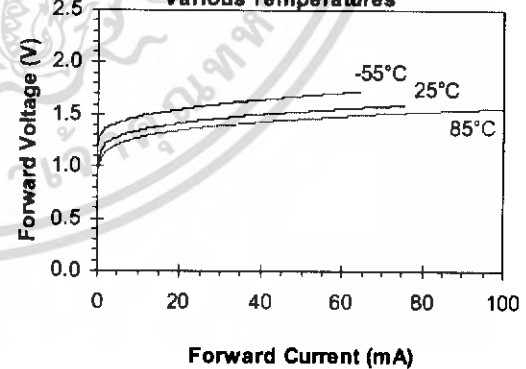
**Center Wavelength vs Temperature**



**Radiant Intensity vs Cone Collection**

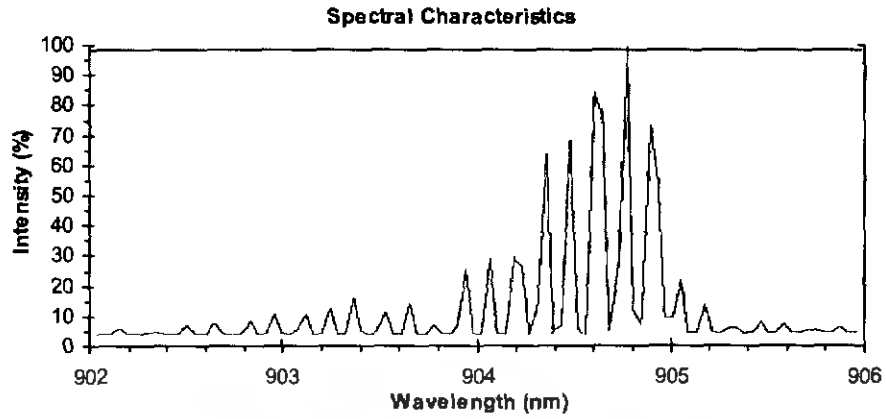


**Forward Voltage vs Forward Current at Various Temperatures**

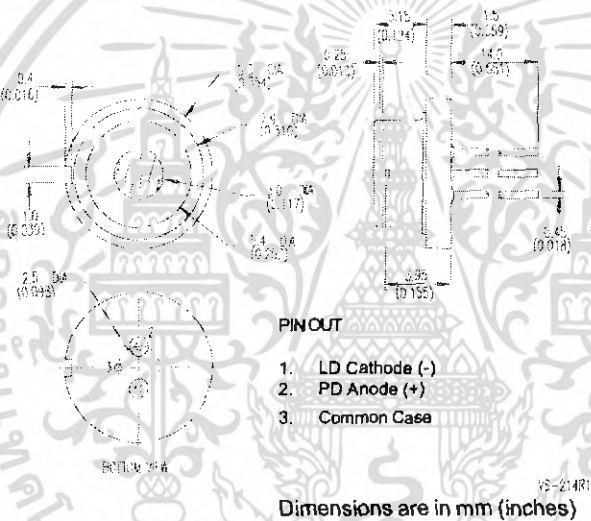


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Spectral Characteristics



## Mechanical Outline



EG&G welcomes inquiries about special types. We would be pleased to discuss the requirements of your application and the feasibility of designing a type specifically tailored to your needs.



EG&G is a registered trademark of EG&G, Inc.

All values are nominal; specifications subject to change without notice.

EG&G  
22001 Dumfries  
Vaudreuil, Quebec J7V 8P7

TEL: 450-424-3300  
Fax: 450-424-3411  
December 9, 1999

©1999 EG&G, Inc.  
All rights reserved

For more information e-mail us at [eod@egginc.com](mailto:eod@egginc.com) or visit our Web site at [www.egginc.com/opto](http://www.egginc.com/opto)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้