

การสร้างภาพพื้นผิววัตถุด้วยหลักการเซล์ฟมิกซิงในเลเซอร์ไดโอด

IMAGING C-SCAN USING THE SELF-MIXING TECHNIQUE IN A LASER DIODE



วิทยาลัยนวัตน์เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2547

ISBN 974-15-1109-4

การสร้างภาพพื้นผิววัตถุด้วยหลักการเซล์ฟมิกซิงในเลเซอร์ไดโอด

IMAGING C-SCAN USING THE SELF-MIXING TECHNIQUE IN A LASER DIODE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2547

ISBN 974-15-1109-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร

IMAGING C-SCAN USING THE SELF-MIXING TECHNIQUE IN A LASER DIODE



**A THESIS SUBMITTED PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2004

ISBN 974-15-1109-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2004

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสร้างภาพพื้นผิววัตถุด้วยหลักการเซลฟ์มิกซิงในเลเซอร์ไดโอด
นักศึกษา	นายสุรศักดิ์ พิพัฒน์ศาสตร์
รหัสนักศึกษา	42065005
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2547
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ปรีชา ยูพาพิน

บทคัดย่อ

การสร้างภาพพื้นผิววัตถุด้วยเทคนิคทางแสงที่เรียกว่า เทคนิคเซลฟ์มิกซิง (Self - Mixing Technique) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการย้อนกลับของแสงจากภายนอก (External Optical Feedback) เพื่อนำไปศึกษาการทดสอบพื้นผิววัตถุแบบไม่ทำลาย โดยมีหลักการคือ เมื่อปล่อยแสงจากแหล่งกำเนิดเลเซอร์ไดโอด ไปตกกระทบยังพื้นผิววัตถุที่ต้องการทดสอบ จากนั้นแสงจะสะท้อนกลับแล้วรวมกับแสงภายในเลเซอร์ไดโอด ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณของแสงจากการแทรกสอดภายในเลเซอร์ แควิตี้แบบฟาบรี - เพอร์โร (Fabry - Perot) ซึ่งอยู่ภายในเลเซอร์ไดโอด และวัดสัญญาณที่ได้จากโฟโตไดโอดภายในเลเซอร์ไดโอด ซึ่งสัญญาณการเปลี่ยนแปลงนี้จะขึ้นอยู่กับตัวแปรที่สำคัญได้แก่ กำลังเอาต์พุทของเลเซอร์ ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดเลเซอร์กับพื้นผิววัตถุที่เป็นตัวสะท้อนภายนอก ความสูงต่ำของพื้นผิววัตถุ ลักษณะพื้นผิววัตถุที่มีผลต่อการสะท้อนแสง โดยสัญญาณข้อมูลแต่ละจุดจะถูกสแกนตามแนวระนาบ XYZ แล้วสัญญาณที่ได้จะถูกนำไปขยายแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัลเก็บบันทึกลงแฟ้มข้อมูลในคอมพิวเตอร์ และถูกแปลงเป็นภาพโทนสีเทาด้วยโปรแกรมสร้างภาพ ซึ่งภาพที่ได้ยังสามารถนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อบอกถึงความสูงต่ำของพื้นผิววัตถุได้

Thesis Title	Imaging C - Scan Using the Self – Mixing Technique in a Laser Diode
Student	Mr.Surasak Pipatsart
Student ID.	42065005
Degree	Master of Science
Programme	Applied Physics
Year	2004
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Preecha Yupapin

ABSTRACT

An image construction based on an optical scheme known as self - mixing technique is demonstrated. Such a scheme is capable to use for surface characterization with non - destructive sense. The principle of the system is that when light from laser source i.e. laser diode is incident to the tested sample (target) , the reflected light (optical feedback) is entered into the laser cavity (Fabry - Perot cavity). The superposition of light mode is induced in the laser cavity , some light is transmitted via the rear reflector before falling into a built in photo - detector. The output signal obtained from photo - detector is related to the laser output and external cavity parameters such as cavity length , target reflectivity , laser diode injection current , and surface roughness and materials. The three - dimension scanning device is used to obtain the whole target. Material surface is characterized in term of gray level by computerized technique.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความเมตตากรุณาช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากคณาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยเฉพาะ รศ.ดร.ปรีชา ยูพาพิน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง ผศ.วิชาญ เตชิตธีระ และ ดร.สุรศักดิ์ เชียงกา ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางในการดำเนินงานวิจัย ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาของท่านเป็นที่สุดและขอกราบขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า

สุดท้ายนี้คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแต่ บิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่คอยให้กำลังใจและแนะนำแนวทางที่ดีในชีวิตแก่ข้าพเจ้าตลอดมา

สุรศักดิ์ พิพัฒน์ศาสตร์



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	3
1.4.1 แผนการดำเนินการวิจัย.....	3
1.4.2 ระยะเวลาในการดำเนินการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ธรรมชาติของแสง.....	6
2.2 หลักการเกิดแสงเลเซอร์ทั่วไป.....	11
2.2.1 การเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น.....	11
2.2.1.1 การดูดกลืนแสง.....	12
2.2.1.2 การเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง.....	13
2.2.1.3 การเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น.....	14
2.2.2 การเกิดประชากรผกผัน.....	15
2.2.3 ตัวสั้นพ้องเชิงทัศน.....	17
2.3 หลักการของเลเซอร์ไดโอดและโฟโตไดโอด.....	20
2.3.1 คุณสมบัติพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำ.....	21
2.3.1.1 สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์.....	21
2.3.1.2 สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์.....	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.1.2.1 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น.....	23
2.3.1.2.2 สารกึ่งตัวนำชนิดพี.....	24
2.3.2 กลไกการเปล่งแสงของเลเซอร์ไดโอด.....	25
2.3.3 กลไกการทำงานของโฟโตไดโอด.....	28
2.4 ทฤษฎีเซตฟิสิกส์.....	30
2.4.1 เงื่อนไขของเลเซอร์ออสซิลเลชันเมื่อมีแควิตี้ภายนอก.....	30
2.4.2 กำลังเอาต์พุตและความถี่ออสซิลเลชัน.....	33
2.4.3 กำลังเอาต์พุตและความยาวแควิตี้ภายนอก.....	35
บทที่ 3 การออกแบบและสร้างระบบ.....	40
3.1 เลเซอร์ไดโอดและโฟโตไดโอด.....	40
3.2 แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าสำหรับเลเซอร์ไดโอด.....	41
3.3 ตัวแปลงสัญญาณข้อมูลอนาล็อกเป็นสัญญาณข้อมูลดิจิทัล.....	41
3.4 ส่วนควบคุมส่วนสแกนพื้นผิววัตถุ XYZ.....	42
3.5 ส่วนไมโครคอนโทรลเลอร์.....	43
3.6 ส่วนโปรแกรมในการควบคุมการทำงาน.....	44
บทที่ 4 การทดลอง ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผล.....	45
4.1 การศึกษาความสัมพันธ์ของการเกิดเลเซอร์ของเลเซอร์ไดโอด.....	45
4.2 การศึกษาการวัดสัญญาณการสะท้อนของแสงโดยโฟโตไดโอด.....	50
4.2.1 การศึกษาการวัดสัญญาณการสะท้อนของแสงโดยโฟโตไดโอดขณะที่ไม่มี การสะท้อนกลับของแสงจากภายนอก.....	50
4.2.2 การศึกษาการวัดสัญญาณการสะท้อนของแสงโดยโฟโตไดโอดขณะที่มี การสะท้อนกลับของแสงจากภายนอก.....	52
4.3 การศึกษาความเป็นเชิงเส้นของสัญญาณการสะท้อนของแสง.....	57
4.3.1 ศึกษาค่าสัญญาณการสะท้อนที่ลักษณะพื้นผิวต่างๆ ขณะที่ความเข้มของ แสงเลเซอร์คงที่.....	59

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.2 ศึกษาความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามใกล้และสนามไกลของลักษณะพื้นผิวต่างๆ ขณะที่ความเข้มของแสงเลเซอร์คงที่.....	68
4.4 การสร้างภาพพื้นผิววัตถุจากความเป็นเชิงเส้นของสัญญาณการสะท้อน.....	82
บทที่ 5 บทสรุป แนวทางในการพัฒนาและการประยุกต์.....	88
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	88
5.2 ปัญหาที่พบ แนวทางแก้ไขและพัฒนาในอนาคต.....	89
เอกสารอ้างอิง.....	92
ภาคผนวก.....	94
ประวัติผู้เขียน.....	133



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	10
4.1 เปรียบเทียบความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามไกล ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 5 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 mA ของลักษณะพื้นผิวต่างๆ.....	81
4.2 เปรียบเทียบความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามไกล ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 10 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 70 mA ของลักษณะพื้นผิวต่างๆ.....	81



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แผนผังการทดลองของโทมัส ยังก์ ที่ แสดงสมบัติการแทรกสอดของคลื่นแสง.....6
2.2	การแทรกสอดของคลื่นแสง 2 ลำที่ตกกระทบบนฉาก (ก) มีเฟสตรงกัน (ข) มีเฟสต่างกัน.....7
2.3	การเลี้ยวเบนของคลื่นแสงโดยใช้หลักทฤษฎีของฮอยเกนส์.....8
2.4	การเลี้ยวเบนของคลื่นแสงผ่านช่องเปิดเล็กๆ โดยใช้หลักทฤษฎีของฮอยเกนส์.....8
2.5	(ก) การสั้นของสนามไฟฟ้าแบบไร้ระเบียบของแสงที่ไม่มีโพลาไรซ์.....9 (ข) การสั้นของสนามไฟฟ้าในแนวระนาบอย่างเป็นระเบียบของแสงที่มีโพลาไรซ์.....9
2.6	ทิศทางการเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า.....9
2.7	กระบวนการดูดกลืนแสงแบบถูกกระตุ้น.....12
2.8	กระบวนการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง.....13
2.9	กระบวนการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น.....14
2.10	การกระจายแบบโบลท์ซมานของจำนวนอะตอมที่ระดับพลังงาน E_1 และ E_2 ที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน.....16
2.11	การเกิดประชากรผกผัน.....16
2.12	ตัวสั้นพ้องเชิงทัศนที่ประกอบด้วยกระจก 2 บาน M_1 และ M_2 มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน R_1 และ R_2 และมีรัศมีความโค้งเป็น r_1 และ r_2 ตามลำดับ.....19
2.13	การจัดวางตัวสั้นพ้องเชิงทัศนแบบต่างๆ.....20
2.14	แถบพลังงานของตัวนำและฉนวน.....21
2.15	โครงสร้างอะตอมของ (ก) เจอร์เมเนียม(Ge) และ (ข) ซิลิกอน (Si)22
2.16	พันธะโควาเลนต์ของอะตอมซิลิกอน (Si).....22
2.17	แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ $E_g(\text{Si}) = 1.1 \text{ eV}$ และ $E_g(\text{Ge}) = 0.67 \text{ eV}$23
2.18	อะตอมของพลวงที่ถูกเจือลงในสารกึ่งตัวนำซิลิกอน.....23
2.19	แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น.....24
2.20	อะตอมของโบรอนที่ถูกเจือลงในสารกึ่งตัวนำซิลิกอน.....24
2.21	แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพี.....25
2.22	การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮล.....25
2.23	รอยต่อพีเอ็นที่โคปสารเจือปนด้วยความเข้มข้นสูง.....26
2.24	รอยต่อพีเอ็นที่กำเนิดแสงเลเซอร์ในเลเซอร์ไดโอด.....26
2.25	ความสัมพันธ์ของการฉีดกระแสเพื่อจะทำให้เกิดเลเซอร์.....27

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.26 กลไกการเปล่งแสงเลเซอร์ในเลเซอร์ไดโอด.....	27
2.27 แสดงโครงสร้างพื้นฐานรอยต่อ pn ของโฟโตไดโอด.....	28
2.28 แสดงแถบพลังงานของโฟโตไดโอด.....	29
2.29 ลักษณะสมบัติของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในโฟโตไดโอด.....	29
2.30 แบบจำลองแควิตีของเลเซอร์ไดโอดที่มีแควิตีภายนอก.....	30
2.31 แบบจำลองวงจรสมมูลของเลเซอร์ไดโอดเมื่อมีตัวสะท้อนภายนอก.....	31
2.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเอาต์พุตกับค่ากระแสขับ.....	33
2.33 ความสัมพันธ์ของกำลังเอาต์พุตและค่ากระแสขับที่ค่าความยาวแควิตีภายนอกต่างๆ กัน (ก) $L = 10 \mu l$ (ข) $L = 50 \mu l$ และ (ค) $L = 100 \mu l$	34
2.34 กำลังเอาต์พุตเป็นฟังก์ชันของความยาวแควิตีภายนอก.....	36
2.35 ค่ากำลังเอาต์พุตเป็นฟังก์ชันของความยาวแควิตีภายนอกสำหรับตำแหน่งของแควิตี ภายนอกที่ต่างกัน (ก) $R = 0.248, L = 15-19 \text{ mm}$ (ข) $R = 0.248, L = 100-104 \text{ mm}$	37
2.36 ค่ากำลังเอาต์พุตเป็นฟังก์ชันของความยาวแควิตีภายนอกสำหรับค่าการสะท้อนกลับของ แสงที่ต่างกัน (ก) $R = 0.0115, L = 15-19 \text{ mm}$ (ข) $R = 0.387, L = 15-19 \text{ mm}$	37
2.37 แบบจำลองการเดินทางของแสงภายในแควิตีของเลเซอร์ไดโอดที่มีแควิตีภายนอก.....	38
2.38 การแทรกสอดภายในเลเซอร์แควิตีแบบฟาบริ-เพอร์โร (Fabry-Perot).....	38
2.39 การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณการแทรกสอดภายในเลเซอร์แควิตีแบบฟาบริ-เพอร์โร.....	39
3.1 เลเซอร์ไดโอดรุ่น SANYO DL3038-033 และรุ่น SANYO DL4039-011.....	40
3.2 แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าสำหรับเลเซอร์ไดโอดของบริษัท NIHON KAGAKU ENG.....	41
3.3 วงจรแปลงสัญญาณข้อมูลแอนาล็อกเป็นสัญญาณข้อมูลดิจิทัล เบอร์ CS 5526.....	42
3.4 ส่วนกลไกในการสแกนในแนวแกน XYZ.....	42
3.5 ส่วนไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ควบคุมส่วนต่างๆ.....	43
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเลเซอร์ไดโอดขนาด 5 mW กับ ค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมเลเซอร์ไดโอด (LD).....	45
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเลเซอร์ไดโอดขนาด 5 mW กับ ค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมโฟโตไดโอด (PD).....	46
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเลเซอร์ไดโอดขนาด 5 mW กับ ค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวต้านทาน (R).....	46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเลเซอร์ไดโอดขนาด 10 mW กับค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมเลเซอร์ไดโอด (LD).....	47
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเลเซอร์ไดโอดขนาด 10 mW กับค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมโฟโตไดโอด (PD).....	47
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเลเซอร์ไดโอดขนาด 10 mW กับค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวต้านทาน (R).....	48
4.7 ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานในช่วงที่เกิดการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเองและช่วงที่เกิดการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นของเลเซอร์ไดโอดขนาด 5 mW.....	48
4.8 ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานในช่วงที่เกิดการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเองและช่วงที่เกิดการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นของเลเซอร์ไดโอดขนาด 10 mW.....	49
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและกำลังเอาต์พุตของแสงเลเซอร์ของเลเซอร์ไดโอดขนาด 5 mW.....	49
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและกำลังเอาต์พุตของแสงเลเซอร์ของเลเซอร์ไดโอดขนาด 10 mW.....	50
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเลเซอร์ไดโอดขนาด 5 mW กับค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมโฟโตไดโอด (PD) ขณะที่ไม่มีกระแสสะท้อนกลับของแสงจากภายนอก.....	51
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเลเซอร์ไดโอดขนาด 10 mW กับค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมโฟโตไดโอด (PD) ขณะที่ไม่มีกระแสสะท้อนกลับของแสงจากภายนอก.....	51
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ทำให้เกิดเลเซอร์กับความต่างศักย์ไฟฟ้าของโฟโตไดโอดภายในเลเซอร์ไดโอด ขนาด 5 mW ที่มีพื้นผิวการสะท้อนภายนอกเป็นทองเหลือง.....	52
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ทำให้เกิดเลเซอร์กับความต่างศักย์ไฟฟ้าของโฟโตไดโอดภายในเลเซอร์ไดโอด ขนาด 10 mW ที่มีพื้นผิวการสะท้อนภายนอกเป็นทองเหลือง.....	53

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ทำให้เกิดเลเซอร์กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอด ขนาด 5 mW ที่มีพื้นผิวการสะท้อนภายนอกเป็นทองเหลือง.....	53
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ทำให้เกิดเลเซอร์กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอด ขนาด 10 mW ที่มีพื้นผิวการสะท้อนภายนอกเป็นทองเหลือง.....	54
4.17 เปรียบเทียบสัญญาณการสะท้อนกลับของแสงจากภายนอกของพื้นผิวต่างๆ กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของโฟโตไดโอดภายในเลเซอร์ไดโอด ขนาด 5 mW ที่กระแสไฟฟ้า 50 mA ที่ทำให้เกิดเลเซอร์.....	55
4.18 เปรียบเทียบสัญญาณการสะท้อนกลับของแสงจากภายนอกของพื้นผิวต่างๆ กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของโฟโตไดโอดภายในเลเซอร์ไดโอด ขนาด 10 mW ที่กระแสไฟฟ้า 70 mA ที่ทำให้เกิดเลเซอร์.....	55
4.19 เปรียบเทียบสัญญาณการสะท้อนกลับของแสงจากภายนอกของพื้นผิวต่างๆ กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอด ขนาด 5 mW ที่กระแสไฟฟ้า 50 mA ที่ทำให้เกิดเลเซอร์.....	56
4.20 เปรียบเทียบสัญญาณการสะท้อนกลับของแสงจากภายนอกของพื้นผิวต่างๆ กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอด ขนาด 10 mW ที่กระแสไฟฟ้า 70 mA ที่ทำให้เกิดเลเซอร์.....	56
4.21 แผนภาพแสดงการวัดสัญญาณการสะท้อนโดยเปลี่ยนแปลงระยะห่างตามแนวแกน Z ระหว่างเลเซอร์ไดโอดซึ่งภายในมีโฟโตไดโอด กับพื้นผิววัตถุ.....	57
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่โฟโตไดโอด (PD) กับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 10 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 70 mA ที่พื้นผิวการสะท้อนของทองเหลือง.....	58
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ความต้านทาน R กับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 10 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 70 mA ที่พื้นผิวการสะท้อนของทองเหลือง.....	58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของลักษณะพื้นผิววัตถุต่างๆ ของเลเซอร์ไดโอดขนาด 5 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 30 mA.....	59
4.25 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของลักษณะพื้นผิววัตถุต่างๆ ของเลเซอร์ไดโอดขนาด 5 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 40 mA.....	60
4.26 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของลักษณะพื้นผิววัตถุต่างๆ ของเลเซอร์ไดโอดขนาด 5 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 mA.....	60
4.27 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของลักษณะพื้นผิววัตถุต่างๆ ของเลเซอร์ไดโอดขนาด 10 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 mA.....	61
4.28 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของลักษณะพื้นผิววัตถุต่างๆ ของเลเซอร์ไดโอดขนาด 10 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 60 mA.....	61
4.29 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของลักษณะพื้นผิววัตถุต่างๆ ของเลเซอร์ไดโอดขนาด 10 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 70 mA.....	62
4.30 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างความเข้มของแสงเลเซอร์ที่เพิ่มขึ้นกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอดขนาด 5 mW ของพื้นผิวเหล็ก.....	62
4.31 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างความเข้มของแสงเลเซอร์ที่เพิ่มขึ้นกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอดขนาด 5 mW ของพื้นผิวกระจกเลเซอร์.....	63
4.32 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างความเข้มของแสงเลเซอร์ที่เพิ่มขึ้นกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอดขนาด 5 mW ของพื้นผิวทองแดง.....	63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.33 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างความเข้มของแสงเลเซอร์ที่เพิ่มขึ้นกับ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับ ระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอดขนาด 5 mW ของพื้นผิวทองเหลือง.....	64
4.34 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างความเข้มของแสงเลเซอร์ที่เพิ่มขึ้นกับ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับ ระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอดขนาด 5 mW ของพื้นผิวอลูมิเนียม.....	64
4.35 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างความเข้มของแสงเลเซอร์ที่เพิ่มขึ้นกับ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับ ระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอดขนาด 5 mW ของพื้นผิวแผ่นซีดี.....	65
4.36 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างความเข้มของแสงเลเซอร์ที่เพิ่มขึ้นกับ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับ ระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอดขนาด 10 mW ของพื้นผิวเหล็ก.....	65
4.37 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างความเข้มของแสงเลเซอร์ที่เพิ่มขึ้นกับ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับ ระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอดขนาด 10 mW ของพื้นผิวกระจกเลเซอร์....	66
4.38 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างความเข้มของแสงเลเซอร์ที่เพิ่มขึ้นกับ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับ ระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอดขนาด 10 mW ของพื้นผิวทองแดง.....	66
4.39 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างความเข้มของแสงเลเซอร์ที่เพิ่มขึ้นกับ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับ ระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอดขนาด 10 mW ของพื้นผิวทองเหลือง.....	67
4.40 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างความเข้มของแสงเลเซอร์ที่เพิ่มขึ้นกับ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับ ระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอดขนาด 10 mW ของพื้นผิวอลูมิเนียม.....	67
4.41 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างความเข้มของแสงเลเซอร์ที่เพิ่มขึ้นกับ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับ ระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอดขนาด 10 mW ของพื้นผิวแผ่นซีดี.....	68

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.42	ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามใกล้ ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของ เลเซอร์ไดโอด ขนาด 5 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 mA ของลักษณะพื้นผิวเหล็ก.....69
4.43	ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามใกล้ ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของ เลเซอร์ไดโอด ขนาด 5 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 mA ของลักษณะพื้นผิวแผ่นซีดี...69
4.44	ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามใกล้ ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของ เลเซอร์ไดโอด ขนาด 5 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 mA ของลักษณะพื้นผิว กระจกเลเซอร์.....70
4.45	ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามใกล้ ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของ เลเซอร์ไดโอดขนาด 5 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 mA ของลักษณะพื้นผิว ทองเหลือง.....70
4.46	ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามใกล้ ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของ เลเซอร์ไดโอดขนาด 5 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 mA ของลักษณะพื้นผิว ทองแดง.....71
4.47	ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามใกล้ ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของ เลเซอร์ไดโอดขนาด 5 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 mA ของลักษณะพื้นผิว อลูมิเนียม.....71
4.48	ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามใกล้ ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของ เลเซอร์ไดโอดขนาด 10 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 70 mA ของลักษณะพื้นผิวเหล็ก.....72
4.49	ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามใกล้ ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของ เลเซอร์ไดโอดขนาด 10 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 70 mA ของลักษณะพื้นผิวแผ่นซีดี.....72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.50	ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามใกล้ ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของ เลเซอร์ไดโอดขนาด 10 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 70 mA ของลักษณะพื้นผิว กระจกเลเซอร์.....73
4.51	ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามใกล้ ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของ เลเซอร์ไดโอดขนาด 10 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 70 mA ของลักษณะพื้นผิว ทองเหลือง.....73
4.52	ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามใกล้ ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของ เลเซอร์ไดโอดขนาด 10 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 70 mA ของลักษณะพื้นผิว ทองแดง.....74
4.53	ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามใกล้ ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของ เลเซอร์ไดโอดขนาด 10 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 70 mA ของลักษณะพื้นผิว อลูมิเนียม.....74
4.54	ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามไกล ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของ เลเซอร์ไดโอดขนาด 5 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 mA ของลักษณะพื้นผิวเหล็ก.....75
4.55	ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามไกล ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของ เลเซอร์ไดโอดขนาด 5 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 mA ของลักษณะพื้นผิวแผ่นซีดี.....75
4.56	ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามไกล ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของ เลเซอร์ไดโอดขนาด 5 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 mA ของลักษณะพื้นผิว กระจกเลเซอร์.....76

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.57	
ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามไกล ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของ เลเซอร์ไดโอดขนาด 5 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 mA ของลักษณะพื้นผิว ทองเหลือง.....	76
4.58	
ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามไกล ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของ เลเซอร์ไดโอดขนาด 5 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 mA ของลักษณะพื้นผิว ทองแดง.....	77
4.59	
ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามไกล ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของ เลเซอร์ไดโอดขนาด 5 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 mA ของลักษณะพื้นผิว อลูมิเนียม.....	77
4.60	
ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามไกล ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของ เลเซอร์ไดโอดขนาด 10 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 70 mA ของลักษณะพื้นผิวเหล็ก.....	78
4.61	
ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามไกล ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของ เลเซอร์ไดโอดขนาด 10 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 70 mA ของลักษณะพื้นผิวแผ่นซีดี.....	78
4.62	
ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามไกล ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของ เลเซอร์ไดโอดขนาด 10 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 70 mA ของลักษณะพื้นผิว กระจกเลเซอร์.....	79
4.63	
ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามไกล ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของ เลเซอร์ไดโอดขนาด 10 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 70 mA ของลักษณะพื้นผิว ทองเหลือง.....	79

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.64 ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามไกล ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอดขนาด 10 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 70 mA ของลักษณะพื้นผิวทองแดง.....	80
4.65 ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามไกล ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอดขนาด 10 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 70 mA ของลักษณะพื้นผิวอลูมิเนียม.....	80
4.66 การจัดวางวัตถุบนแท่นสแกน XYZ.....	82
4.67 ค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามใกล้และสนามไกล ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอดของ ลักษณะพื้นผิวเหรียญ.....	83
4.68 ช่วงของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามใกล้ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอดของลักษณะ พื้นผิวเหรียญ.....	83
4.69 ช่วงของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามไกลของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอดของลักษณะพื้นผิวเหรียญ.....	84
4.70 ภาพที่ได้จากการนำข้อมูลในช่วงสนาม ใกล้และสนาม ไกลมาสร้างภาพ.....	84
4.71 ภาพที่ได้จากการสแกนส่วนต่างๆ ของวัตถุที่เป็นเหรียญ โดยใช้เลเซอร์ไดโอดขนาด 5 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 mA ในช่วงสัญญาณที่มีความเป็นเชิงเส้น.....	85
4.72 ภาพ 3 มิติที่ได้จากการสแกนส่วนหนึ่งของวัตถุที่เป็นเหรียญ โดยใช้เลเซอร์ไดโอดขนาด 5 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 mA ในช่วงสัญญาณที่มีความเป็นเชิงเส้น.....	86
4.73 ภาพที่ได้จากการสแกนวัตถุมีสีที่แตกต่างกัน แต่มีพื้นผิวเรียบเท่ากัน (ก) ภาพ 2 มิติที่ได้จากการสแกนวัตถุมีสีที่แตกต่างกัน แต่มีพื้นผิวเรียบเท่ากัน (ข) ภาพ 3 มิติที่ได้จากการสแกนวัตถุมีสีที่แตกต่างกัน แต่มีพื้นผิวเรียบเท่ากัน.....	86

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย [10]

การสร้างภาพพื้นผิววัตถุด้วยหลักการเซลฟมิกซิงในเลเซอร์ไดโอด เป็นการศึกษาการทดสอบพื้นผิววัตถุแบบไม่ทำลาย เพราะวัตถุที่นำมาทดสอบอาจจะมีขนาดเล็กและบาง ดังนั้นการทดสอบโดยการถูกต้องซึ่งงานอาจเกิดความเสียหายได้ เทคนิคทางแสงจึงเป็นตัวเลือกหนึ่งที่ถูกเลือก แต่ระบบการวัดทางแสงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ทางแสงภายนอกอื่นๆ เช่น ผลึกแยกลำแสง กระจกอ้างอิง อุปกรณ์รับสัญญาณ ซึ่งการจัดวางอุปกรณ์ค่อนข้างยุ่งยาก ดังนั้นเทคนิคเซลฟมิกซิงจึงถูกเลือก เพราะอุปกรณ์มีขนาดเล็กกะทัดรัดไม่ต้องมีอุปกรณ์ภายนอกมาเสริม เนื่องจากในตัวเลเซอร์ไดโอดจะประกอบด้วยเลเซอร์ไดโอดซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ และมีโฟโตไดโอดอยู่ภายในซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับแสงที่สะท้อนกลับมา โดยมีหลักการคือ เมื่อปล่อยแสงจากแหล่งกำเนิดเลเซอร์ไดโอดที่มีความเข้มแสงและความถี่ที่คงที่ ซึ่งความเข้มแสงนี้จะถูกควบคุมโดยปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเลเซอร์ไดโอด และเมื่อแสงเลเซอร์ไปตกกระทบยังพื้นผิววัตถุที่ต้องการทดสอบ หลังจากนั้นแสงจะสะท้อนกลับ ความเข้มแสงที่สะท้อนกลับจะมีค่ามากขึ้นอยู่กับตัวแปรที่สำคัญได้แก่ กำลังเอาต์พุทของเลเซอร์ไดโอด ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดเลเซอร์กับพื้นผิววัตถุซึ่งเป็นตัวสะท้อนภายนอก ลักษณะของพื้นผิววัตถุที่มีผลต่อการสะท้อนแสง เช่น สีของพื้นผิววัตถุ ความเรียบรวมถึงความมันวาวของพื้นผิววัตถุ ความสูงต่ำของพื้นผิววัตถุ ในการวิจัยนี้จะพิจารณาพื้นผิววัตถุที่มีเนื้อชนิดเดียวกัน ซึ่งแสงสะท้อนกลับจะเกิดการแทรกสอดกับแสงเลเซอร์แบบเซลฟมิกซิงภายในเลเซอร์แควิตีแบบฟาบรี-เพอร์โร (Fabry-Perot) สัญญาณการเปลี่ยนแปลงนี้สามารถวัดได้จากโฟโตไดโอดภายในตัวเลเซอร์ไดโอด สัญญาณที่ได้จากโฟโตไดโอดจะเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละจุดตามแนวการสแกน เช่น การสแกนตามแนวแกน XY เป็นการวิจัยเพื่อศึกษาความเรียบ (ความสูงต่ำ) หรือความลาดเอียงของพื้นผิววัตถุ และการสแกนตามแนวแกน Z เป็นการวิจัยเพื่อศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่มีระยะห่างจากแหล่งกำเนิดเลเซอร์ต่างๆ กัน เพื่อนำไปสู่การกำหนดความหนาของพื้นผิววัตถุที่ต้องการทดสอบ สัญญาณที่ได้จากโฟโตไดโอดจะเป็นข้อมูลแต่ละจุดที่ถูกสแกน สัญญาณนี้จะถูกนำไปขยายและแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัล และเก็บบันทึกลงเพิ่มข้อมูลในคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะถูกลงเป็นกราฟหรือภาพถ่ายโทนสีเทาด้วยโปรแกรมสร้างภาพ ภาพที่ได้ยังสามารถนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อบอกถึงความสูงต่ำของพื้นผิววัตถุ เพราะบางครั้งถ้าสังเกตด้วยตาเปล่าอาจจะไม่ทราบว่าพื้นผิววัตถุมีความลาดเอียง หรือมีความเรียบมากน้อยแค่ไหน

สำหรับการสร้างภาพพื้นผิววัตถุด้วยหลักการเซลฟี่มิกซิงในเลเซอร์ไดโอด (Imaging C-Scan Using the Self-Mixing Technique in a Laser Diode) ที่ทำการศึกษาวิจัยเป็นวิทยานิพนธ์นี้มีหลักการที่ไม่สลับซับซ้อนอะไรมากนัก การจัดวางอุปกรณ์ก็ไม่ยุ่งยาก แต่สามารถทำงานและให้ผลลัพธ์ได้เท่าเทียมกับเครื่องมือที่ผลิตจากต่างประเทศ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาหลักการเซลฟี่มิกซิงในเลเซอร์ไดโอด
- 1.2.2 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเลเซอร์
- 1.2.3 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเอาต์พุทของเลเซอร์ไดโอดที่มีผลต่อสัญญาณที่ได้จากโฟโตไดโอด โดยศึกษาขณะที่ยังไม่มีการย้อนกลับของแสงจากภายนอกและมีการย้อนกลับของแสงจากภายนอก
- 1.2.4 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเอาต์พุทของเลเซอร์ไดโอดที่มีผลต่อสัญญาณที่ได้จากโฟโตไดโอด โดยศึกษาขณะที่มีการย้อนกลับของแสงจากภายนอกที่ลักษณะพื้นผิววัตถุต่างๆ ที่มีการสะท้อนแสงที่แตกต่างกัน
- 1.2.5 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเอาต์พุทของเลเซอร์ไดโอดที่มีผลต่อสัญญาณที่ได้จากโฟโตไดโอด โดยศึกษาระยะห่างต่างๆ กัน ของแหล่งกำเนิดเลเซอร์กับ พื้นผิวสะท้อนของวัตถุ
- 1.2.6 ศึกษาการออกแบบและสร้างระบบสแกนพื้นผิววัตถุ XYZ โดยควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์
- 1.2.7 ศึกษาการนำสัญญาณการสะท้อนที่เปลี่ยนแปลงที่ได้จากโฟโตไดโอดมาแปลงเป็นภาพถ่ายโทโนแกรม และวิเคราะห์ถึงความสูงต่ำของพื้นผิววัตถุ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 วัดค่ากระแสกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเลเซอร์
- 1.3.2 วัดค่ากำลังเอาต์พุทของเลเซอร์ไดโอดที่มีผลต่อสัญญาณที่ได้จากโฟโตไดโอด โดยยังไม่มีการย้อนกลับของแสงจากภายนอกและมีการย้อนกลับของแสงจากภายนอก
- 1.3.3 วัดค่ากำลังเอาต์พุทของเลเซอร์ไดโอดที่มีผลต่อสัญญาณที่ได้จากโฟโตไดโอด โดยมีการย้อนกลับของแสงจากภายนอกที่ลักษณะพื้นผิววัตถุต่างๆ ที่มีการสะท้อนที่แตกต่างกัน

- 1.3.4 วัดค่ากำลังเอาต์พุทของเลเซอร์ไดโอดที่มีผลต่อสัญญาณที่ได้จากโฟโตไดโอด โดยพื้นผิววัตถุที่สะท้อนจะมีระยะห่างจากแหล่งกำเนิดเลเซอร์ต่างๆ กัน
- 1.3.5 การออกแบบและสร้างระบบสแกนพื้นผิววัตถุ XYZ โดยควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์
- 1.3.6 การออกแบบและสร้างระบบแปลงสัญญาณที่ได้จากโฟโตไดโอดให้เป็นข้อมูลดิจิทัล และเก็บบันทึกลงเพิ่มข้อมูลในคอมพิวเตอร์
- 1.3.7 นำข้อมูลดิจิทัลที่ได้จากการแปลงสัญญาณการสะท้อนที่เปลี่ยนแปลงที่ได้จากโฟโตไดโอดมาวิเคราะห์เป็นกราฟหรือภาพถ่ายโทโนแกรมและวิเคราะห์ถึงความสูงต่ำของพื้นผิววัตถุ

การศึกษาวิจัยนี้จะได้ชุดอุปกรณ์ที่สามารถนำหลักการเซลล์ฟิมิกซิงมาสร้างภาพพื้นผิววัตถุ และวิเคราะห์ถึงความแตกต่างของพื้นผิววัตถุได้

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1.4.1 แผนการดำเนินการวิจัยแบ่งเป็นขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาทฤษฎีและหลักการ โดยทั่วไปของแสงเลเซอร์ (เลเซอร์ไดโอดและโฟโตไดโอด) และศึกษาทฤษฎีและหลักการของปรากฏการณ์เซลล์ฟิมิกซิงที่เกิดขึ้นภายในเลเซอร์แควิตี้ในเลเซอร์ไดโอด
- ขั้นตอนที่ 2 ออกแบบการทดลองควบคุมกำลังเอาต์พุทของแสงเลเซอร์และวัดสัญญาณการเปลี่ยนแปลงที่ได้จากโฟโตไดโอดของแสงสะท้อนที่ย้อนกลับ
- ขั้นตอนที่ 3 ออกแบบการทดลองเพื่อเก็บค่าความสัมพันธ์ต่างๆ เช่น
 - 3.1 วัดค่ากระแสกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเลเซอร์
 - 3.2 วัดค่ากำลังเอาต์พุทของเลเซอร์ไดโอดที่มีผลต่อสัญญาณที่ได้จากโฟโตไดโอด โดยยังไม่มี การย้อนกลับของแสงจากภายนอกและมีการย้อนกลับของแสงจากภายนอก
 - 3.3 วัดค่ากำลังเอาต์พุทของเลเซอร์ไดโอดที่มีผลต่อสัญญาณที่ได้จากโฟโตไดโอด โดยมีการย้อนกลับของแสงจากภายนอกที่ลักษณะ พื้นผิววัตถุที่มีการสะท้อนที่แตกต่างกัน
 - 3.4 วัดค่ากำลังเอาต์พุทของเลเซอร์ไดโอดที่มีผลต่อสัญญาณที่ได้จากโฟโตไดโอด โดยพื้นผิววัตถุที่สะท้อนจะมีระยะห่างจากแหล่งกำเนิดเลเซอร์ต่างๆ กัน

- ขั้นตอนที่ 4 ออกแบบและสร้างระบบสแกนพื้นผิววัตถุ XYZ โดยควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์
- ขั้นตอนที่ 5 ออกแบบและสร้างระบบแปลงสัญญาณที่ได้จากโฟโตไดโอดให้เป็นข้อมูลดิจิทัลและเก็บบันทึกลงแฟ้มข้อมูลในคอมพิวเตอร์
- ขั้นตอนที่ 6 นำข้อมูลดิจิทัลที่ได้จากการแปลงสัญญาณการสะท้อนที่เปลี่ยนแปลงที่ได้จากโฟโตไดโอดมาวิเคราะห์เป็นกราฟหรือภาพถ่ายโทโนแกรมและวิเคราะห์ถึงความสูงต่ำของพื้นผิววัตถุ
- ขั้นตอนที่ 7 ศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากเทคนิคเซลฟิมิกซิงเพื่อนำไปประยุกต์กับงานต่างๆ อย่างเหมาะสม
- ขั้นตอนที่ 8 สรุปการทำวิทยานิพนธ์และแนวทางในการพัฒนาต่อไปในอนาคต

1.4.2 ระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการวิจัยในแต่ละขั้นตอน

เดือนที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ลำดับ												
ขั้นตอนที่ 1	←→											
ขั้นตอนที่ 2		←→										
ขั้นตอนที่ 3			←→									
ขั้นตอนที่ 4				←→								
ขั้นตอนที่ 5					←→							
ขั้นตอนที่ 6						←→						
ขั้นตอนที่ 7							←→					
ขั้นตอนที่ 8											←→	

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถพัฒนาเครื่องมือตรวจสอบพื้นผิวของวัสดุแบบไม่ทำลาย
- 1.5.2 สามารถพัฒนาเทคนิคทางค่านแสงเลเซอร์สำหรับระบบการตรวจสอบพื้นผิวแบบไม่ทำลาย ที่มีราคาถูกแต่มีประสิทธิภาพเท่าเทียมกับต่างประเทศ

- 1.5.3 สามารถนำข้อมูลที่ได้อัปโหลดกับงาน เช่น การสร้างภาพพื้นผิววัตถุ การวัดระยะทางหรือระยะกระจัด การวิเคราะห์ความเร็วของพื้นผิวของวัสดุและการศึกษาการสะท้อนของลักษณะพื้นผิวต่างๆ ได้ด้วยหลักการเซลฟมิกซิงในเลเซอร์ไดโอด
- 1.5.4 เพื่อเป็นพื้นฐานทางการศึกษาสำหรับผู้สนใจทั่วไป



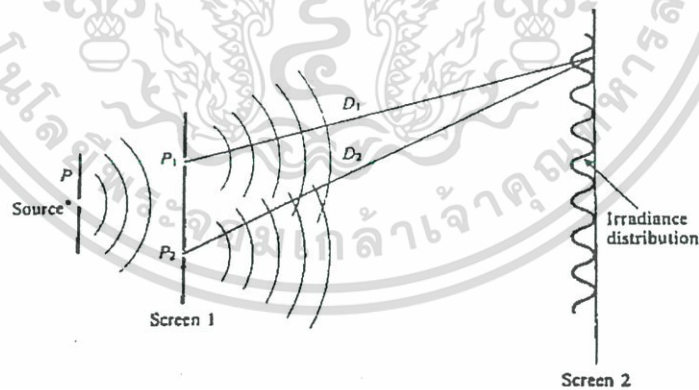
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ธรรมชาติของแสง [6]

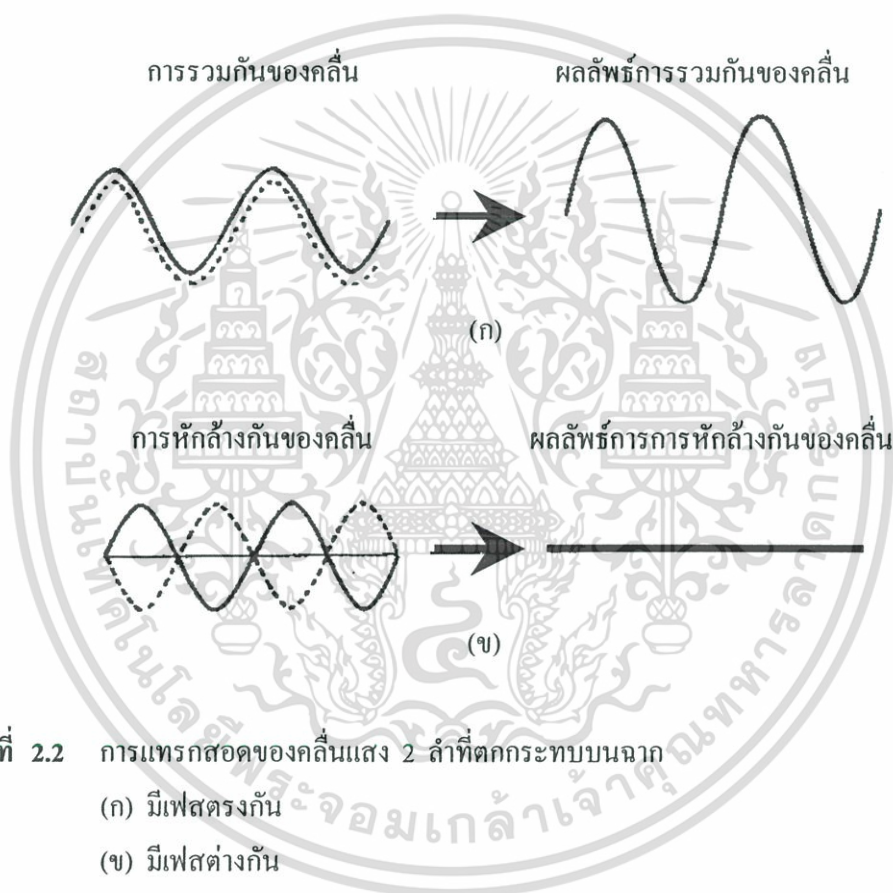
การอธิบายธรรมชาติของแสงและการมองเห็นนั้น เกิดขึ้นจากผลการทดลองทางวิทยาศาสตร์ที่สำคัญ 2 ทฤษฎี ทฤษฎีแรกเป็นการพิจารณาว่าแสงเป็นอนุภาคซึ่งนิวตัน (Sir Issac Newton ค.ศ. 1643 - 1727) ได้เสนอไว้ และทฤษฎีที่สองเป็นการพิจารณาว่าแสงเป็นคลื่นซึ่งฮุคและฮอยเกนส์ (Hooke และ Christian Huygens ค.ศ. 1629 - 1695) ได้เสนอไว้ ทฤษฎีทั้งสองต่างเป็นที่ยอมรับ สามารถนำมาอธิบายปรากฏการณ์ทางกายภาพอื่นได้แก่ การสะท้อน การหักเห การเลี้ยวเบน และการแทรกสอดได้ ปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนเป็นการที่แสงเดินทางเป็นเส้นโค้งได้ และเมื่อตกกระทบกับขอบของวัตถุที่เป็นมุม จะทำให้เกิดเงาที่ไม่คมชัดปรากฏบนฉาก แม้ว่า จะทำการเปลี่ยนแหล่งกำเนิดเป็นแสงให้เป็นจุดแล้วก็ตาม ในการพิจารณากรณีที่ว่าแสงเดินทางเป็นเส้นตรงสิ่งที่คาดว่าจะพบก็คือเงาของวัตถุที่ปรากฏบนฉากจะต้องคมชัด และในการพิจารณาปรากฏการณ์การแทรกสอดของแสงจะพิจารณาแสงอาพันธ์ (Coherence Light) สองลำมาแทรกสอดกัน ทำให้เกิดแถบมืดและแถบสว่างสลับกันไป ซึ่งปรากฏการณ์การแทรกสอดจะใช้ทฤษฎีที่ว่าแสงเป็นคลื่นเท่านั้น โทมัส ยัง (Thomas Young ค.ศ. 1773 - 1829) ได้แสดงผลการทดลองการแทรกสอดของคลื่นแสงไว้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนผังการทดลองของโทมัส ยัง ที่แสดงสมบัติการแทรกสอดของคลื่นแสง

จากรูปแสงจากแหล่งกำเนิด (source) ที่เป็นจุด P จะตกกระทบฉากที่ 1 (screen 1) ซึ่งมีช่องเล็กๆ สองช่อง P₁ และ P₂ แต่ละช่องทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแสงอันใหม่ คลื่นแสงที่

ลวดออกจากช่องทั้งสองจะมีหน้าคลื่นเป็นวงกลมจะเกิดการซ้อนทับกัน และไปตกกระทบบนฉากที่ 2 (screen 2) ซึ่งจะปรากฏแถบของการแทรกสอด ซึ่งเฟสของแหล่งกำเนิด P_1 และ P_2 จะมีผลต่อการเสริมกันของคลื่นแสง (Constructive Interference) หรือหักล้างกันของคลื่นแสง (Destructive Interference) ของการแทรกสอด และความแตกต่างของเส้นทาง D_1 และ D_2 (Path Difference) ก็จะเป็นตัวกำหนดตำแหน่งของแถบสว่างหรือแถบมืดที่เกิดจากการเสริมกันหรือหักล้างกันของคลื่นแสงที่ปรากฏบนฉากที่ 2 ซึ่งการแทรกสอดของคลื่นแสง 2 ลำที่ตกกระทบบนฉากมีเฟสตรงกัน (เส้นประและเส้นทึบ) ดังรูปที่ 2.2 ก จะทำให้เกิดการรวมกันของคลื่นซึ่งจะทำให้เกิดแถบสว่าง แต่ถ้ามีเฟสต่างกัน จะทำให้เกิดการหักล้างกันของคลื่นซึ่งจะทำให้เกิดแถบมืดบนฉากที่ 2 ดังรูปที่ 2.2 ข



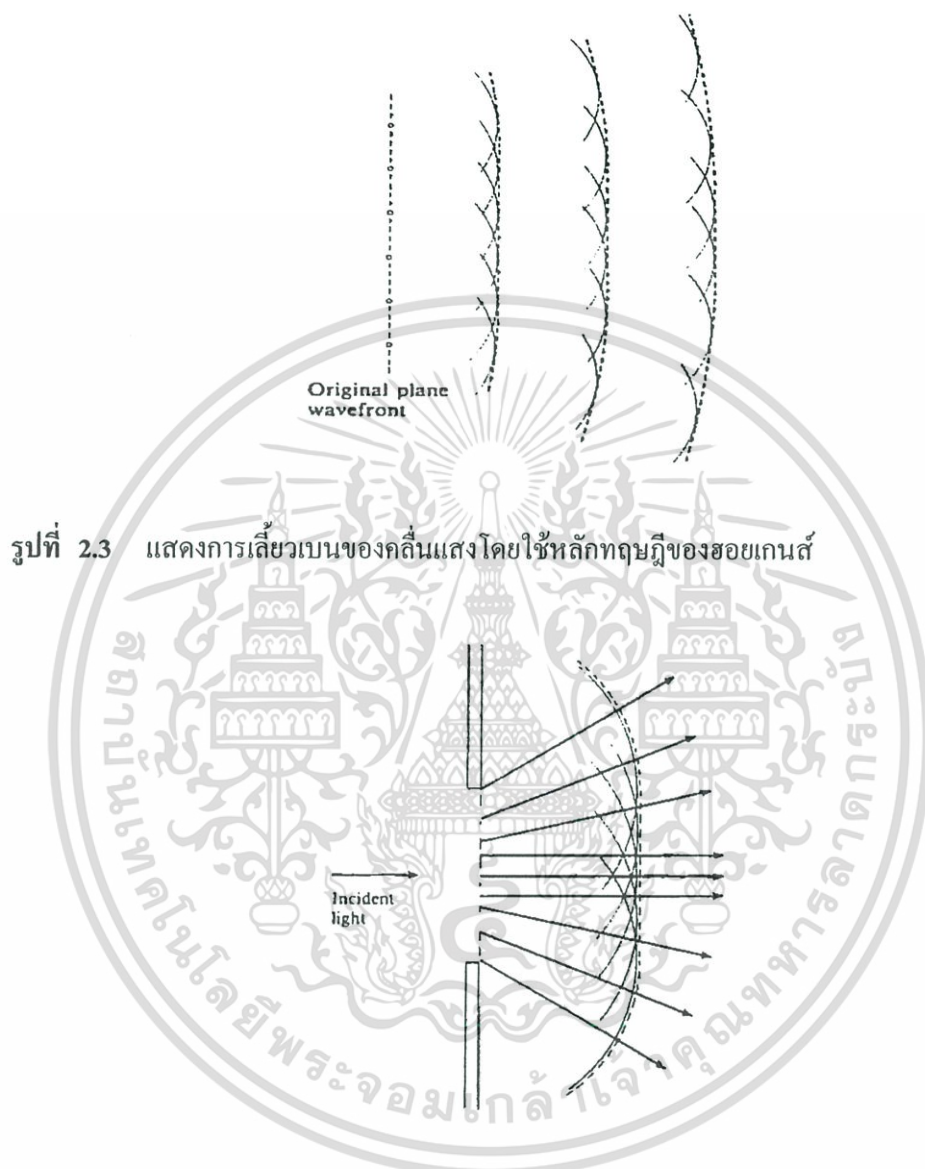
รูปที่ 2.2 การแทรกสอดของคลื่นแสง 2 ลำที่ตกกระทบบนฉาก

(ก) มีเฟสตรงกัน

(ข) มีเฟสต่างกัน

การเลี้ยวเบนของแสงนั้นสามารถให้ลักษณะของฮอยเกนส์ที่ว่า ถ้าพิจารณาการเดินทางของคลื่นแสงผ่านช่องเปิด (original plane wavefront) ไปยังฉากที่กั้นไว้ แต่ละจุดจะบนหน้าคลื่นซึ่งในที่นี้จะหมายถึงจุดบนคลื่นแสงที่มีเฟสตรงกัน จะทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดลูกคลื่นทุติยภูมิโดยลูกคลื่นจะกระจายออกไปจากแต่ละจุด หลังจากเวลาผ่านไปชั่วครู่หน้าคลื่นใหม่จะเป็นผิวที่สัมผัสกับลูกคลื่นแต่ละลูก ดังรูปที่ 2.3

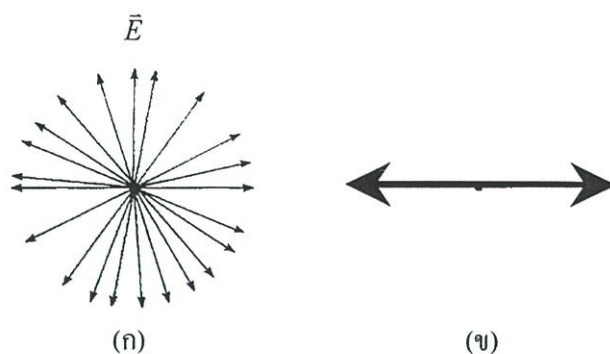
ถ้าพิจารณาหน้าคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง (incident light) ที่เป็นจุดจะเป็นทรงกลม การกระจายของแสงผ่านช่องเปิดจะพบว่ายิ่งช่องเปิดเล็กเท่าไรจะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้แสงกระจายออกกว้างมากขึ้น ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 แสดงการเลี้ยวเบนของคลื่นแสงโดยใช้หลักทฤษฎีของฮอยเกนส์

รูปที่ 2.4 การเลี้ยวเบนของคลื่นแสงผ่านช่องเปิดเล็กๆ โดยใช้หลักทฤษฎีของฮอยเกนส์

จากปรากฏการณ์การแทรกสอดและการเลี้ยวเบนของคลื่นแสงนั้นอธิบายได้ว่าแสงเป็นคลื่น ซึ่งการพิจารณาการโพลาไรซ์ของแสงสามารถที่จะบอกได้ว่าคลื่นแสงเป็นคลื่นตามขวาง (Transverse Wave) เนื่องจากทิศทางการสั่นของคลื่นแสงมีทิศตั้งฉากกับทิศของการเคลื่อนที่ของแสง ถ้าลำแสงมีการโพลาไรซ์เชิงระนาบ สนามของคลื่นจะสั่นในระนาบเดียวกัน ซึ่งต่างกับการสั่นแบบไร้ระเบียบของลำแสงที่จะไม่มีโพลาไรซ์ ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ก) แสดงการสั่นของสนามไฟฟ้าแบบไร้ระเบียบของแสงที่ไม่มีโพลาไรซ์

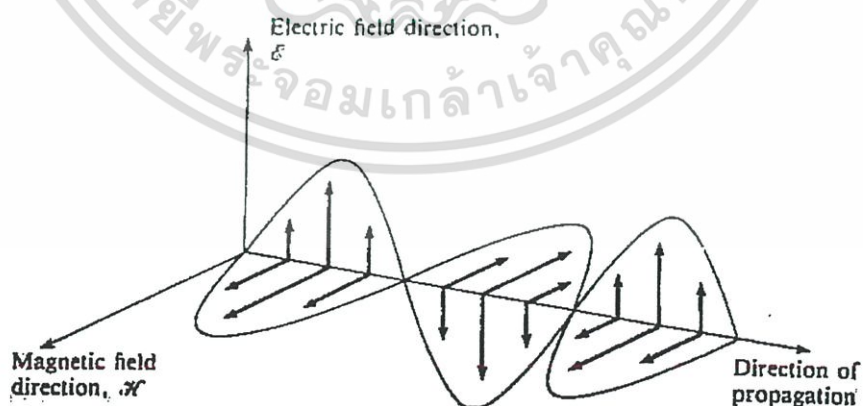
ข) แสดงการสั่นของสนามไฟฟ้าในแนวระนาบอย่างเป็นระเบียบของแสงที่มีโพลาไรซ์

แมกซ์เวลล์ (James Clerk Maxwell ค.ศ. 1831 - 1879) ได้รวบรวมผลงานศึกษาเรื่องแม่เหล็กไฟฟ้า และสามารถอธิบายได้ว่าแสงเป็นคลื่นตามขวาง อัตราเร็วของคลื่นแสงในสุญญากาศเป็น c โดยมีค่าเท่ากับ

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

เมื่อ μ_0 คือ ค่ายอมรับได้ทางแม่เหล็กที่สุญญากาศ (Permeability)
 ϵ_0 คือ ค่ายอมรับได้ทางไฟฟ้าที่สุญญากาศ (Permittivity)

จึงเป็นที่ยอมรับกันว่าแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยมีทิศทางของสนามแม่เหล็ก (Magnetic field direction) และทิศทางของสนามไฟฟ้า (Electric field direction) ตั้งฉากซึ่งกันและกันและตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ (Direction of propagation) ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงทิศทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นแสงซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแบ่งสเปกตรัมของแสงออกได้หลายชนิด (Type of radiation) ซึ่งในแต่ละชนิดจะแบ่งตามความยาวคลื่น (Wavelength) ความถี่ (Frequency) หรือ พลังงาน (Quantum energy) ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

Type of radiation	Wavelength	Frequency (Hz)	Quantum energy (eV)
Radio waves	100 km	3×10^3	1.2×10^{-11}
Microwaves	300 mm	10^9	4×10^{-6}
Infrared	0.3 mm	10^{12}	4×10^{-3}
Visible	0.7 μm	4.3×10^{14}	1.8
Ultraviolet	0.4 μm	7.5×10^{14}	3.1
X rays	0.03 μm	10^{16}	40
γ rays	0.1 nm	3×10^{18}	1.2×10^4
	1.0 pm	3×10^{20}	1.2×10^6

โดยจะมีความสัมพันธ์ของอัตราเร็วของคลื่นแสงระหว่างความถี่ ν และความยาวคลื่น λ ดังสมการที่ 2.2

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

ในกรณีที่อยู่ในตัวกลาง อัตราเร็วของคลื่นแสง c จะกลายเป็น c' โดยมีค่าดังนี้

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

- เมื่อ n คือ ค่าดัชนีหักเห
 λ' คือ ค่าความยาวคลื่นในตัวกลาง
 c' คือ อัตราเร็วของคลื่นแสงในตัวกลาง

แสดงว่าที่ระหว่งรอยต่อของตัวกลางทั้งสองเกิดการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่น ทำให้เกิดปรากฏการณ์หักเห การเข้าใจธรรมชาติของแสงไม่สามารถใช้ทฤษฎีของคลื่นแสงมาอธิบายกลไก

การเกิดแสงเลเซอร์ได้ ดังนั้นในหัวข้อต่อไปจะได้ศึกษาหลักการการเกิดแสงเลเซอร์และการประยุกต์ใช้งาน

2.2 หลักการเกิดแสงเลเซอร์ทั่วไป

เลเซอร์ (LASER) ย่อมาจากคำว่า **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation ซึ่งหลังจากที่ไอน์สไตน์ (Einstein) ได้อธิบายหลักการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น (Stimulated Emission) ของโฟตอนในอะตอมในปี ค.ศ. 1917 แล้วนั้น กอร์ดอนและคณะ (Gordon and Other) แห่งมหาวิทยาลัยโคลัมเบีย สหรัฐอเมริกา ก็ได้สร้างเมเซอร์ (Maser) ซึ่งย่อมาจาก Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation สำเร็จเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1954 โดยอาศัยหลักการของการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นให้แสงในย่านไมโครเวฟ และในปี ค.ศ. 1960 ไมมานแห่งห้องปฏิบัติการวิจัยของบริษัทอิวิสแห่งสหรัฐอเมริกา ได้สร้างเลเซอร์ทึบที่ให้แสงสีชมพูมีความยาวคลื่น 694.3 นาโนเมตร สำเร็จเป็นเครื่องแรก นับเป็นจุดเริ่มต้นของการสร้างและพัฒนาเลเซอร์ชนิดต่างๆ ต่อมา โดยสารที่จะนำมาใช้เป็นตัวกลางเลเซอร์ จะต้องมีคุณสมบัติพิเศษที่สามารถทำให้เกิดประชากรผกผัน (Population Inversion) ขึ้นภายในเนื้อสาร และสามารถทำให้เกิดขบวนการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอะตอมหรือโมเลกุลด้วยการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นได้ การเรียกชื่อเลเซอร์ชนิดต่างๆ ก็จะเรียกตามชื่อของตัวกลางเลเซอร์นั้นๆ เช่น ระบบเลเซอร์ที่มีตัวกลางเลเซอร์เป็นแก๊สผสมระหว่างฮีเลียมกับนีออน ก็จะเรียกฮีเลียมนีออนเลเซอร์ หรือเลเซอร์ที่มีตัวกลางเป็นแก๊สไนโตรเจนก็จะเรียกว่า ไนโตรเจนเลเซอร์ หรือเลเซอร์ที่มีตัวกลางเป็นสารละลายคายก็จะเรียกคายเลเซอร์ ซึ่งเลเซอร์ชนิดต่างๆ จะอาศัยหลักการพื้นฐานที่เหมือนกันดังนี้ คือ

2.2.1 การเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น (Stimulated Emission)

2.2.2 การเกิดประชากรผกผัน (Population Inversion)

2.2.3 ตัวถังพ้องเชิงทัศน (Optical Resonator)

2.2.1 การเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น

จากการศึกษาทางกลศาสตร์ควอนตัม พบว่าระดับพลังงานของอะตอมหรือโมเลกุลจะมีค่าเป็นระดับขั้นที่ไม่ต่อเนื่องกัน โดยระดับพลังงานที่ต่ำสุดที่อิเล็กตรอนอยู่ได้อย่างเสถียรเรียกว่าสถานะพื้น (Ground State) ระดับพลังงานอื่นๆ ที่มีระดับพลังงานสูงกว่านี้จะเรียกว่า สถานะกระตุ้น (Excited State) อิเล็กตรอนจะมีการเปลี่ยนระดับพลังงานจากระดับพลังงานที่ต่ำกว่าไปสู่ระดับพลังงานที่สูงกว่าได้ เมื่อมีการดูดกลืนพลังงาน หรืออิเล็กตรอนมีการเปลี่ยนระดับพลังงานจากระดับพลังงานที่สูงกว่าไปสู่ระดับพลังงานที่ต่ำกว่าซึ่งจะมีการคายพลังงานออกมาในรูปของโฟตอน โดยผล

ต่างของระดับพลังงานทั้งสองระดับนั้นจะสัมพันธ์กับค่าความถี่ของแสงที่ถูกดูดกลืนหรือปลดปล่อยออกมาดังสมการที่ (2.4)

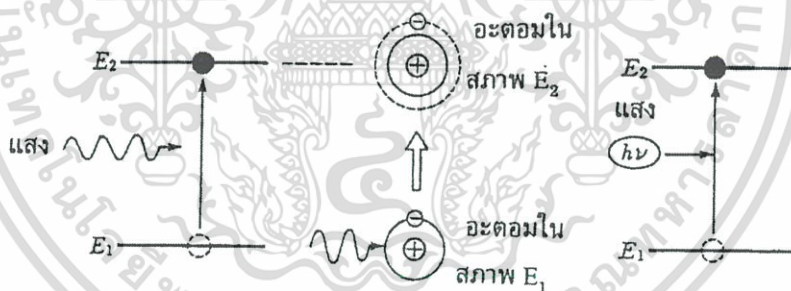
$$\Delta E = h\nu \quad (2.4)$$

เมื่อ $\Delta E = E_2 - E_1$ คือ ค่าผลต่างของระดับพลังงานสุดท้ายกับระดับพลังงานเริ่มต้น (J)
 ν คือ ความถี่ของแสงที่ถูกดูดกลืนหรือคายออกมา (Hz)
 h คือ ค่าคงที่ของพลังค์มีค่าเท่ากับ $6.626 \times 10^{-34} J \cdot s$

การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอน จะอธิบายได้จากปรากฏการณ์ทางแสง 3 ปรากฏการณ์ คือ

2.2.1.1 การดูดกลืนแสงแบบถูกกระตุ้น (Stimulated Absorption)

ในสภาวะปกติอิเล็กตรอนจะอยู่ที่ระดับพลังงานที่ต่ำที่สุด (E_1) แต่ถ้ามีโฟตอนที่มีค่าความถี่ที่เหมาะสมมากระตุ้น ($E_2 - E_1 = h\nu$) อิเล็กตรอนก็จะดูดกลืนพลังงานของโฟตอนนั้นแล้วเปลี่ยนสถานะไปยังระดับพลังงานที่สูงกว่า (E_2) ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กระบวนการดูดกลืนแสงแบบถูกกระตุ้น

จากรูปที่ 2.7 ตามปกติแล้วอิเล็กตรอนจะอยู่ที่ระดับพลังงานต่ำสุด (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)

2.2.1.2 การเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง (Spontaneous Emission)

อิเล็กตรอนซึ่งอยู่ในสถานะกระตุ้น (E_2) จะสามารถอยู่ในสถานะนี้ได้เพียงช่วงระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าช่วงชีวิต (Life Time) เท่านั้น เมื่อหมดช่วงชีวิตแล้วก็จะตกลงมายังสถานะพื้น (E_1) เองโดยจะปลดปล่อยโฟตอนออกมาดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กระบวนการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง

จากรูปที่ 2.8 อะตอมซึ่งอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น (E_2) จะสามารถอยู่ในสถานะนี้ได้เพียงช่วงระยะเวลาหนึ่งซึ่งมีค่าเท่ากับช่วงชีวิตเท่านั้น เมื่อหมดช่วงชีวิตแล้วก็จะตกลงมายังสถานะพื้น (E_1) เอง โดยจะคายพลังงานออกมาในรูปโฟตอน การเปล่งแสงแบบนี้จะเกิดขึ้นได้เองซึ่งอัตราการเกิดการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเองนี้จะแปรผันกับจำนวนอิเล็กตรอน N_2 ที่ชั้นพลังงาน E_2 เท่านั้น ดังนั้น

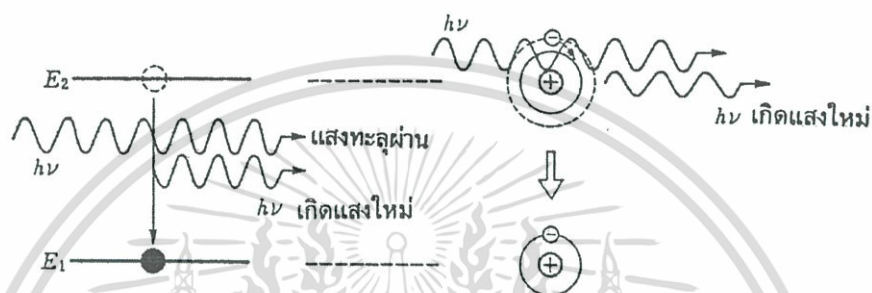
$$\text{อัตราการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง} = A_{21}N_2 \quad (2.6)$$

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

N_2 คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่ระดับพลังงาน E_2

2.2.1.3 การเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น (Stimulated Emission)

ในกรณีที่อิเล็กตรอนอยู่ในสถานะกระตุ้น (E_2) ยังไม่ถึงเวลาที่อิเล็กตรอนจะตกลงสู่สถานะพื้น (E_1) แต่มีโฟตอนซึ่งมีค่าพลังงานเท่ากับผลต่างของระดับพลังงานในสถานะกระตุ้นและสถานะพื้นเข้ามา จะทำให้อิเล็กตรอนที่สถานะกระตุ้น (E_2) ตกลงมายังสถานะพื้น (E_1) และปลดปล่อยโฟตอนออกมาอย่างทันทีทันใด โดยโฟตอนที่ปลดปล่อยออกมานี้จะมีความถี่และเฟสที่เหมือนกับโฟตอนที่เข้ามากระตุ้นทุกประการ ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กระบวนการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น

จากรูปที่ 2.9 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 เป็นหลักการอย่างหนึ่งในการที่ทำให้แสงเลเซอร์มีเฟสเดียวกัน มีค่าความถี่เดียวและยังเป็นที่มาของคำว่า Light Amplification ซึ่งก็คือการขยายแสง เนื่องจากว่าโฟตอนที่เข้าไปกระตุ้น 1 ตัว จะทำให้ได้โฟตอนเพิ่มขึ้นมาอีก 1 ตัวเป็น 2 ตัว ซึ่งก็คือ เกิดการขยาย

แสงนั่นเอง การเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นนี้จะพื้นฐานที่สำคัญประการหนึ่งในการเกิดแสงเลเซอร์ทุกชนิด

ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อนอัตราการดูดกลืนแสงและอัตราการเปล่งแสงจะสมดุลกัน ดังนั้นจำนวน $N_1 + N_2$ ก็จะมีค่าคงที่ ซึ่งจะได้ว่า

อัตราการดูดกลืนแสง = อัตราการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง + อัตราการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น

จากสมการที่ (2.5), (2.6) และ (2.7) จะได้ว่า

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

ไอน์สไตน์ (Einstein) เป็นผู้อธิบายความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.8) จึงเรียกค่าสัมประสิทธิ์ B_{12} , A_{21} และ B_{21} ว่าเป็นสัมประสิทธิ์ของไอน์สไตน์ (Einstein Coefficients)

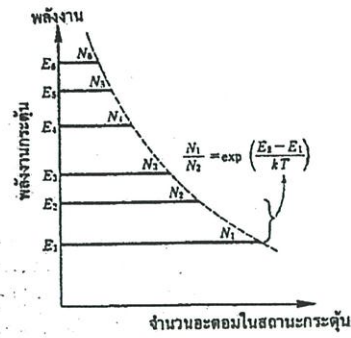
2.2.2 การเกิดประชากรผกผัน (Population Inversion)

เมื่อพิจารณาระบบที่มีระดับพลังงานเพียง 2 ระดับพลังงาน คือ E_1 และ E_2 (โดย $E_2 > E_1$) และแต่ละระดับพลังงานมีจำนวนอะตอมเป็น N_1 และ N_2 ตามลำดับ ที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน สัดส่วนของจำนวนอะตอมในแต่ละระดับพลังงาน จะเป็นไปตามหลักการกระจายแบบโบลท์ซมาน (Boltzmann Distribution) ดังสมการที่ (2.9)

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

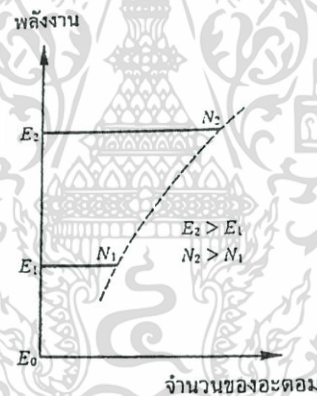
เมื่อ k คือ ค่าคงที่ของโบลท์ซมานมีค่าเท่ากับ $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
 T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

ความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.9) เมื่อนำมาเขียนกราฟจะได้ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน ที่ระดับพลังงานต่ำ E_1 จะมีจำนวนอะตอมมากกว่าที่ระดับพลังงานสูง E_2 ($N_1 > N_2$) ดังนั้นถ้าฉายโฟตอนเข้าไปในระบบซึ่งเป็นการรบกวนระบบก็จะทำให้เกิดการดูดกลืนแสงมากกว่าที่จะเกิดการเปล่งแสง



รูปที่ 2.10 การกระจายแบบโบลท์ซมานของจำนวนอะตอมที่ระดับพลังงาน E_1 และ E_2 ที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน

แต่ถ้าทำการรบกวนระบบโดยการฉายโฟตอนเข้าไปในระบบ จนกระทั่งทำให้ระบบเกิดเงื่อนไข $N_2 \gg N_1$ แล้ว ก็จะทำให้เกิดการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นมากกว่าการดูดกลืนแสง จากสมการที่ (2.9) พบว่าจะเกิดเงื่อนไขนี้ได้ก็ต่อเมื่อ T มีค่าติดลบ จึงอาจเรียกสภาพของระบบเช่นนี้ว่าเป็น Negative Temperature และเรียกสภาพที่เกิดเงื่อนไข $N_2 \gg N_1$ นี้ว่าเกิดการผกผันของประชากร ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การเกิดประชากรผกผัน

พิจารณาสัดส่วนของอัตราการเกิดการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นสมการที่ (2.7) ต่ออัตราการดูดกลืนแสงแบบถูกกระตุ้นสมการที่ (2.5) จะได้ว่า

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 ซึ่งจะเรียกการเพิ่มพลังงานให้กับระบบด้วยวิธีการต่าง ๆ นี้ว่า Energy Pumping

2.2.3 ตัวสันฟุ้งเชิงทัศน (Optical Resonator)

ระบบเลเซอร์ โดยทั่วไปแล้วจำเป็นต้องมีตัวสันฟุ้งเชิงทัศน ซึ่งประกอบด้วยกระจกเคลือบสารไดอิเล็กทริกโดยกระจกหลังจะมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ 100% ส่วนกระจกหน้าจะมีสัมประสิทธิ์อยู่ระหว่าง 65-95% เพื่อทำหน้าที่ให้โฟตอนที่เกิดจากขบวนการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเองสะท้อนกลับ ไปกลับมาผ่านตัวกลางเลเซอร์ทำให้โฟตอนมีความเข้มสูงมากขึ้น ซึ่งจะให้อัตราการเกิดการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นเพิ่มสูงขึ้น แต่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อนพบว่าอัตราการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเองจะมากกว่าอัตราการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น ซึ่งพิจารณาได้จากสัดส่วนระหว่างอัตราการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นต่ออัตราการเปล่งแบบเกิดขึ้นเอง (สมการที่ 2.7 และ 2.6 ตามลำดับ) พบว่าจะเป็นไปตามสมการที่ (2.12)

$$\begin{aligned} \frac{\text{อัตราการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น}}{\text{อัตราการเปล่งแบบเกิดขึ้นเอง}} &= \frac{B_{21} N_2 \rho(\nu_{12})}{A_{21} N_2} \\ &= \frac{B_{21}}{A_{12}} \rho(\nu_{12}) \end{aligned} \quad (2.12)$$

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

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

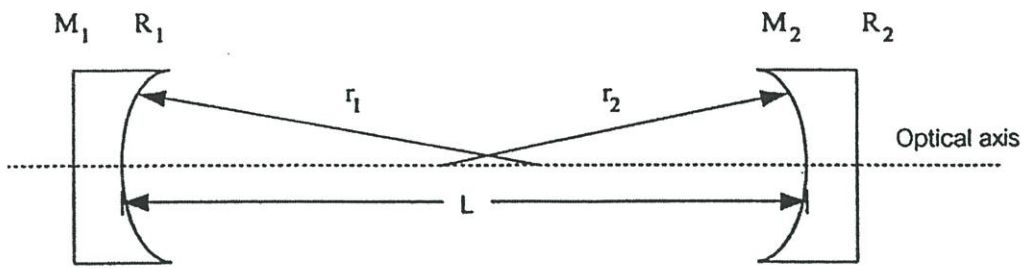
เปรียบเทียบสมการที่ (2.14) กับ (2.15) จะได้

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

สัดส่วนของอัตราการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นต่ออัตราการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเองจะมีความสัมพันธ์ดังนี้

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

ความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.17) พบว่าที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อนอัตราส่วนระหว่างการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นกับอัตราการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง จะมีค่าน้อยมาก เช่น แสงที่มีความถี่ 4.74×10^{14} เฮิร์ต ที่อุณหภูมิ 370 เคลวิน สัดส่วนของอัตราการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นต่ออัตราการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเองจะมีค่าประมาณ 10^{-27} นั่นคือ เกือบจะไม่มีการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นเลย ซึ่งจะทำให้ระบบไม่เกิดแสงเลเซอร์ แต่จากสมการที่ (2.12) แสดงให้เห็นว่า ถ้าต้องการให้เกิดการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นในอัตราที่มากกว่าอัตราการเกิดการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเองแล้วนั้น จะต้องมิโฟตอนที่มีความหนาแน่นของพลังงาน $\rho(\nu_{12})$ สูงมากๆ เข้าไปในระบบทำได้โดยการเพิ่มความยาวของตัวกลางเลเซอร์ออกไปมากๆ เพื่อให้เกิดการขยายความเข้มของพลังงาน แต่ในทางปฏิบัติจะมีความยุ่งยากในการจัดวางระบบอย่างมาก จึงใช้วิธีการจัดวางกระจก 2 บานไว้ที่ปลายทั้งสองด้านของระบบเลเซอร์แทน เพื่อให้แสงเกิดการสะท้อนกลับไปกลับมาอยู่ภายในตัวกลางเลเซอร์ เป็นการเพิ่มความยาวของระยะทางในการเคลื่อนที่ของแสง และทำให้เสมือนมีความหนาแน่นของพลังงานมีค่ามากขึ้นนั่นเอง ซึ่งจะมีผลให้เกิดการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นที่มากกว่าเกิดการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง การจัดการตัวสันพ้องเชิงทัศนศาสตร์แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ตัวสันฟุ้งเชิงทัศนที่ประกอบด้วยกระจก 2 บาน M_1 และ M_2 มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน R_1 และ R_2 และมีรัศมีความโค้งเป็น r_1 และ r_2 ตามลำดับ

จากรูปจะแสดงถึงตัวสันฟุ้งเชิงทัศนที่ประกอบด้วยกระจกเว้า 2 บาน ที่วางห่างกันเป็นระยะทาง L โดยกระจก M_1 และ M_2 มีรัศมีความโค้ง r_1 และ r_2 ตามลำดับ

ในการวิเคราะห์ตัวสันฟุ้งเชิงทัศนต่างๆ ว่าจะมีลักษณะที่มีการสูญเสียต่ำ (Low Loss) หรือจะไม่พิจารณาจากค่าพารามิเตอร์ g -parameter ซึ่งเป็นปริมาณที่ไม่มีหน่วย โดยระบบที่มีเสถียรภาพจะมีเงื่อนไข ดังสมการที่ (2.18)

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

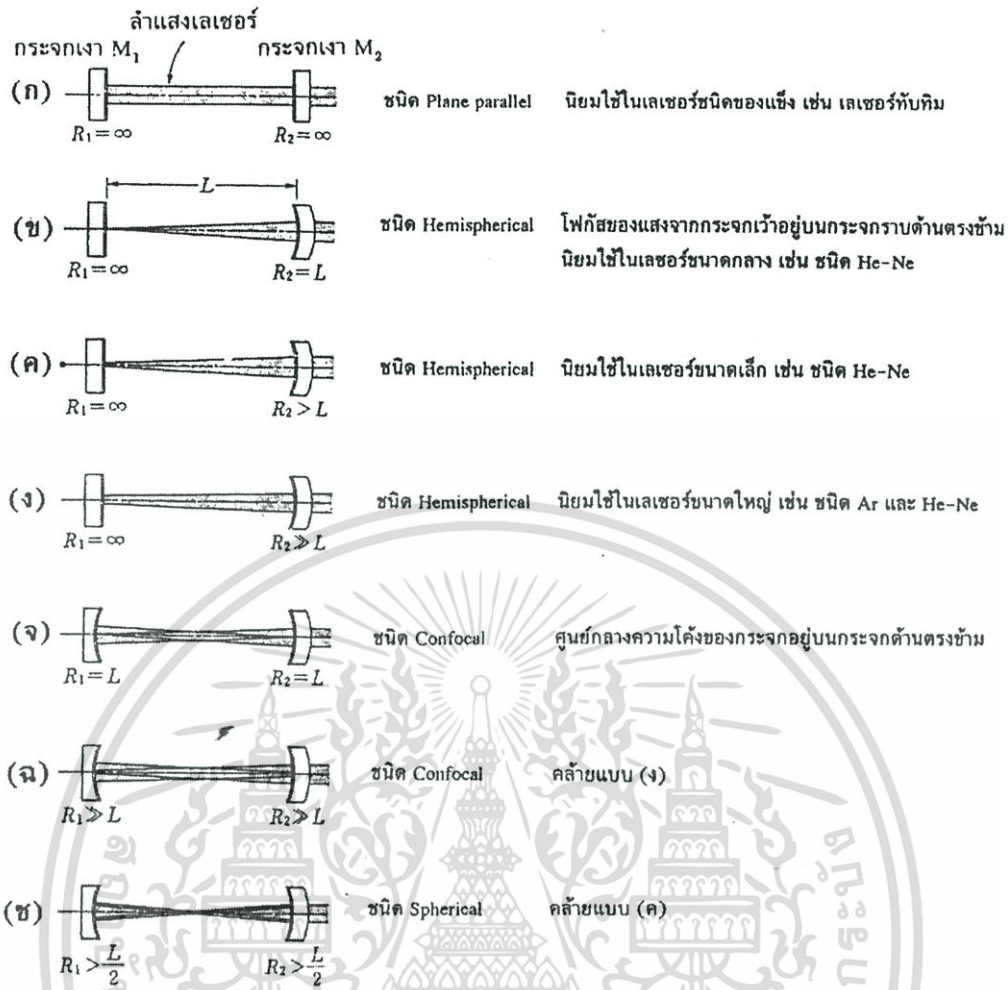
เมื่อ

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

และ

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

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



รูปที่ 2.13 การจัดวางตัวสันพ้องเชิงทัศนศาสตร์แบบต่างๆ

2.3 หลักการของเลเซอร์ไดโอดและโฟโตไดโอด [2]

เลเซอร์ไดโอดเป็นเลเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Laser) ที่มีโครงสร้างรอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบตรง (Direct Band Gap) รอยต่อแบบพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำที่ทำมาจากสารประกอบกึ่งตัวนำของธาตุกลุ่ม 3 และ 5 ของตารางธาตุ (III-V Compounds) เช่น GaAs , AlGaAs , InGaAs , InGaAsP เป็นต้น ซึ่งเป็นการรวมกันของธาตุในกลุ่ม 3A เช่น อลูมิเนียม (Al) แกลเลียม (Ga) อินเดียม (In) และธาตุในกลุ่ม 5 เช่น ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) อาร์เซนิก (As) พลวง (Sb) เป็นต้น นอกจากนี้สารที่ใช้ทำเลเซอร์ไดโอดไม่จำกัดอยู่เพียงสารประกอบของธาตุกลุ่ม 3 และ 5 เท่านั้น แต่ยังมีสารกึ่งตัวนำชนิดที่เป็นช่องว่างต้องห้ามกว้าง Wide-gap ซึ่งเป็นการรวมกันระหว่างธาตุกลุ่ม 2 เช่น แคดเมียม (Cd) สังกะสี (Zn) และธาตุกลุ่ม 6 เช่น

กำมะถัน (S) เซเลเนียม (Se) เกิดเป็นสารประกอบของธาตุกลุ่ม 2 และ 6 (II-VI Compounds) ซึ่งแนวความคิดของเลเซอร์ไดโอดถูกเสนอเป็นครั้งแรกใน ค.ศ. 1957 และผลิตได้สำเร็จจริงๆ ใน ค.ศ. 1962 ซึ่งตอนนั้นต้องทำงานที่อุณหภูมิไนโตรเจนเหลว (77K) ต่อมาใน ค.ศ. 1970 มีการผลิตเป็นรอยต่อพีเอ็นชนิดโครงสร้างแบบเฮเทโร (Heterojunction) ที่สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิห้อง และเมื่อใช้โครงสร้างแบบดับเบิลเฮเทโร (Double Heterojunction) ทำให้เลเซอร์ไดโอดทำงานได้ที่อุณหภูมิห้อง และเปล่งแสงแบบต่อเนื่อง (CW) ได้และมีอายุการใช้งานยาวนาน เพื่อให้เข้าใจกลไกของเลเซอร์ไดโอดจึงควรต้องพิจารณาคุณสมบัติพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำ

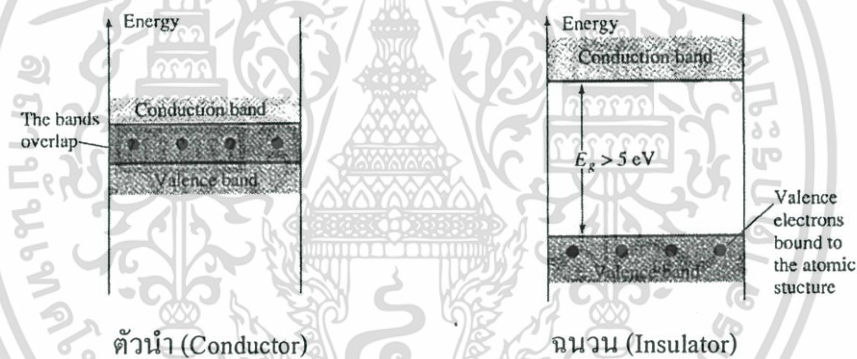
2.3.1 คุณสมบัติพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำ

สารกึ่งตัวนำเป็นของแข็งที่มีค่าความต้านทานอยู่ระหว่างค่าความต้านทานของตัวนำและฉนวน แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.3.1.1 สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic Semiconductor)

2.3.1.2 สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ (Impurity Semiconductor)

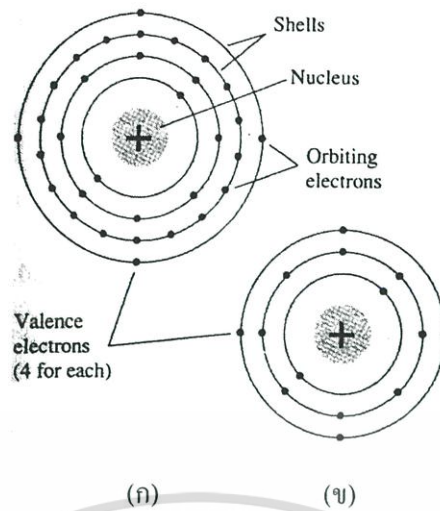
โดยแถบพลังงานของตัวนำและฉนวนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แถบพลังงานของตัวนำและฉนวน

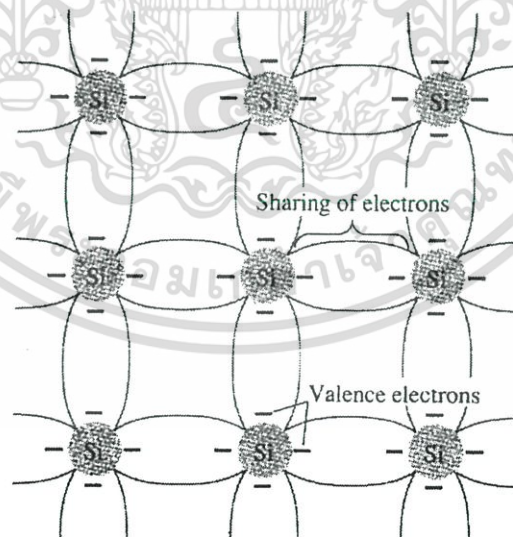
2.3.1.1 สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic Semiconductor)

สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่นิยมใช้ได้แก่ ซิลิกอน (Si) เจอร์เมเนียม (Ge) ซึ่งมีโครงสร้างเป็นผลึก มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวาเลนซ์อิเล็กตรอนกับอะตอมสูง โดยมีโครงสร้างอะตอมดังแสดงได้ดังรูปที่ 2.15



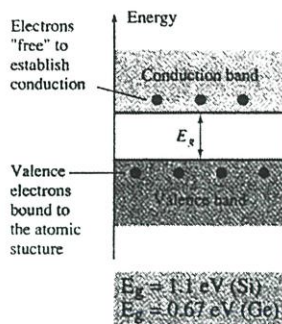
รูปที่ 2.15 โครงสร้างอะตอมของ (ก) เจอร์เมเนียม (Ge) และ (ข) ซิลิกอน (Si)

แม้ว่าจะมีความเป็นกลางทางไฟฟ้า แต่สามารถทำให้เกิดอนุภาคไฟฟ้าอิสระได้โดยให้พลังงานที่เหมาะสมแก่ผลึก ซึ่งต้องมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอม การเคลื่อนที่ของวาเลนซ์อิเล็กตรอนทำให้เกิดช่องว่างที่เรียกว่าโฮลขึ้น โดยจำนวนของอิเล็กตรอนและโฮลจะมีเท่ากันเสมอ โดยซิลิกอน (Si) จะมีการสร้างพันธะโควาเลนซ์ดังรูปที่ 2.16 และแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.16 พันธะโควาเลนซ์ของอะตอมซิลิกอน (Si)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)

รูปที่ 2.17 แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ $E_g(\text{Si}) = 1.1 \text{ eV}$ และ $E_g(\text{Ge}) = 0.67 \text{ eV}$

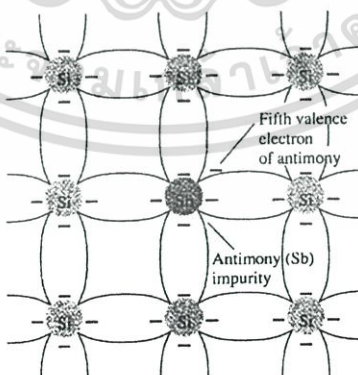
แต่ที่อุณหภูมิปกติจำนวนพาหะจะมีปริมาณที่น้อยมากทำให้การนำกระแสไม่ดีพอ เพื่อให้จำนวนพาหะเพิ่มขึ้นจึงมีการเติมสารเจือปน (Impurity) ลงไปแล้วทำให้เกิดการนำกระแสมากขึ้น ดังนั้นสารกึ่งตัวนำที่เกิดขึ้นใหม่นี้จะเป็นสารกึ่งตัวนำที่ไม่บริสุทธิ์

2.3.1.2 สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ (Impurity Semiconductor)

สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ คือ สารกึ่งตัวนำที่มีการเติมสารเจือปนลงไป เพื่อเพิ่มจำนวนพาหะให้มีการนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น โดยสารเจือปนที่ใช้จะมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเป็น 5 เช่น อาร์เซนิกหรือสารหนู (As) พลวง (Sb) หรือมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเป็น 3 เช่น แกลเลียม (Ga) โบรอน (B) โดยสารเจือปนทั้งสองประเภทนี้จะทำให้เกิดพาหะต่างชนิดกัน ดังนี้

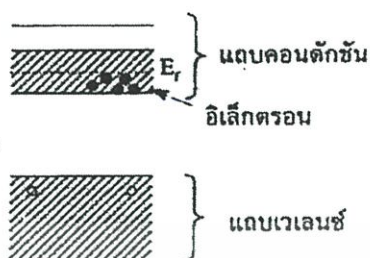
2.3.1.2.1 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n – Type Semiconductor)

เมื่ออะตอมของซิลิกอน (Si) ถูกแทนด้วยอะตอมของพลวง (Sb) เนื่องจากวาเลนซ์อิเล็กตรอนของพลวง (Sb) มี 5 ตัว โดยวาเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัวของพลวง (Sb) จะจับยึดกับอะตอมของซิลิกอน (Si) ที่อยู่ข้างเคียงทำให้เหลือวาเลนซ์อิเล็กตรอนอีก 1 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 อะตอมของพลวงที่ถูกเจือลงในสารกึ่งตัวนำซิลิกอน

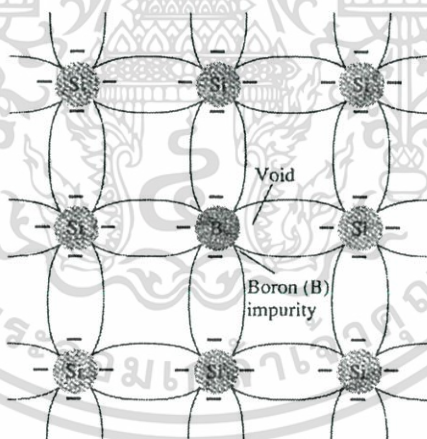
วาเลนซ์อิเล็กตรอนที่เหลืออีกหนึ่งตัวนี้ จะสามารถเคลื่อนที่ไปได้อย่างอิสระเมื่อได้รับพลังงานจากภายนอกเพียงเล็กน้อยสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์นี้เรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-Type Semiconductor) โดยมีแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นแสดงได้ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

2.3.1.2.2 สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-Type Semiconductor)

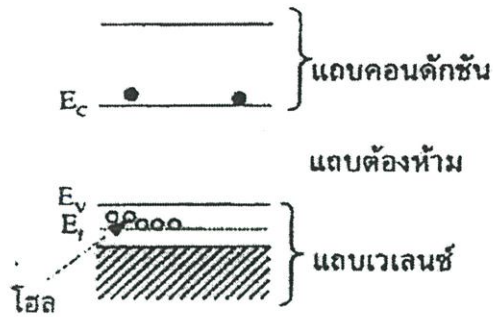
เมื่ออะตอมของซิลิกอน (Si) ถูกแทนด้วยอะตอมของโบรอน (B) เนื่องจากวาเลนซ์อิเล็กตรอนของโบรอน (B) มี 3 ตัว โดยวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัวของโบรอน (B) จะจับยึดกับอะตอมของซิลิกอน (Si) ที่อยู่ข้างเคียงทำให้ขาดวาเลนซ์อิเล็กตรอนอีก 1 ตัว บริเวณที่ขาดอิเล็กตรอนนี้เรียกว่า โฮล (Hole) ซึ่งจะเปรียบเสมือนกับประจุบวก ดังแสดงในรูปที่ 2.20



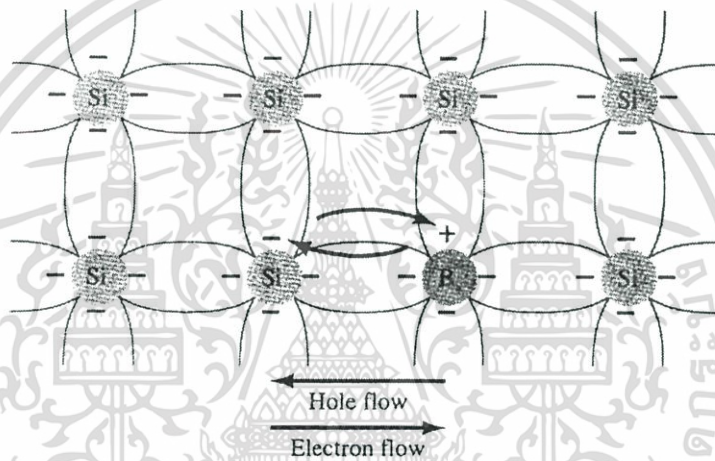
รูปที่ 2.20 อะตอมของโบรอนที่ถูกเจือลงในสารกึ่งตัวนำซิลิกอน

โดยโฮลสามารถเคลื่อนที่ไปได้เมื่อได้รับพลังงานจากภายนอก สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์นี้เรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-Type Semiconductor) โดยมีแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพี

แสดงได้ดังรูปที่ 2.21 และการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลเมื่อได้รับพลังงานจากภายนอก แสดงได้ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.21 แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพี

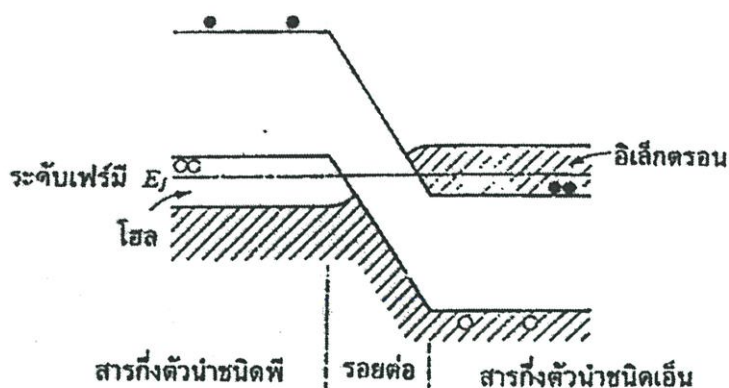


รูปที่ 2.22 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮล

2.3.2 กลไกการเปล่งแสงของเลเซอร์ไดโอด

โครงสร้างพื้นฐานของเลเซอร์ไดโอด คือ รอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบตรง (Direct Band Gap) ซึ่งจะมีสารเจือปนชนิดเอ็นและสารเจือปนสำหรับชนิดพี ลักษณะของแถบพลังงานแสดงได้ดังรูปที่ 2.19 และ 2.21 เนื่องจากในการโคจรของอิเล็กตรอนนั้นจะโคจรมาก ดังนั้นระดับพลังงานเฟอร์มีจึงล้าเข้าไปในแถบเวเลนซ์สำหรับชนิดพี และเข้าไปในแถบคอนดักชันสำหรับชนิดเอ็น เรียกสารกึ่งตัวนำที่โคจรมากเช่นนี้ว่า ดีเจเนอเรต (Degenerated Semiconductor) เมื่อนำสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดมาสร้างเป็นรอยต่อพี-เอ็นแบบไดโอดจะได้แถบพลังงานดังรูปที่

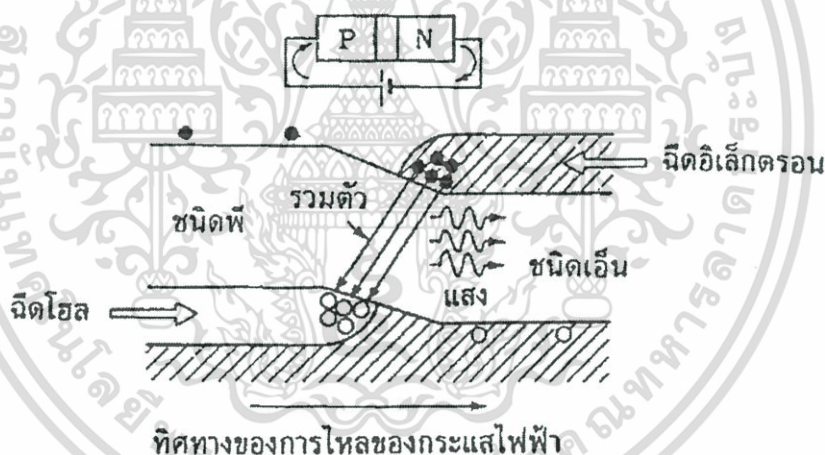
2.23



รูปที่ 2.23 รอยต่อพีเอ็นที่โคปสารเจือปนด้วยความเข้มสูง

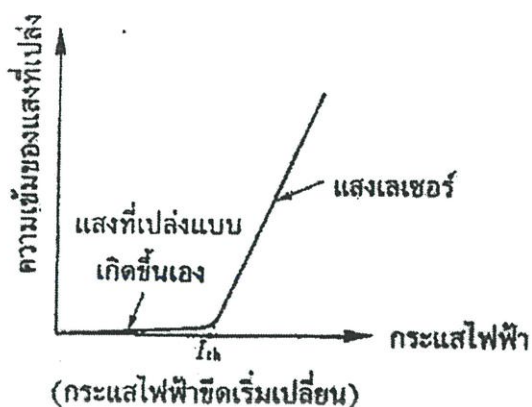
ในการกระตุ้นพาหะเพื่อให้เกิดเลเซอร์นั้น จะใช้วิธีฉีดกระแสไฟฟ้าจากภายนอกให้ไหลเข้าสู่รอยต่อพีเอ็น โดยป้อนแรงดันไฟฟ้าแบบไบแอสตาม (Forward Bias) นั่นคือ ป้อนแรงดันไฟบวกเข้าด้านพี และป้อนแรงดันไฟลบเข้าด้านเอ็น จะทำให้แถบพลังงานเปลี่ยนรูป ดังแสดงได้ดังรูปที่

2.24



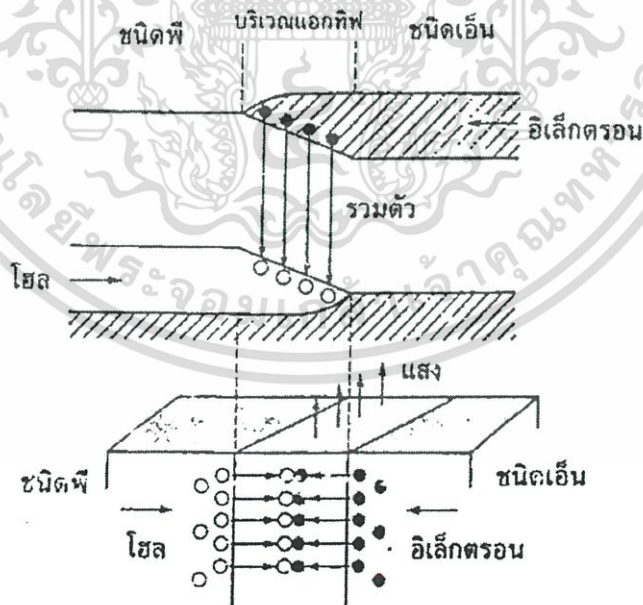
รูปที่ 2.24 รอยต่อพีเอ็นที่กำเนิดแสงเลเซอร์ในเลเซอร์ไดโอด

อิเล็กตรอนจะไหลจากด้านเอ็นเข้าสู่รอยต่อและโฮลจะไหลจากด้านพีเข้าสู่รอยต่อ ที่บริเวณรอยต่อจะมีคู่ของอิเล็กตรอนและโฮลเกิดขึ้นจำนวนมาก เมื่ออิเล็กตรอนและโฮลรวมตัวกัน (Recombine) จะเกิดการเปล่งแสงออกมาโดยพลังงานโฟตอนจะมีค่าเท่ากับช่องว่างพลังงานของรอยต่อ $E = h\nu$ หลักการเปล่งแสงเช่นนี้คล้ายกับกรณีของไดโอดเปล่งแสง (LED : Light Emitting Diode) แต่การทำให้เกิดเลเซอร์นั้นจะต้องฉีดกระแสให้มากเป็นพิเศษ ดังแสดงในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 ความสัมพันธ์ของการฉีดกระแสเพื่อจะทำให้เกิดเลเซอร์

ถ้ากระแสมีค่าน้อยการเปล่งแสงจะเป็นแบบเกิดขึ้นเอง (Spontaneous Emission) และเมื่อเพิ่มกระแสให้สูงกว่ากระแสขีดเริ่ม (Threshold Current : I_{th}) จะเกิดประชากรผกผัน (Population Inversion) กล่าวคือ ถ้าจำนวนคู่อิเล็กตรอนและโฮลมีค่ามากกว่าค่าๆ หนึ่งแล้ว ก็จะทำให้เกิดการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮล และเกิดการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น (Stimulated Emission) โดยที่ด้านข้างภายนอกของรอยต่อพีเอ็นจะถูกรวมเข้าเป็นผิวมันแบบกระจก ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวสั่นพ้องเชิงทัศน (Optical Resonator) แสงที่สะท้อนกลับไปมาภายในเรโซเนเตอร์นี้จะกลายเป็นแสงเลเซอร์วิ่งออกสู่ภายนอกในที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 กลไกการเปล่งแสงเลเซอร์ในเลเซอร์ไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเกิดการเปล่งแสงแบบฉุกระตุก กระแสไฟฟ้าจะไหลเพิ่มอย่างรวดเร็ว เรียกกระแสไฟฟ้าที่เริ่มทำให้เกิดการเปล่งแสงแบบฉุกระตุกนี้ว่า กระแสไฟฟ้าขีดเริ่ม (Threshold Current : I_{th}) ในยุคแรกๆ โครงสร้างของเลเซอร์ไดโอดเป็นรอยต่อที่เย็นของวัสดุที่มีช่องว่างพลังงานเท่ากันซึ่งเรียกว่า รอยต่อแบบโฮโมจังชัน (Homojunction) ซึ่งมีข้อเสียว่าพาหะที่ถูกฉีดเข้าไปนั้นบางตัวแทนที่จะรวมตัวกันแต่จะวิ่งแพร่กระจายไปทั่ว ทำให้ประสิทธิภาพของเลเซอร์มีค่าต่ำ และต้องใช้วิธีการฉีดกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์ ต่อมาได้มีการแช่ตัวเลเซอร์ไดโอดลงในไนโตรเจนเหลว (77K) ทำให้การแพร่กระจายของพาหะลดน้อย จึงเกิดเลเซอร์แบบต่อเนื่องได้

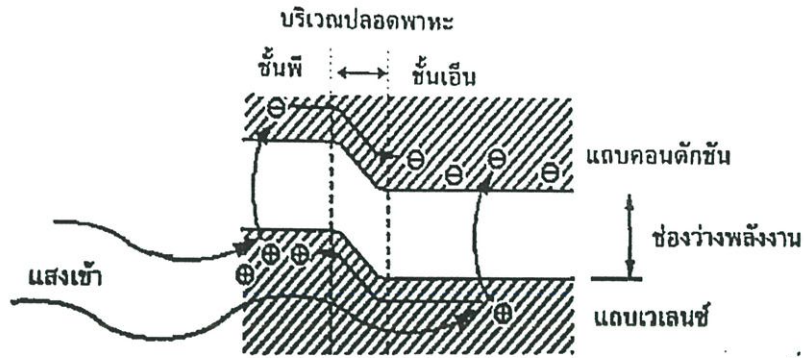
2.3.3 กลไกการทำงานของโฟโตไดโอด

โฟโตไดโอด (Photodiode) เป็นสิ่งประดิษฐ์ตรวจจับแสงชนิดโฟโตอิเล็กทริกแบบภายใน (Internal Photoelectric) มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดรอยต่อ pn เมื่อมีแสงตกกระทบบนรอยต่อ pn จะทำให้เกิดกระแสและความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่า โฟโตไดโอดเป็นตัวตรวจจับแสงที่สามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าและสามารถตรวจวัดความเข้มแสงได้ การผลิตสามารถผลิตได้จากสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ เช่น Si , GaAs , GaAsP และ GaP ซึ่งมีความไวต่อแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ กัน ซึ่งในที่นี้จะได้อธิบายการทำงานของโฟโตไดโอดที่มีโครงสร้างพื้นฐานรอยต่อ pn ดังรูปที่ 2.27



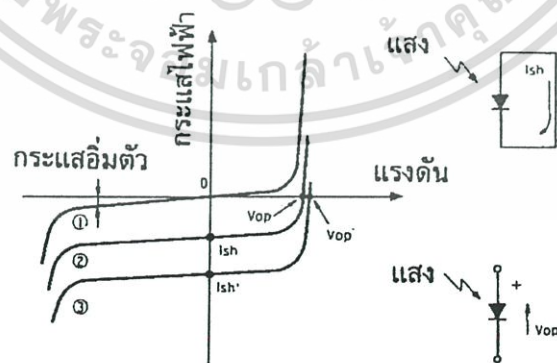
รูปที่ 2.27 แสดงโครงสร้างพื้นฐานรอยต่อ pn ของโฟโตไดโอด

จากรูปด้านที่รับแสงเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p ที่ติดกับสารกึ่งตัวนำชนิด n ที่รอยต่อ pn นี้ จะเป็นบริเวณเขตปลอดพาหะจะทำหน้าที่เป็นส่วนเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ซึ่งแถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pn แสดงได้ดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 แสดงแถบพลังงานของโฟโตไดโอด

เมื่อมีแสงตกกระทบบโฟโตไดโอดแสงจะถูกดูดกลืนโดยที่พลังงานโฟตอนของแสง ($E = h\nu$) จะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าช่องว่างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ (E_g) โดยพลังงานโฟตอนของแสงจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากแถบพลังงานวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบพลังงานคอนดักชัน ซึ่งจะทำให้แถบพลังงานวาเลนซ์มีโฮลเหลืออยู่ การเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลนี้จะเกิดขึ้นได้ทั้งในชั้น p ชั้น n และบริเวณเขตปลอดพาหะ อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในแถบพลังงานคอนดักชันในชั้น p จะแพร่กระจายไปสู่ชั้น n ซึ่งอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในแถบพลังงานคอนดักชันในชั้นบริเวณเขตปลอดพาหะจะถูกค้ำยไฟฟ้าภายใน (built in potential) ทำให้เคลื่อนที่ไปสู่ชั้น n ส่วนโฮลที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่จากแถบพลังงานวาเลนซ์ในชั้น n หรือบริเวณเขตปลอดพาหะไปสู่ชั้น p ซึ่งจะเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามกับอิเล็กตรอน จำนวนคู่อิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นนี้จะมีปริมาณแปรผันกับจำนวนโฟตอนของแสงที่สารกึ่งตัวนำดูดกลืน อิเล็กตรอนที่สะสมในชั้น n จะทำให้ชั้น n มีประจุไฟฟ้าเป็นลบ และโฮลที่สะสมในชั้น p จะทำให้ชั้น p มีประจุไฟฟ้าเป็นบวก ดังนั้นเมื่อต่อโฟโตไดโอดกับวงจรภายนอก อิเล็กตรอนและโฮลก็จะเคลื่อนที่ออกจากชั้น n และชั้น p ที่สะสมอยู่ไปสู่วงจรที่ต้องการ



รูปที่ 2.29 ลักษณะสมบัติของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในโฟโตไดโอด

จากรูปจะแสดงลักษณะสมบัติของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในโฟโตไดโอด เส้นกราฟ I-V หมายเลข 1 จะแสดงในสภาพที่ไม่มีแสงตกกระทบโฟโตไดโอดซึ่งจะมีคุณสมบัติเหมือนไดโอดโดยทั่วไป เมื่อมีแสงตกกระทบโฟโตไดโอดและมีความเข้มแสงมากขึ้นจะทำให้เส้นกราฟ I-V เลื่อนแบบขนานกับเส้นกราฟหมายเลข 1 มาเป็นเส้นกราฟหมายเลข 2 และ 3 ตามลำดับ ช่วงการตอบสนองทางแสงขึ้นอยู่กับวัสดุสารกึ่งตัวนำที่นำมาผลิตโฟโตไดโอด

2.4 ทฤษฎีเซลล์ฟีดแบ็ก (Theory of Self-Mixing) [10]

ปรากฏการณ์เซลล์ฟีดแบ็ก (Self-Mixing Phenomena) หรือการย้อนกลับทางแสง (Optical Feedback Effect) เกิดขึ้นเมื่อจัดเรียงองค์ประกอบทางแสงให้มีการสะท้อนกลับของแสงเลเซอร์จากตัวสะท้อนภายนอก (External Reflector) กลับเข้าไปในเลเซอร์แควิตี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกำลังเอาต์พุตและความถี่ออสซิลเลชันของเลเซอร์ ซึ่งผลของการเปลี่ยนแปลงนี้สามารถตรวจวัดได้ด้วยโฟโตไดโอด ซึ่งอาจอยู่ที่ปลายเลเซอร์หรืออาจเป็นโฟโตไดโอดที่ถูกออกแบบมาให้อยู่ภายในชุดเลเซอร์ไดโอด (Laser Diode Package)

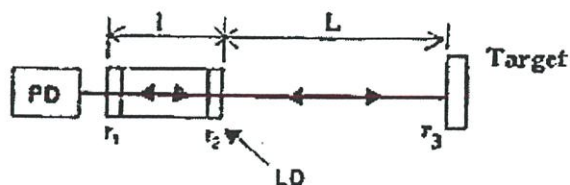
ทฤษฎีเซลล์ฟีดแบ็กมีการวิเคราะห์ 2 แบบ คือ

1. แบบของ Lang และ Kobayashi เป็นการใช้อนุภาคต่างๆ อธิบายผลของเลเซอร์เมื่อมีการย้อนกลับทางแสงในทอมของตัวแปรทางแสงและทางไฟฟ้า
2. แบบที่ใช้แบบจำลอง Three Mirror Cavity เป็นแบบที่สามารถเข้าใจได้ง่ายกว่า เนื่องจากไม่มีสมการที่ซับซ้อน

นอกจากนี้ยังจำแนกการวิเคราะห์ผลของเซลล์ฟีดแบ็ก ตามการแปรเปลี่ยนค่าของความยาวแควิตี้ภายนอก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความยาวแควิตี้ภายนอกเป็นช่วงยาว (ประมาณ 1 มิลลิเมตร) และการเปลี่ยนแปลงความยาวแควิตี้ภายนอกเป็นช่วงสั้น ระดับความยาวคลื่นแสง นั้นจะส่งผลให้กำลังของแสงย้อนกลับมีการเปลี่ยนแปลง โดยจะพิจารณาเงื่อนไขของเลเซอร์ออสซิลเลชัน ซึ่งในที่นี้จะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความยาวแควิตี้ภายนอกเป็นช่วงยาว ซึ่งจะสามารถอธิบายผลที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

2.4.1 เงื่อนไขของเลเซอร์ออสซิลเลชันเมื่อมีแควิตี้ภายนอก

พิจารณาแบบจำลองแควิตี้ของเลเซอร์ไดโอดซึ่งมีตัวสะท้อนภายนอกดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 แบบจำลองแควิตี้ของเลเซอร์ไดโอดที่มีแควิตี้ภายนอก

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

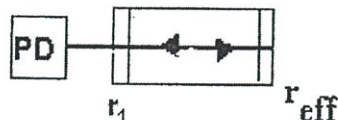
$$\frac{d}{dt}E(t)e^{i\Omega t} = \left[i\omega_N + \frac{1}{2}(G - \Gamma_\omega) + \beta(t) \right] E(t)e^{i\Omega t} \quad (2.19)$$

เมื่อ Ω คือ ความถี่เชิงมุมของเลเซอร์ออสซิลเลชัน
 ω_N คือ ความถี่เชิงมุมของเลเซอร์แควิตี้โหมดที่ N ใดๆ
 G คือ สัมประสิทธิ์กำลังขยาย
 Γ_ω คือ ค่าการสูญเสียในเลเซอร์แควิตี้
 $\beta(t)$ เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับเวลาและเกี่ยวข้องกับการย้อนกลับของแสง รวมถึงการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนของกระจกหน้าของเลเซอร์แควิตี้และตัวสะท้อนภายนอก ซึ่งเป็นฟังก์ชันเชิงซ้อน ดังนี้

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

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

ภายใต้เงื่อนไขสภาวะคงที่ (Steady State Conditions) $\beta(t)$ จะเป็นฟังก์ชันของเวลาหายไป และจากกลับของแสงภายในแควิตี้ภายนอก เมื่อพิจารณาเลเซอร์ไดโอดที่มีการย้อนกลับของแสงภายนอกเป็นวงจรมุมลดรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 แบบจำลองวงจรมุมลดของเลเซอร์ไดโอดเมื่อมีตัวสะท้อนภายนอก

จากรูปที่ 2.31 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 τ คือ เวลาไปกลับของแสงเลเซอร์ในแควิตีภายนอกมีค่าเท่ากับ $2L/c$
 c คือ ความเร็วแสงในสุญญากาศมีค่าเท่ากับ 3×10^8 เมตร/วินาที

ดังนั้นจากแบบจำลองจะได้ว่า ค่ากำลังขยายเชิงซ้อน ($\exp(\beta\tau_D)$) เท่ากับ ค่าการสูญเสียทั้งหมดของการสะท้อนเนื่องจากแบบจำลองนั้นคือ

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

เมื่อ τ_D คือ เวลาครบรอบของแสงภายในเลเซอร์แควิตีมีค่าเท่ากับ $\frac{2\eta l}{c}$
 ηl คือ ความยาวแควิตีขงผล (Effective Cavity Length) เนื่องจากมีตัวสะท้อนภายนอก

แทนสมการ (2.21) ในสมการ (2.22) จะได้ความสัมพันธ์

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

สามารถเขียนส่วนจำนวนจริงและส่วนจำนวนจินตภาพของกำลังขยายเชิงซ้อนได้เป็น

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

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

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

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

เมื่อ G_{th} คือ กำลังขยายขีดเริ่ม

ซึ่งจะได้กำลังขยายขีดเริ่มและความถี่ออสซิลเลชันเป็น

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

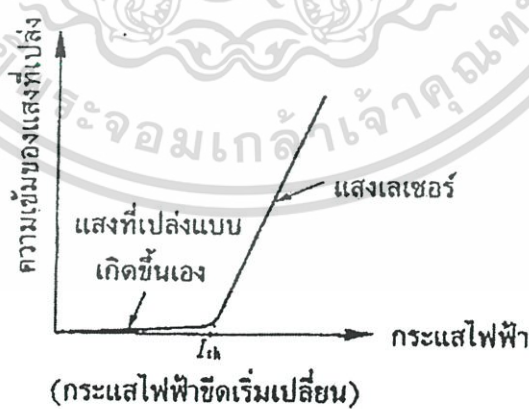
$$\Omega = \omega_N + \beta_i = \omega_N + \frac{1}{\tau_D} \phi(r_3, \tau, \Omega) \quad (2.29)$$

เมื่อ Γ_o คือ ค่าการสูญเสียของแสงเลเซอร์ในเควิตี้ขณะที่ยังไม่มีกำรย้อนกลับของแสงภายนอก

$$\Gamma_o = \Gamma_{\omega} + \frac{2}{\tau_D} \ln\left(\frac{1}{r_1 r_2}\right) \quad (2.30)$$

2.4.2 กำลังเอาต์พุตและความถี่ออสซิลเลชัน

ขณะที่ไม่มีกำรย้อนกลับทางแสง กำลังเอาต์พุตหรือความเข้มของแสงที่เปล่งออกมาเป็นสัดส่วนเชิงเส้นกับค่ากระแสแซ็บ (Injection Current) และมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่ากระแสแซ็บดังรูปที่ 23



รูปที่ 2.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเอาต์พุตกับค่ากระแสแซ็บ

แต่ในกรณีของแบบจำลองหรือเมื่อมีแควิตีภายนอก ความสัมพันธ์นี้จะไม่เป็นเชิงเส้นแต่จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่ากำลังขยายซีดีเริ่มและค่าความถี่ออสซิลเลชัน ดังสมการ

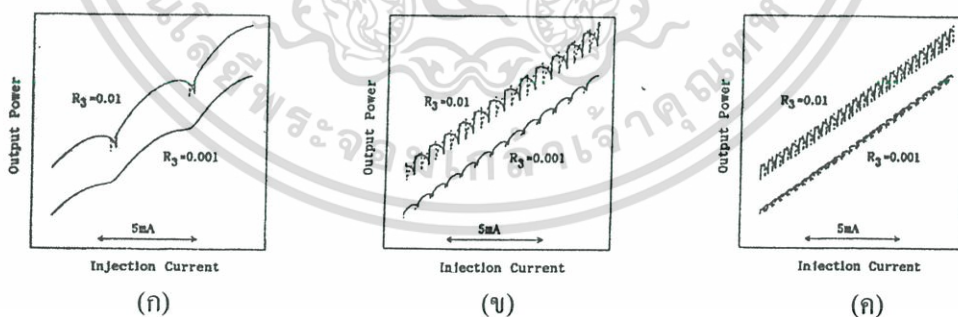
$$P = \mu \frac{\Omega}{G_{th}} (I - I_{th}) \quad (2.31)$$

เมื่อ I_{th} คือ กระแสขั้ว ณ จุดเริ่มทำงานของเลเซอร์
 μ คือ สัมประสิทธิ์ที่กำหนดโดยพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ในเลเซอร์แควิตี

$$\mu = \frac{\Gamma \varepsilon h}{4\pi \tau_M q} \quad (2.32)$$

เมื่อ Γ คือ คอนไฟน์เมนต์แฟกเตอร์
 ε คือ ประสิทธิภาพการป้อนกระแสแก่เลเซอร์
 h คือ ค่าคงที่พลังค์ มีค่าเท่ากับ $6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
 τ_M คือ ช่วงชีวิตของแสงเนื่องจากการสูญเสียจากการสะท้อน
 q คือ ประจุไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$

ขณะที่ไม่มีการย้อนกลับของแสงภายนอก Ω และ G_{th} จะมีค่าคงที่ ดังนั้นกำลังเอาต์พุตของเลเซอร์ออสซิลเลชันจึงแปรผันเชิงเส้นกับค่ากระแสขั้วเลเซอร์เท่านั้น แต่เมื่อมีการย้อนกลับของแสงภายนอกเข้าสู่เลเซอร์แควิตี ค่า Ω และ G_{th} จะมีค่าเปลี่ยนแปลง ซึ่งความถี่ออสซิลเลชันและค่ากำลังขยายซีดีเริ่มมีค่าขึ้นกับกำลังย้อนกลับของแสงภายนอกและความยาวแควิตีภายนอกสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 ความสัมพันธ์ของกำลังเอาต์พุตและค่ากระแสขั้วที่ค่าความยาวแควิตีภายนอกต่างๆ
 กัน (ก) $L = 10 \eta l$ (ข) $L = 50 \eta l$ และ (ค) $L = 100 \eta l$

จากรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังเอาต์พุตของเลเซอร์กับค่ากระแสขั้วที่ค่าความยาว แควตีภายนอกต่างๆ กัน เมื่อกระแสขั้วเพิ่มขึ้นค่ากำลังเอาต์พุตจะมีค่าเพิ่มขึ้น และเนื่องจากมีตัว สะท้อนภายนอกทำให้ค่ากำลังเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะลูกคลื่น โดยเมื่อความยาวแควตี มากขึ้นคาบของลูกคลื่นจะลดลงและที่ค่าการสะท้อนกลับของแสงมากขึ้นขนาดแอมพลิจูดของลูก คลื่นจะใหญ่ขึ้น

2.4.3 กำลังเอาต์พุตและความยาวแควตีภายนอก

ผลของความยาวแควตีภายนอกที่มีต่อกำลังเอาต์พุตสามารถอธิบายได้ในเชิงคุณภาพ และ ด้วยผลการทดลองภายใต้เงื่อนไขสำหรับมัลติโหมดคอสซิลเลชันของเลเซอร์ไดโอด ซึ่งให้แต่ละ โหมดเป็นอิสระต่อกันทำให้ได้กำลังขยายขีดเริ่มของแต่ละโหมดเป็นดังนี้

$$G_{N_{th}} = \Gamma_o + \frac{2}{\tau_D} g(r_3, \tau, \Omega_N) \quad \text{สำหรับโหมดที่ } N_{th} \quad (2.33)$$

$$G_{N'_{th}} = \Gamma_o + \frac{2}{\tau_D} g(r_3, \tau, \Omega_{N'_{th}}) \quad \text{สำหรับโหมดที่ } N'_{th} \quad (2.34)$$

เมื่อ Ω_N คือ ความถี่เชิงมุมของการออสซิลเลชันของโหมดที่ N
 $\Omega_{N'}$ คือ ความถี่เชิงมุมของการออสซิลเลชันของโหมดที่ N'

จากสมการที่ 2.31 ค่ากำลังเอาต์พุตที่มีค่าสูงสุดเมื่อ ค่ากำลังขยายขีดเริ่มมีค่าต่ำสุด ซึ่งเงื่อนไข สำหรับค่ากำลังขยายขีดเริ่มมีค่าต่ำสุดพิจารณาได้จากสมการที่ (2.26) ซึ่งจะได้

$$\Omega_N \tau = 2M\pi \quad (2.35)$$

$$\Omega_{N'} \tau = 2M'\pi \quad (2.36)$$

เมื่อ M และ M' เป็นจำนวนจริง

ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมของสมการที่ (2.35) และ (2.36) จะได้ค่ากำลังขยายขีดเริ่มมีค่า ต่ำสุดเป็นดังสมการที่ 2.37

$$G_{th} = G_{N_{th}} = G_{N'_{th}} = \frac{2}{\tau_D} \ln \left(\frac{1+r_2 r_3}{1+r_3/r_2} \right) \quad (2.37)$$

และให้ความถี่ออสซิลเลชันของแต่ละโหมดเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์เชิงมุม ซึ่งก็คือ

$$\Omega_N \approx \frac{N\pi c}{\eta l} \quad (2.38)$$

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

จากสมการที่ (2.35) , (2.36) , (2.38) และ (2.39) พบว่า ค่ากำลังเอาต์พุตมีค่าสูงสุด เมื่อ ความยาวแควิตีภายนอกมีค่าเท่ากับจำนวนเต็มเท่าของความยาวแควิตียังผล ηl ทำให้ได้ว่ากำลังของเลเซอร์ออสซิลเลชันมีค่าสูงสุดตามเงื่อนไข

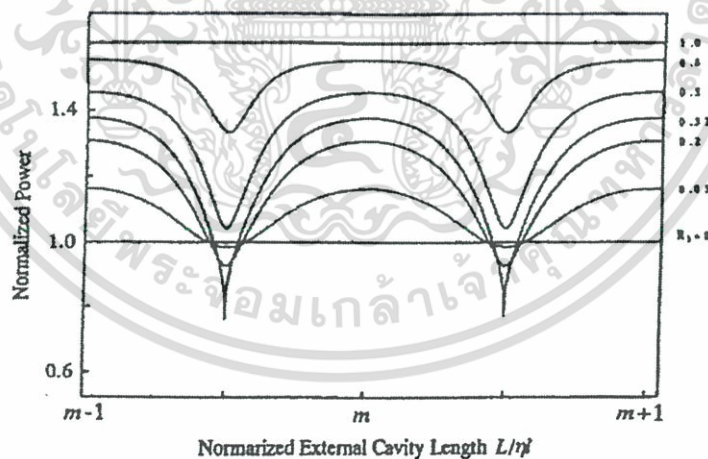
$$\frac{L}{\eta l} = \frac{m}{n} \quad (2.40)$$

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

และค่ากำลังเอาต์พุตทั้งหมดที่เงื่อนไขสูงสุด สามารถคำนวณได้จากการรวมกันอย่างเป็นเชิงเส้นของแต่ละ โหมดกำลังดังสมการที่ 2.41

$$P \approx \mu\omega_N \left(\frac{1}{G_{N_{th}}} + \frac{1}{G_{N'_{th}}} \right) (I - I_{th}) \quad (2.41)$$

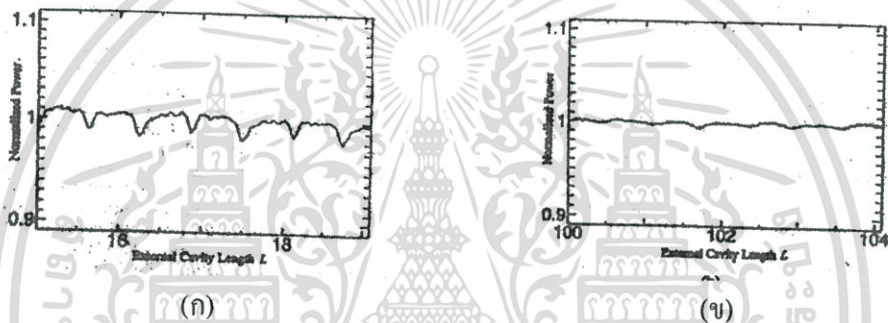
และผลจากการคำนวณแสดงดังรูปที่ 2.34



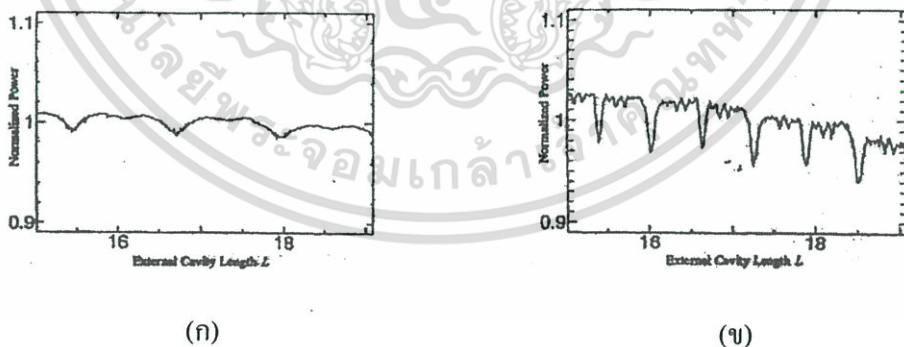
รูปที่ 2.34 กำลังเอาต์พุตเป็นฟังก์ชันของความยาวแควิตีภายนอก

จากรูปที่ 2.34 เป็นผลจากการคำนวณค่ากำลังเอาต์พุตซึ่งเป็นฟังก์ชันของความยาวแควิตีภายนอกสำหรับการออสซิลเลชันของ 2 โหมดแสงซึ่งอธิบายได้ว่าค่ากำลังเอาต์พุตมีค่าสูงสุดที่ค่า

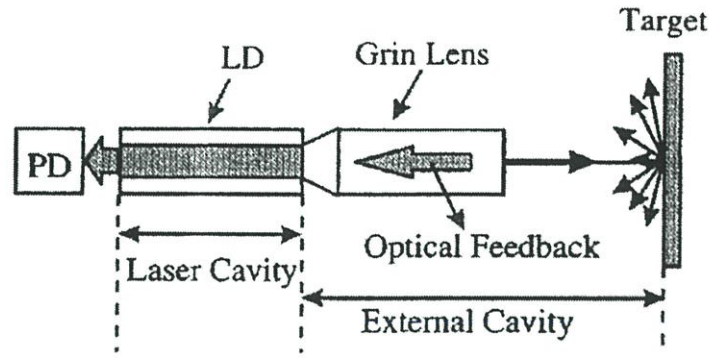
ความยาวแควิตีภายนอกมีค่าเท่ากับจำนวนเต็มเท่าของ ηl เส้นโค้งต่างๆ พลอตสำหรับค่าการสะท้อนกลับของแสงที่ต่างกัน พบว่ามีการจมลงของคลื่นที่ระยะครึ่งหนึ่งของค่าความยาวแควิตีภายนอก และมีค่าสูงที่ค่าการสะท้อนกลับของแสงอยู่ในระดับปานกลาง สามารถสรุปผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระยะแควิตีภายนอกและค่าสะท้อนกลับของแสงเนื่องจากตัวสะท้อนภายนอกที่มีต่อกำลังเอาต์พุทของเลเซอร์ได้ คือ เมื่อมีตัวสะท้อนภายนอกที่มีค่าการสะท้อนกลับเท่ากัน แต่วางอยู่ที่ระยะห่างจากเลเซอร์ต่างกัน จะมีการจมลงของกำลังเอาต์พุทมากกว่าเมื่อตัวสะท้อนภายนอกวางอยู่ที่ระยะห่างจากเลเซอร์น้อยกว่า ดังรูปที่ 2.35 และในอีกกรณีคือเมื่อวางตัวสะท้อนภายนอกห่างจากเลเซอร์เป็นระยะทางเท่ากันแต่มีค่าการสะท้อนกลับของแสงที่สูงกว่า จะมีการจมลงของกำลังเอาต์พุทที่มากกว่าหรือกล่าวได้ว่าเมื่อมีการสะท้อนหลายๆ ครั้งหรือมีการออสซิลชันแบบมัลติโหมดเนื่องจากตัวสะท้อนภายนอกจะเกิดลูกคลื่นหรือการกวัดแกว่งสัญญาณย่อยๆ มากมายระหว่างค่ากำลังเอาต์พุทสูงสุด ดังรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.35 ค่ากำลังเอาต์พุทเป็นฟังก์ชันของความยาวแควิตีภายนอกสำหรับตำแหน่งของแควิตีภายนอกที่ต่างกัน (ก) $R = 0.248$, $L = 15-19 \text{ mm}$ (ข) $R = 0.248$, $L = 100-104 \text{ mm}$

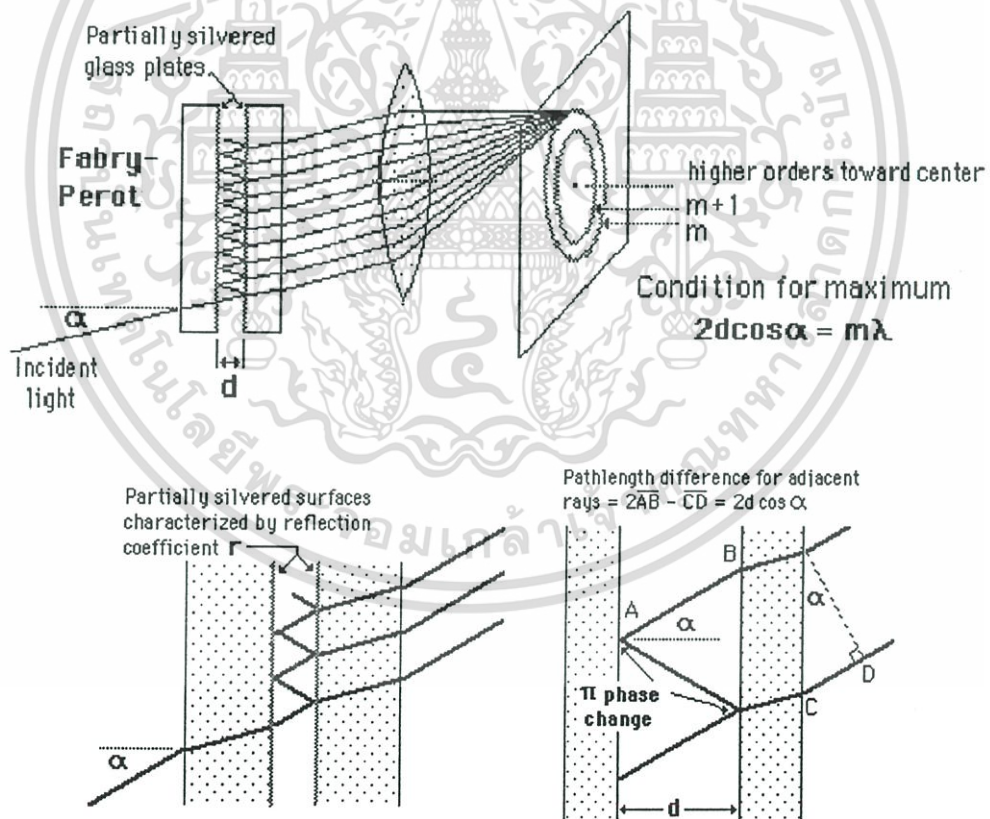


รูปที่ 2.36 ค่ากำลังเอาต์พุทเป็นฟังก์ชันของความยาวแควิตีภายนอกสำหรับค่าการสะท้อนกลับของแสงที่ต่างกัน (ก) $R = 0.0115$, $L = 15-19 \text{ mm}$ (ข) $R = 0.387$, $L = 15-19 \text{ mm}$



รูปที่ 2.37 แบบจำลองการเดินทางของแสงภายในควิตี้ของเลเซอร์ไดโอดที่มีควิตี้ภายนอก

จากรูปที่ 2.37 การแทรกสอดของแสงที่เกิดจากการสะท้อนกลับและแสงเลเซอร์ไดโอด ซึ่งแสงทั้งสองส่วนนี้จะมีการเคลื่อนที่ไปในตัวกลางเป็นระยะทางต่าง ๆ กัน จากนั้นก็จะกลับมาพบกันและแทรกสอดกันภายในเลเซอร์ควิตี้แบบฟาบรี-เพอร์โร (Fabry-Perot) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณของแสง ซึ่งสัญญาณการเปลี่ยนแปลงนี้สามารถวัดได้จากโฟโตไดโอดภายในเลเซอร์ไดโอด

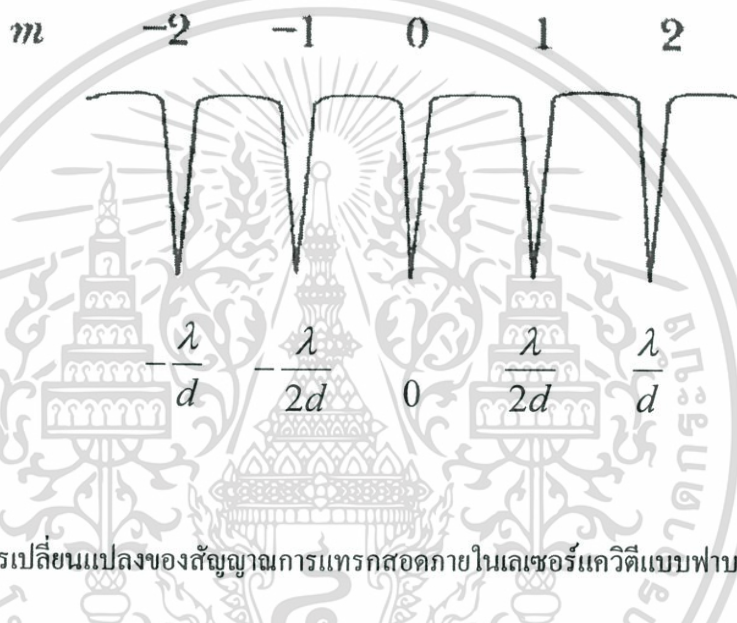


รูปที่ 2.38 การแทรกสอดภายในเลเซอร์ควิตี้แบบฟาบรี-เพอร์โร (Fabry-Perot)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.38 แสงเลเซอร์จากแหล่งกำเนิดให้แสงออกมาทำมุม α ลำแสงนี้จะทำให้เกิดการสะท้อนหลายครั้ง และเมื่อแสงที่หักเหผ่านออกไปตกกระทบบนพื้นผิววัตถุแสงจะสะท้อนกลับมาภายในเลเซอร์แควิตีจะทำให้เกิดการแทรกสอดภายในเลเซอร์แควิตีแบบฟารี-เพอร์โร ลักษณะของการแทรกสอดที่เกิดขึ้นสามารถหาได้จากสมการที่ (2.42) และการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณการแทรกสอดภายในเลเซอร์แควิตีแบบฟารี-เพอร์โร นี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.39

$$2d \cos \alpha = m\lambda \quad (2.42)$$



รูปที่ 2.39 การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณการแทรกสอดภายในเลเซอร์แควิตีแบบฟารี-เพอร์โร

ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณการแทรกสอดภายในเลเซอร์แควิตีแบบฟารี-เพอร์โร จะเกิดได้ทั้งสนามใกล้และสนามไกล และยังเกิดจากปัจจัยอื่นๆ อีก เช่น ค่ากำลังเอาท์พุทของเลเซอร์ ระยะห่างระหว่างพื้นผิวการสะท้อนหรือความยาวแควิตีภายนอก และลักษณะของพื้นผิวการสะท้อนซึ่งมาค่าการสะท้อนต่างๆ กัน ซึ่งจะพบว่า จะเกิดการจมลงของสัญญาณเป็นระยะโดยมีความสัมพันธ์กับปัจจัยต่างๆ

บทที่ 3

การออกแบบและสร้างระบบ

ในการออกแบบและสร้างระบบในงานวิจัยนี้ เกิดจากสมมติฐานที่ว่าถ้าแสงเลเซอร์ตกกระทบพื้นผิววัตถุแล้วจะต้องเกิดการสะท้อนของแสงกลับมาไม่มากนักน้อย ถ้านำตัวตรวจรับแสงมาจัดวางในตำแหน่งที่แสงสะท้อนกลับก็หน้าที่จะตรวจวัดสัญญาณการสะท้อนกลับได้บ้าง จากการเลือกเลเซอร์และตัวตรวจรับแสงที่จะใช้งาน ก็พบข้อสงสัยว่าทำไมเลเซอร์ถึงมี 3 ขาจากการศึกษาคู่มือสร้างจึงพบว่า ภายในประกอบไปด้วยตัวเลเซอร์ไดโอดและโฟโตไดโอด ซึ่งการผลิตอุปกรณ์ทางแสงโดยทั่วไปจะนำโฟโตไดโอดมาควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเลเซอร์ไดโอดให้มีค่าคงที่ตลอดเพื่อให้กำลังของแสงเลเซอร์ที่ออกมาคงที่ตลอดเวลา ดังนั้นจึงได้ตั้งสมมติฐานขึ้นมาว่าถ้าจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเลเซอร์ไดโอดคงที่ตลอดเวลาและนำโฟโตไดโอดที่อยู่ภายในมาวัดปริมาณความเข้มแสงย้อนกลับจะทำได้หรือไม่ และได้ตั้งสมมติฐานขึ้นมาอีกข้อหนึ่งว่า ถ้าระยะห่างระหว่างเลเซอร์ไดโอดที่ภายในมีโฟโตไดโอดกับพื้นผิววัตถุที่ทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนแสงเกิดการเปลี่ยนแปลง จะสามารถวัดสัญญาณจากโฟโตไดโอดได้หรือไม่จากการทดลองในขั้นต้นพบว่าสามารถวัดสัญญาณได้แต่สัญญาณที่ได้ต่ำมาก จึงทำให้เกิดการวิจัย เพื่อที่จะวัดสัญญาณการสะท้อนและนำสัญญาณการสะท้อนนี้ไปใช้ต่อไป ซึ่งจะได้นำรายละเอียดการออกแบบเป็นส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้

3.1 เลเซอร์ไดโอดและโฟโตไดโอด

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกเลเซอร์ไดโอดซึ่งภายในมีโฟโตไดโอด รุ่น SANYO DL3038-033 ที่ให้กำลังเอาต์พุทของเลเซอร์เป็น 5 mW มีความยาวคลื่น 635 nm และรุ่น SANYO DL4039-011 ที่ให้กำลังเอาต์พุทของเลเซอร์เป็น 10 mW มีความยาวคลื่น 670 nm ซึ่งมีรายละเอียดเชิงเอกสารในภาคผนวก ที่มีช่วงสเปกตรัมในย่านแสงสีแดง ซึ่งจะช่วยให้สามารถมองเห็นและจัดระบบได้ง่ายกว่าช่วงสเปกตรัมในย่านแสงอินฟราเรด ดังรูปที่ 3.1



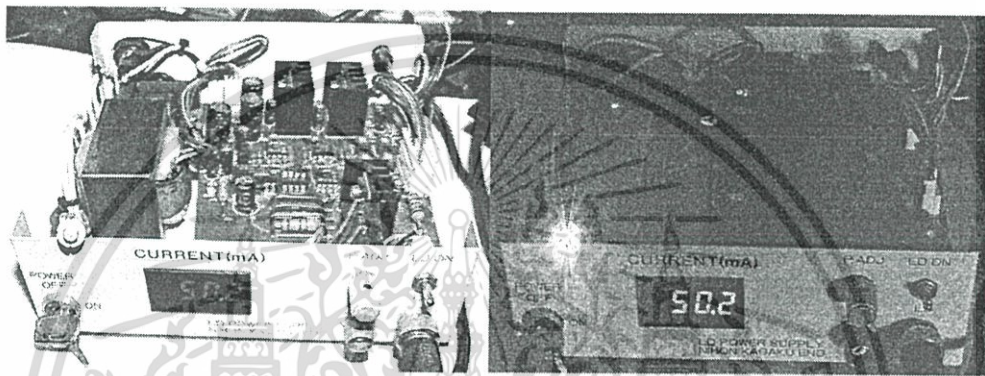
รูปที่ 3.1 เลเซอร์ไดโอดรุ่น SANYO DL3038-033 และรุ่น SANYO DL4039-011

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (ก) โครงสร้างภายนอกของเลเซอร์ไดโอด
- (ข) ไดอะแกรมแสดงภายในของเลเซอร์ไดโอด

3.2 แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าสำหรับเลเซอร์ไดโอด

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าสำหรับเลเซอร์ไดโอดโดยได้เลือกของบริษัท NIHON KAGAKU ENG ซึ่งสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าที่คงที่ให้กับเลเซอร์ไดโอดได้ตั้งแต่ 0 – 130 mA ดังรูปที่ 3.2



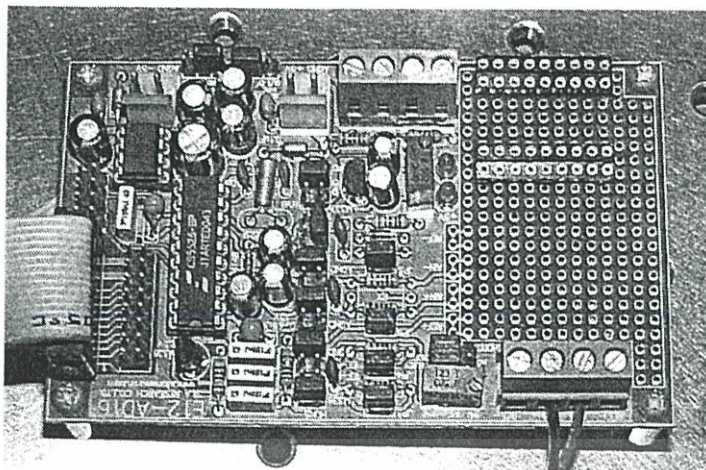
รูปที่ 3.2 แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าสำหรับเลเซอร์ไดโอดของบริษัท NIHON KAGAKU ENG

3.3 ตัวแปลงสัญญาณข้อมูลอนาล็อกเป็นสัญญาณข้อมูลดิจิทัล

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกตัวแปลงสัญญาณข้อมูลอนาล็อกเป็นสัญญาณข้อมูลดิจิทัล เบอร์ CS 5526 ของบริษัท CRYSTAL SEMICONDUCTOR ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

1. แปลงสัญญาณข้อมูลอนาล็อกเป็นสัญญาณข้อมูลดิจิทัล 20 บิต ที่มีความเที่ยงตรงสูง ความละเอียด 1,048,575 ระดับ
2. ภายในตัวชิพ A/D มีส่วนขยายสัญญาณ (Instrument Amp) ที่สามารถโปรแกรม GAIN เพื่อที่จะขยายสัญญาณในช่วงที่ต้องการได้
3. ฟังก์ชันการแปลงสัญญาณ ADC ที่ใช้เป็นการแปลงแบบอินทิเกรตในระดับสูงแบบ เกล็ดคำ-ซิกม่า ให้ความผิดพลาดเชิงเส้นต่ำเพียง 0.0015% FS โดยปราศจากสัญญาณรบกวน

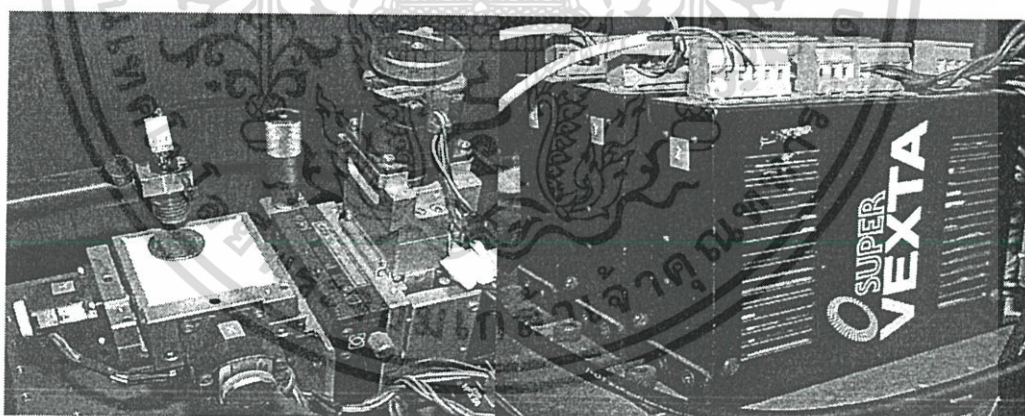
วงจรการเชื่อมต่อตัวแปลงสัญญาณข้อมูลอนาล็อกเป็นสัญญาณข้อมูลดิจิทัล เบอร์ CS 5526 นี้ถูกพัฒนาและออกแบบจากบริษัทซิลิโคนเทค จำกัด ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรแปลงสัญญาณข้อมูลอนาล็อกเป็นสัญญาณข้อมูลดิจิทัล เบอร์ CS 5526

3.4 ส่วนควบคุมการสแกนพื้นผิววัตถุ XYZ

ในส่วนนี้จะประกอบไปด้วยส่วนกลไกในการเคลื่อนพื้นผิววัตถุในแนวแกน XYZ เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวของวัตถุซึ่งสามารถเคลื่อนได้ละเอียดถึง 2 ไมโครเมตร ส่วนมอเตอร์และส่วนควบคุมมอเตอร์จะใช้มอเตอร์ยี่ห้อ VEXTA 5 เฟส ซึ่งต้องการกระแสไฟ 0.75 A ของบริษัท OPIENTAL MOTOR จำกัด ดังรูปที่ 3.4



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.4 ส่วนกลไกในการสแกนในแนวแกน XYZ

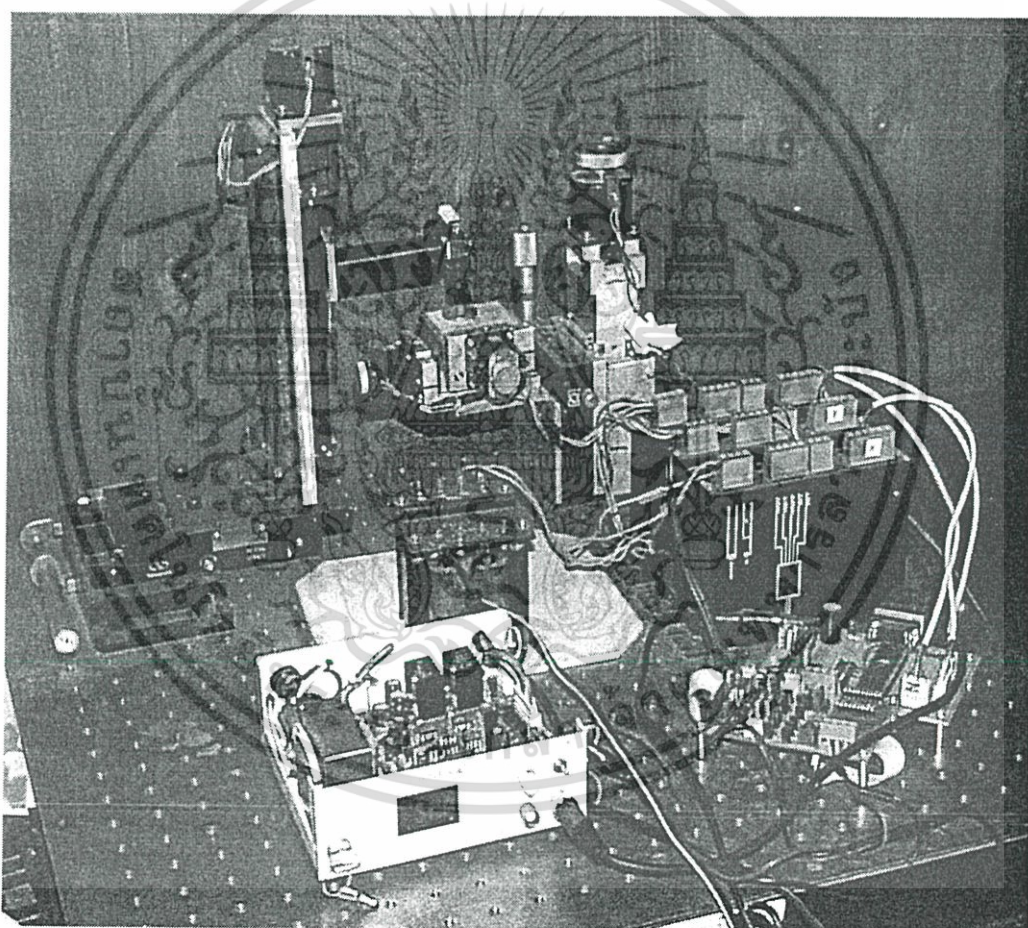
(ก) ส่วนมอเตอร์ที่ใช้ในการสแกนในแนวแกน XYZ

(ข) ส่วนควบคุมมอเตอร์ในแนวแกน XYZ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 ส่วนไมโครคอนโทรลเลอร์

ในส่วนไมโครคอนโทรลเลอร์จะเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะรับส่งคำสั่งและข้อมูลกับคอมพิวเตอร์ ส่วนควบคุมนี้จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ AT89C52 ดังรูปที่ 3.5 เป็นส่วนผลิตสัญญาณนาฬิกาให้กับส่วนควบคุมมอเตอร์ ที่เชื่อมต่ออยู่กับมอเตอร์และส่วนกลไกในการเคลื่อนที่บนผิววัตถุในแนวแกน XYZ ให้เกิดการเคลื่อนที่ และควบคุมการออกคำสั่งการทำงานกับตัวแปลงสัญญาณข้อมูลอนาล็อกเป็นสัญญาณข้อมูลดิจิทัล สัญญาณที่ได้จากการแปลงข้อมูลจะถูกนำส่งต่อไปยังคอมพิวเตอร์แบบอนุกรมผ่านพอร์ต RS-232 ซึ่งส่วนไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ควบคุมส่วนต่างๆ ของระบบการสร้างภาพพื้นผิววัตถุด้วยหลักการเซลฟ์มิกซิงในเลเซอร์ไดโอด แสดงได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงส่วนไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ควบคุมส่วนต่างๆ ของระบบการสร้างภาพพื้นผิววัตถุด้วยหลักการเซลฟ์มิกซิงในเลเซอร์ไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 ส่วนโปรแกรมในการควบคุมการทำงาน

ในส่วนโปรแกรมการควบคุมนี้ได้แบ่งเป็นส่วนต่างๆ ดังนี้ ส่วนไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ควบคุมส่วนต่างๆ จะพัฒนาโดยใช้โปรแกรมภาษา C ส่วนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนโปรแกรมควบคุมและรับส่งข้อมูลจะพัฒนาโดยใช้โปรแกรม Microsoft Visual Basic 6.0 และส่วนโปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูล จะพัฒนาโดยใช้โปรแกรม Microsoft Visual Basic 6.0 โปรแกรม Microsoft Excel และโปรแกรม Matlab มาช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งแต่ละส่วนการทำงานจะมีรายละเอียดดังนี้

ส่วนที่ 1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ควบคุมส่วนต่างๆ

ส่วนนี้จะมีโปรแกรมที่คอยติดต่อกับส่วนต่างๆ ของระบบ คือ จะมีการส่งคำสั่งเพื่อให้ตัวแปลงสัญญาณข้อมูลอนาล็อกเป็นสัญญาณข้อมูลดิจิทัล ทำการแปลงสัญญาณข้อมูลและส่งข้อมูลที่ถูกแปลงได้มาเก็บไว้ยังคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ต่อไป และยังเป็นส่วนที่ส่งสัญญาณนาฬิกาเพื่อคอยควบคุมการทำงานของส่วนควบคุมมอเตอร์ในแนวแกน XYZ

ส่วนที่ 2 โปรแกรมควบคุมและรับ - ส่งข้อมูล

ส่วนโปรแกรมควบคุมและรับส่งข้อมูลจะพัฒนาโดยใช้โปรแกรม Microsoft Visual Basic 6.0 จะทำการติดต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์และคอมพิวเตอร์ เพื่อทำการเก็บข้อมูลในส่วนต่างๆ ที่ทำการศึกษา เช่น การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเลเซอร์ไดโอดกับสัญญาณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงที่โฟโตไดโอดภายในเลเซอร์แควิตี การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณการสะท้อนจากปัจจัยต่างๆ การศึกษาการสร้างภาพพื้นผิววัตถุจากสัญญาณสะท้อน

ส่วนที่ 3 ส่วนโปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูล

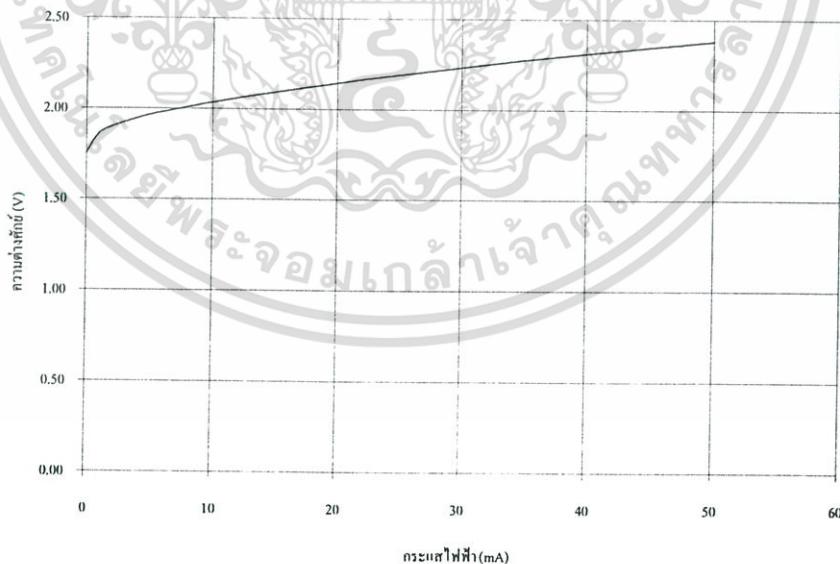
ส่วนโปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูล จะพัฒนาโดยใช้โปรแกรม Microsoft Visual Basic 6.0 โปรแกรม Microsoft Excel และโปรแกรม Matlab เพื่อศึกษาช่วงความเป็นเชิงเส้นของสัญญาณการสะท้อน และนำสัญญาณการสะท้อนในช่วงที่เป็นเชิงเส้นมาสร้างภาพพื้นผิวของวัตถุ และวิเคราะห์เพื่อดูความสูงของพื้นผิวของวัตถุ

การทดลอง ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผล

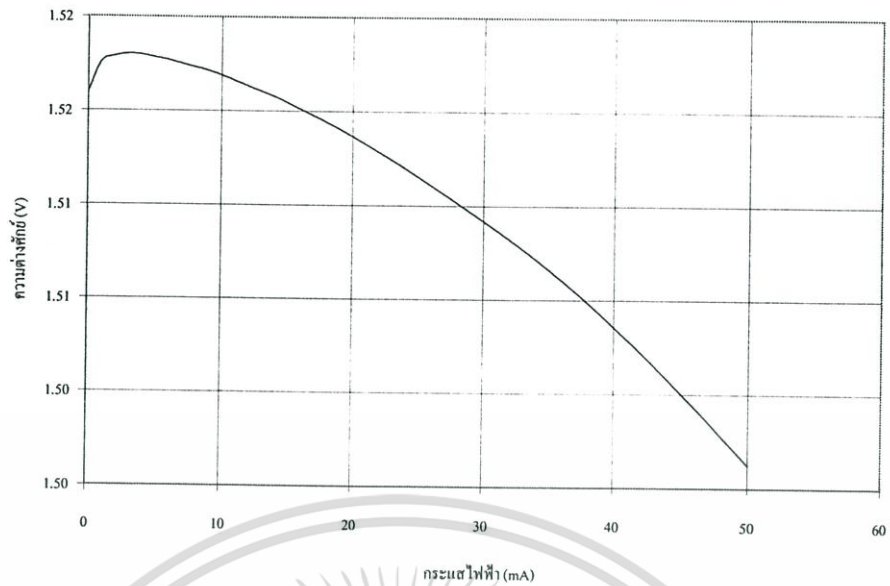
การสร้างภาพพื้นผิววัตถุด้วยหลักการเซล์ฟิมิกซิงในเลเซอร์ไดโอด จะต้องศึกษาความสัมพันธ์ต่างๆ ของการเกิดเลเซอร์ของเลเซอร์ไดโอด และการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในโฟโตไดโอดเพื่อที่จะหาความสัมพันธ์เชิงเส้นของตัวแปรต่างๆ แล้วนำข้อมูลในส่วนที่มีความเป็นเชิงเส้นมาวิเคราะห์และสร้างภาพพื้นผิวของวัตถุที่มีความแตกต่างของความสูง การวัดค่าสัญญาณที่จะนำมาศึกษาจะสามารถวัดได้ที่ เลเซอร์ไดโอด (LD) โฟโตไดโอด (PD) และตัวต้านทาน (R) ที่นำมาต่ออนุกรมกับโฟโตไดโอด (PD) ซึ่งโครงสร้างภายในเลเซอร์ไดโอดจะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 (ข) ซึ่งจะต้องศึกษาความสัมพันธ์ต่างๆ ดังนี้

4.1 การศึกษาความสัมพันธ์ของการเกิดเลเซอร์ของเลเซอร์ไดโอด

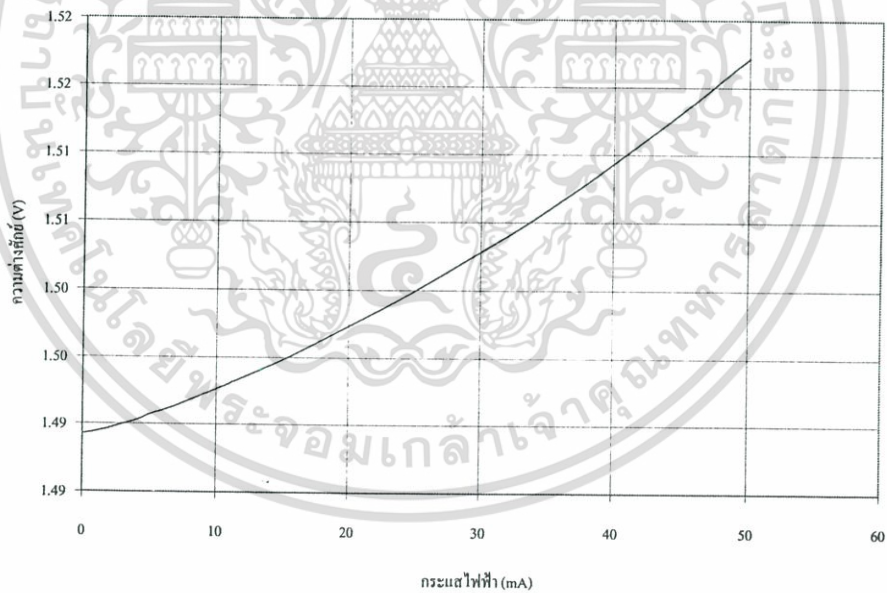
ในงานวิจัยนี้จะศึกษาการเกิดเลเซอร์ของเลเซอร์ไดโอดขนาด 5 mW และ 10 mW ซึ่งอยู่ในย่านแสงสีแดงมีช่วงความยาวคลื่น 635 nm และ 670 nm ตามลำดับ โดยการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเลเซอร์ไดโอด แล้ววัดค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมเลเซอร์ไดโอด (LD) ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมโฟโตไดโอด (PD) และความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวต้านทาน (R) ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอด (PD) ซึ่งผลการทดลองสามารถแสดงได้ดัง รูปที่ 4.1 – รูปที่ 4.6



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเลเซอร์ไดโอดขนาด 5 mW กับค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมเลเซอร์ไดโอด (LD)

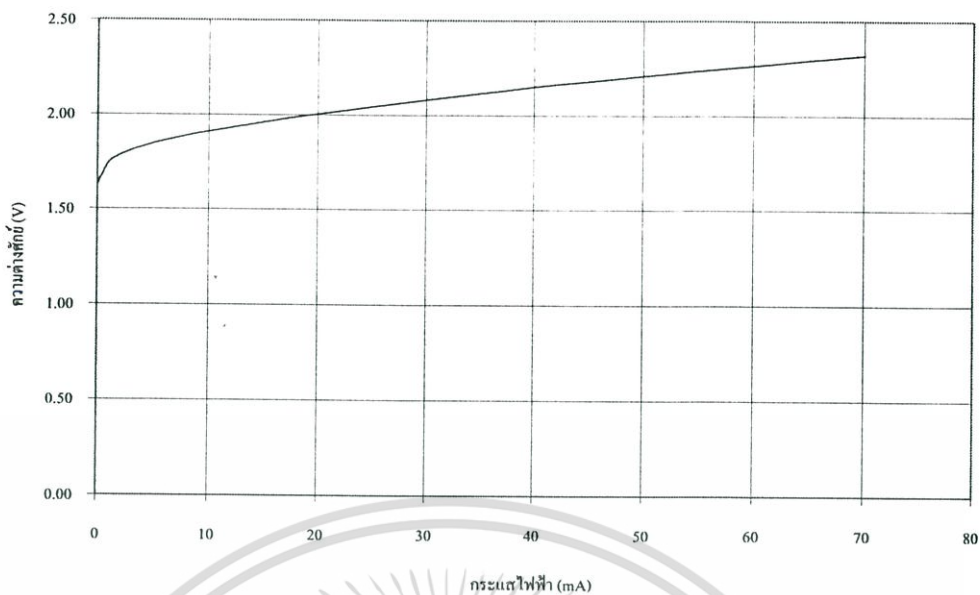


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเลเซอร์ไดโอดขนาด 5 mW กับค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมโฟโตไดโอด (PD)

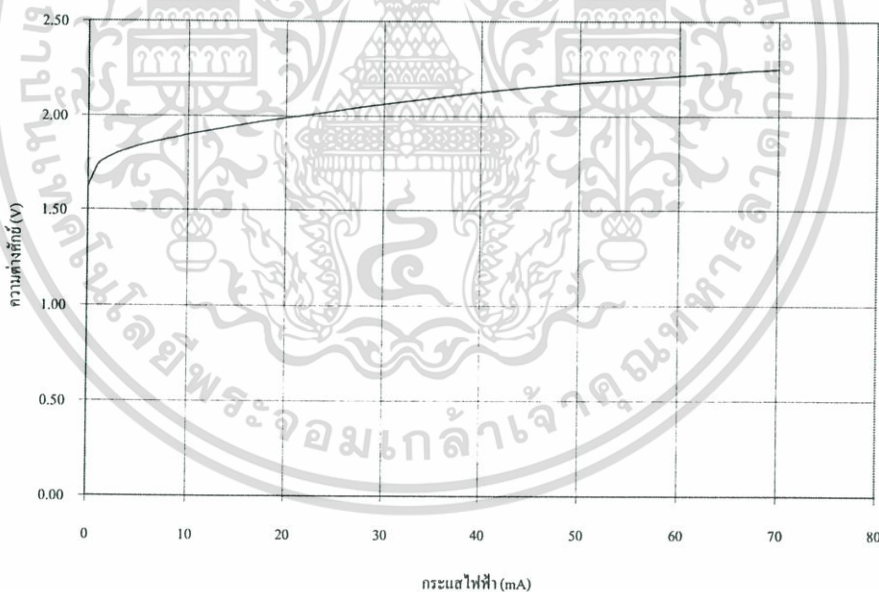


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเลเซอร์ไดโอดขนาด 5 mW กับค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวต้านทาน (R)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

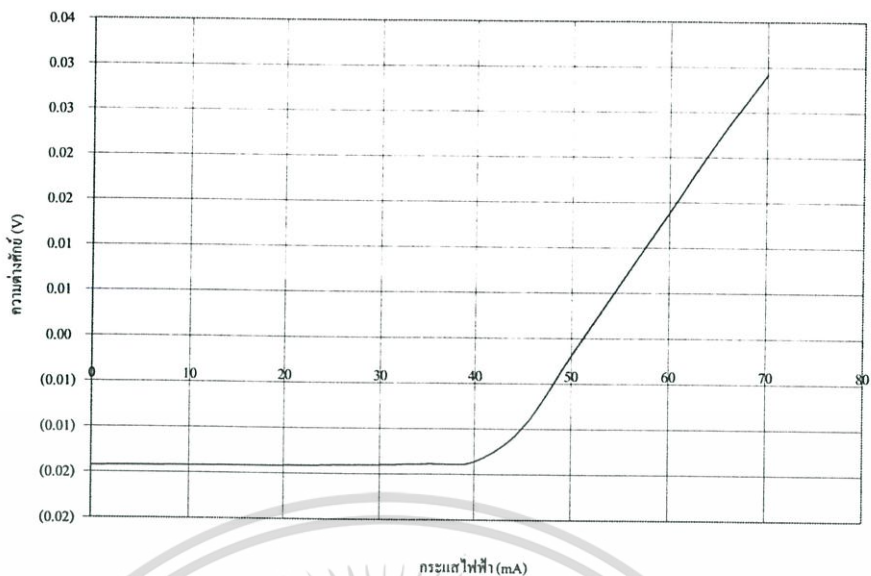


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเลเซอร์ไดโอดขนาด 10 mW กับค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมเลเซอร์ไดโอด (LD)



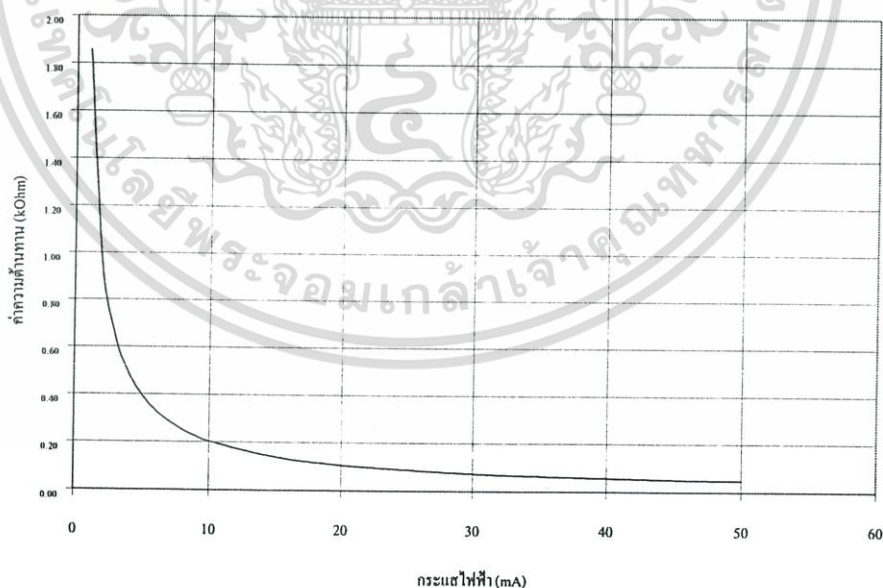
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเลเซอร์ไดโอดขนาด 10 mW กับค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมโฟโตไดโอด (PD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



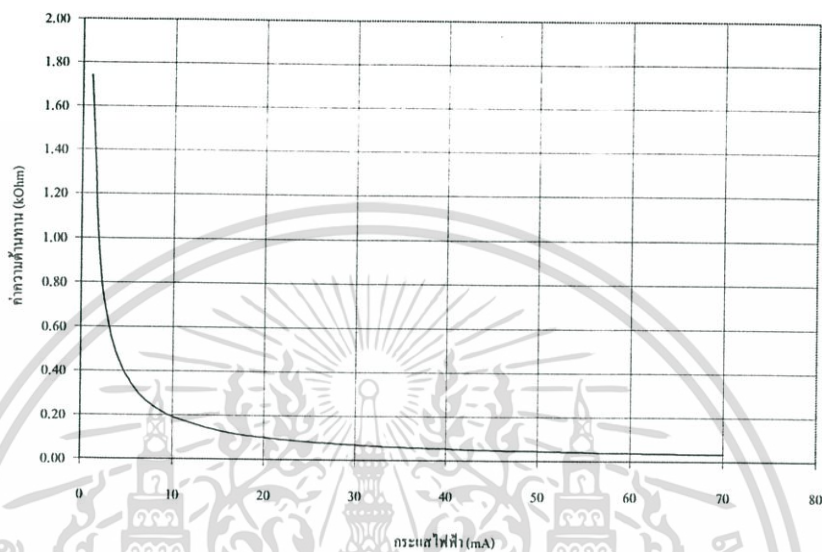
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเลเซอร์ไดโอดขนาด 10 mW กับค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวต้านทาน (R)

จากผลการทดลองจะพบว่าในช่วงที่กระแสไฟฟ้ามีค่าน้อยกว่ากระแสไฟฟ้าขีดเริ่ม (I_{th}) การเปล่งแสงจะเป็นแบบเกิดขึ้นเอง และเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้สูงขึ้นจนกระทั่งมากกว่ากระแสไฟฟ้าขีดเริ่มจะทำให้เกิดการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น ซึ่งก็คือการเกิดแสงเลเซอร์นั่นเอง

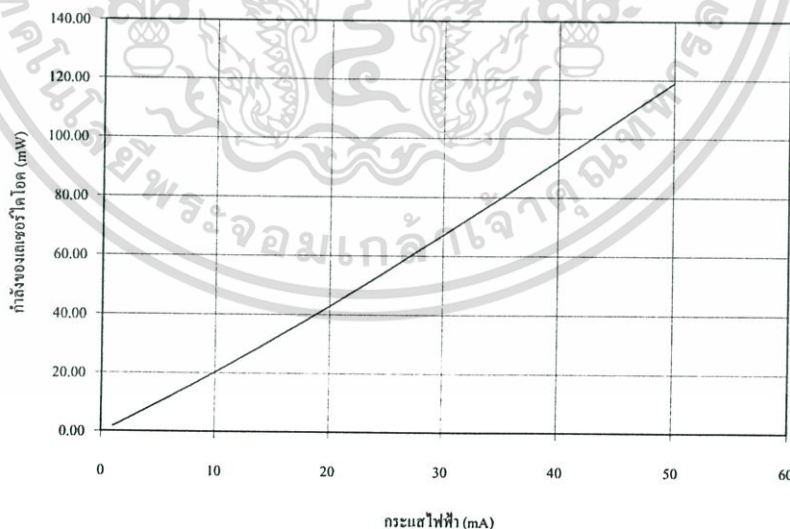


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของค่าตัวต้านทานในช่วงที่เกิดการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเองและช่วงที่เกิดการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นของเลเซอร์ไดโอดขนาด 5 mW

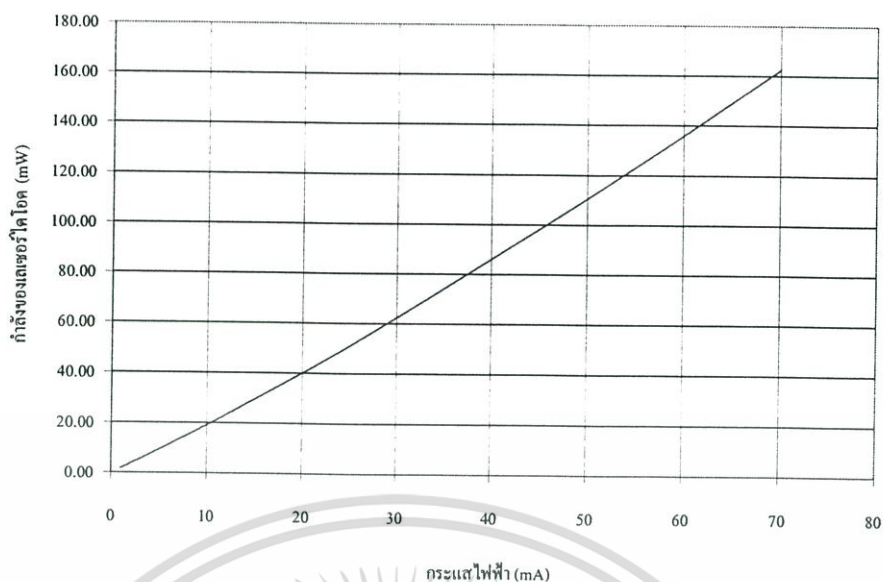
และเมื่อพิจารณาถึงตัวต้านทานในแต่ละช่วงจะพบว่า ช่วงที่เกิดการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเองนั้นค่าตัวต้านทานจะมีค่ามาก แต่เมื่อเกิดการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นค่าตัวต้านทานจะมีค่าลดลง ซึ่งผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.7 และ รูปที่ 4.8 และเมื่อศึกษาถึงกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเลเซอร์ไดโอดกับกำลังเอาต์พุตของแสงเลเซอร์ที่ได้ ซึ่งผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.9 และ รูปที่ 4.10



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของค่าตัวต้านทานในช่วงที่เกิดการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเองและช่วงที่เกิดการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นของเลเซอร์ไดโอดขนาด 10 mW



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและกำลังเอาต์พุตของแสงเลเซอร์ของเลเซอร์ไดโอดขนาด 5 mW



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและกำลังเอาต์พุตของแสงเลเซอร์ของเลเซอร์ไดโอดขนาด 10 mW

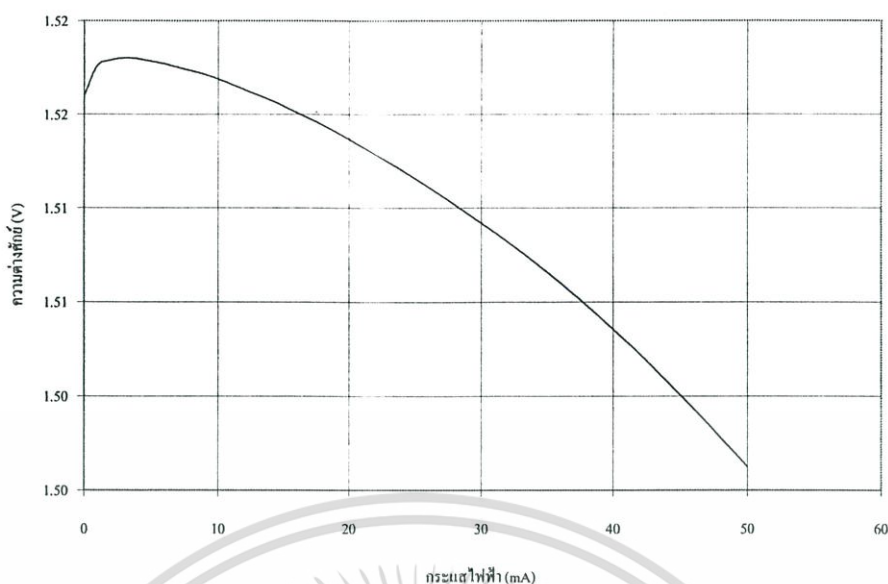
จากผลการทดลองพบว่า กำลังเอาต์พุตของแสงเลเซอร์จะขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้เลเซอร์ไดโอด แต่ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้เลเซอร์ไดโอดจะต้องไม่มากกว่าขีดจำกัดสูงสุดที่เลเซอร์ไดโอดทนได้

4.2 การศึกษาการวัดสัญญาณการสะท้อนของแสงโดยโฟโตไดโอด

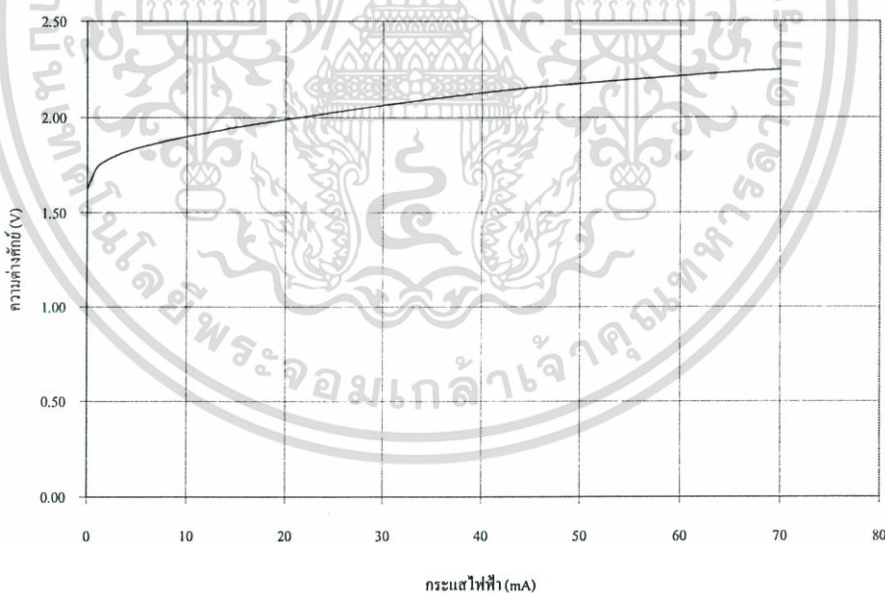
ในการวิจัยนี้จะทำการควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดแสงเลเซอร์ในเลเซอร์ไดโอด และพิจารณาสัญญาณการสะท้อนกลับของแสงที่โฟโตไดโอด โดยจะแบ่งการพิจารณาออกเป็น

4.2.1 การศึกษาการวัดสัญญาณการสะท้อนของแสงโดยโฟโตไดโอด ขณะที่ไม่มีการสะท้อนกลับของแสงจากภายนอก

ในการศึกษานี้จะทำการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเลเซอร์ไดโอด และวัดค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมโฟโตไดโอด (PD) ซึ่งเป็นสัญญาณการสะท้อนของแสงภายในเลเซอร์ไดโอด ขณะที่ไม่มีการสะท้อนกลับของแสงจากภายนอก ดังรูปที่ 4.11 และ รูปที่ 4.12



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเลเซอร์ไดโอดขนาด 5 mW กับค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมโฟโตไดโอด (PD) ขณะที่ไม่มีกระแสสะท้อนกลับของแสงจากภายนอก

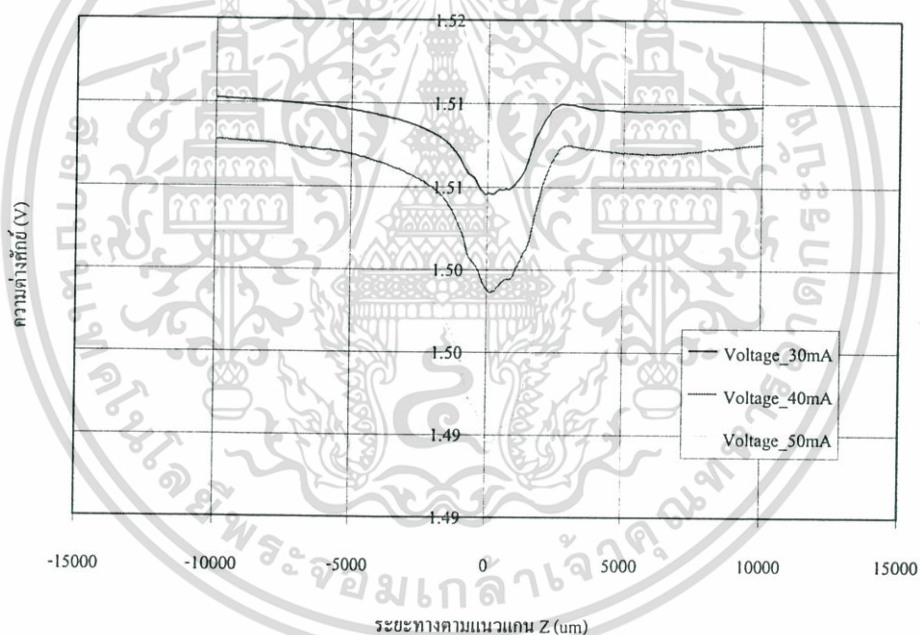


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเลเซอร์ไดโอดขนาด 10 mW กับค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมโฟโตไดโอด (PD) ขณะที่ไม่มีกระแสสะท้อนกลับของแสงจากภายนอก

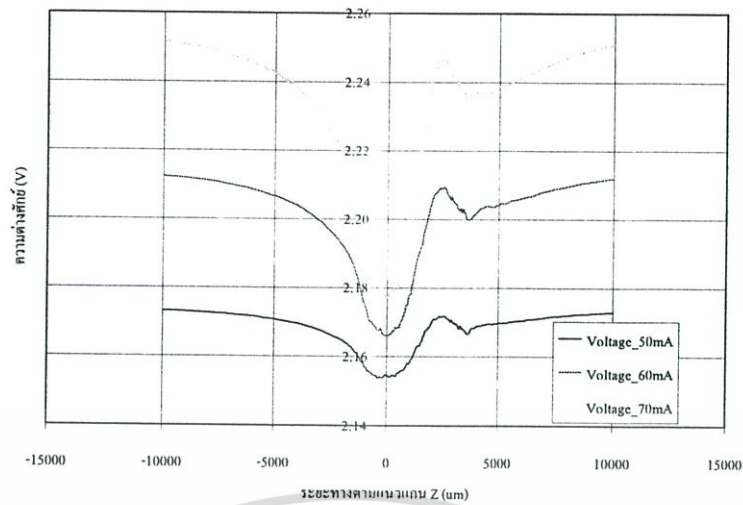
จากผลการทดลอง พบว่าเมื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเลเซอร์ไดโอดมีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณแสงเลเซอร์ก็จะมากขึ้น แต่ค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมโฟโตไดโอด (PD) ซึ่งเป็นสัญญาณการสะท้อนของแสงภายในเลเซอร์ไดโอดจะมีค่าลดลง และจากผลการทดลองก็สามารถบอกได้ว่า ปริมาณกระแสอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดจากโฟโตไดโอด ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้เป็นสัญญาณการสะท้อนภายในเลเซอร์ไดโอดโดยไม่มีการสะท้อนของแสงจากภายนอก จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มแสงเลเซอร์ที่เพิ่มขึ้น

4.2.2 การศึกษาการวัดสัญญาณการสะท้อนของแสงโดยโฟโตไดโอด ขณะที่มีการสะท้อนกลับของแสงจากภายนอก

จากการศึกษาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ทำให้เกิดเลเซอร์กับความต่างศักย์ไฟฟ้าของโฟโตไดโอดภายในเลเซอร์ไดโอด ขนาด 5 mW และ 10 mW จะได้ผลการทดลองซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.13 และ รูปที่ 4.14

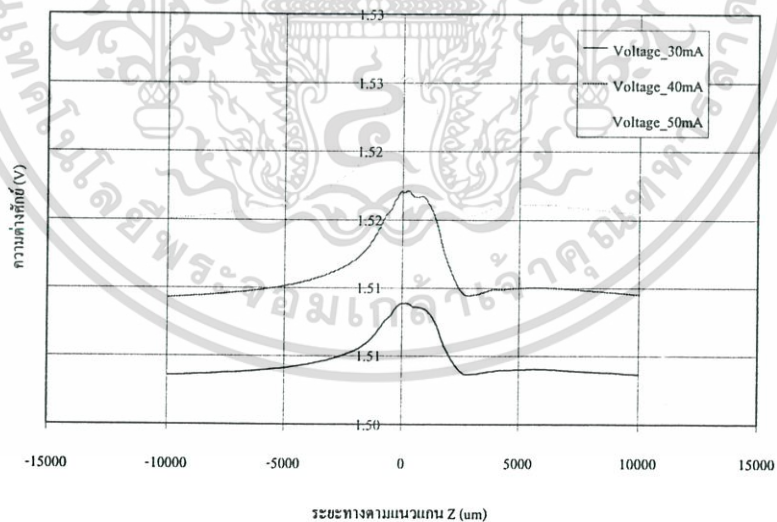


รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ทำให้เกิดเลเซอร์กับความต่างศักย์ไฟฟ้าของโฟโตไดโอดภายในเลเซอร์ไดโอด ขนาด 5 mW ที่มีพื้นผิวการสะท้อนภายนอกเป็นทองเหลือง



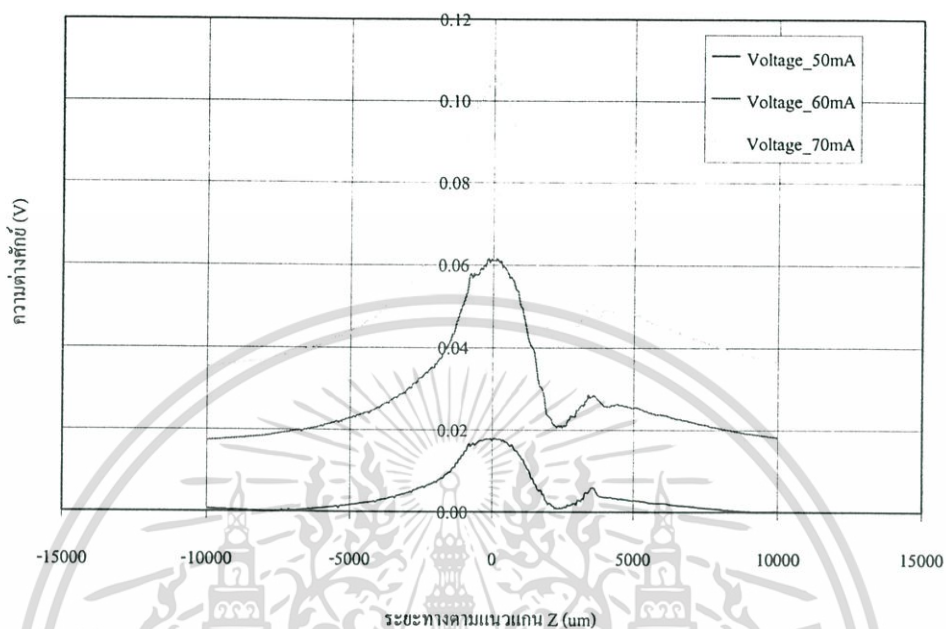
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ทำให้เกิดเลเซอร์กับความต่างศักย์ไฟฟ้าของโฟโตไดโอดภายในเลเซอร์ไดโอด ขนาด 10 mW ที่มีพื้นผิวการสะท้อนภายนอกเป็นทองเหลือง

จากผลการทดลองจะพบว่าเมื่อมีสัญญาณการสะท้อนกลับของแสงจากภายนอก ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของโฟโตไดโอดภายในเลเซอร์ไดโอด ซึ่งเป็นสัญญาณการสะท้อนของแสงจากภายในและภายนอกรวมกันนั้นจะพบว่าเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าที่ให้กับเลเซอร์ไดโอดมากขึ้น หรือเปลี่ยนกำลังของเลเซอร์ ค่าความต่างศักย์ของโฟโตไดโอดจะมีค่าลดลงสอดคล้องกัน



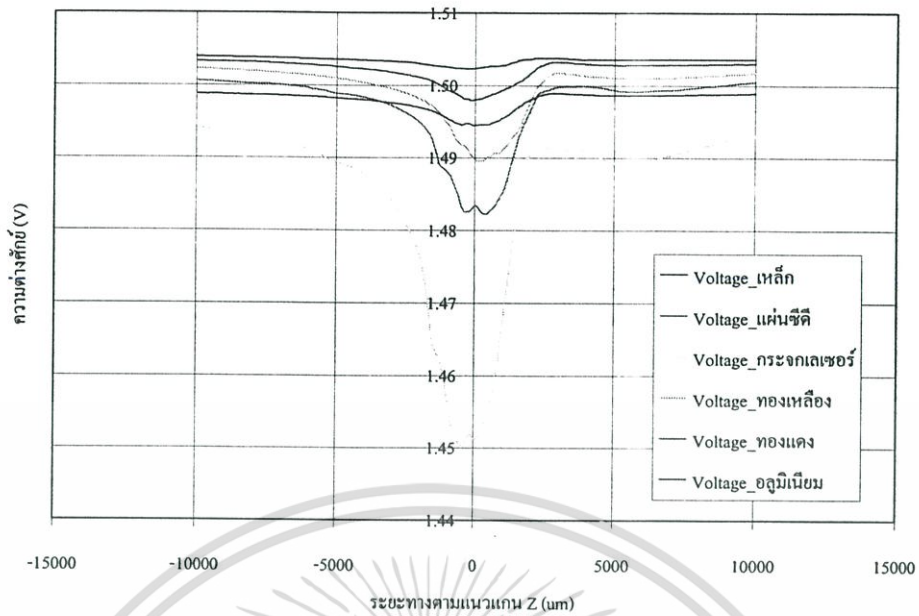
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ทำให้เกิดเลเซอร์กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอด ขนาด 5 mW ที่มีพื้นผิวการสะท้อนภายนอกเป็นทองเหลือง

ซึ่งถ้าพิจารณาเปรียบเทียบปริมาณกระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ทำให้เกิดเลเซอร์กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอด ซึ่งผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.15 และ รูปที่ 4.16

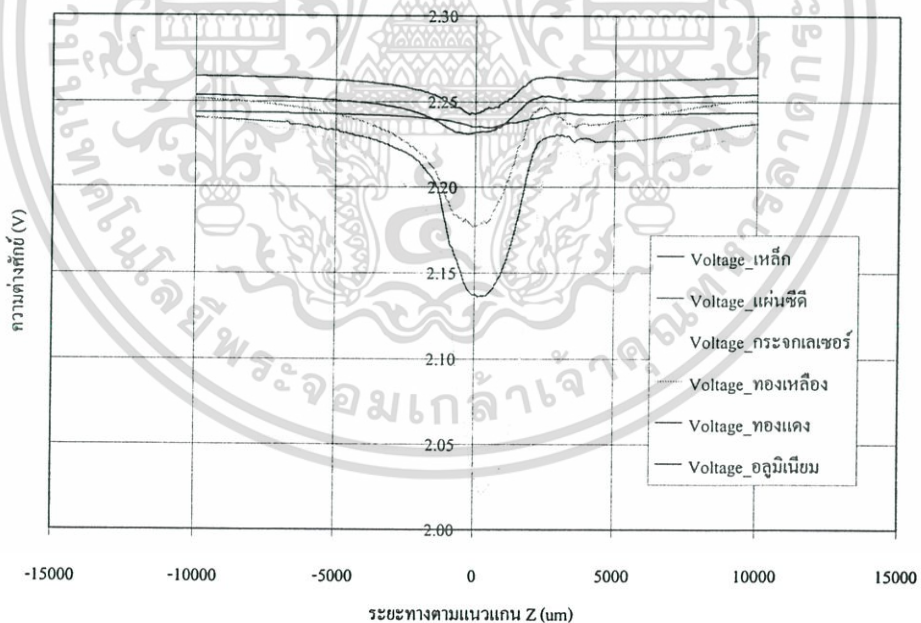


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ทำให้เกิดเลเซอร์กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอด ขนาด 10 mW ที่มีพื้นผิวการสะท้อนภายนอกเป็นทองเหลือง

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้กับเลเซอร์ไดโอดหรือเปลี่ยนกำลังของเลเซอร์ไดโอดจะมีผลทำให้มีสัญญาณการสะท้อนกลับของแสงจากภายนอกมากขึ้น ค่าความต่างศักย์ที่โฟโตไดโอดภายในเลเซอร์ไดโอดจะมีค่าลดลง ดังนั้นปริมาณกระแสอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นที่โฟโตไดโอดภายในเลเซอร์ไดโอดจะมีค่ามากขึ้น ซึ่งเป็นผลทำให้ค่าความต่างศักย์ที่วัดจากตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดมีค่าเพิ่มขึ้น และถ้าเปรียบเทียบสัญญาณการสะท้อนกลับของแสงจากภายนอกของพื้นผิวต่างๆ เพื่อศึกษาความเป็นเชิงเส้นของสัญญาณการสะท้อนว่าในระยะห่างจากเลเซอร์แควิตีเท่าๆ กันนั้นสัญญาณการสะท้อนที่ได้ไม่ว่าจะวัดที่โฟโตไดโอดหรือที่ตัวต้านทานก็น่าที่จะมีความเป็นเชิงเส้นที่สอดคล้องกัน แต่ก็น่าที่จะขึ้นกับลักษณะของพื้นผิวการสะท้อนด้วย ซึ่งผลการทดลองสามารถแสดงดังนี้

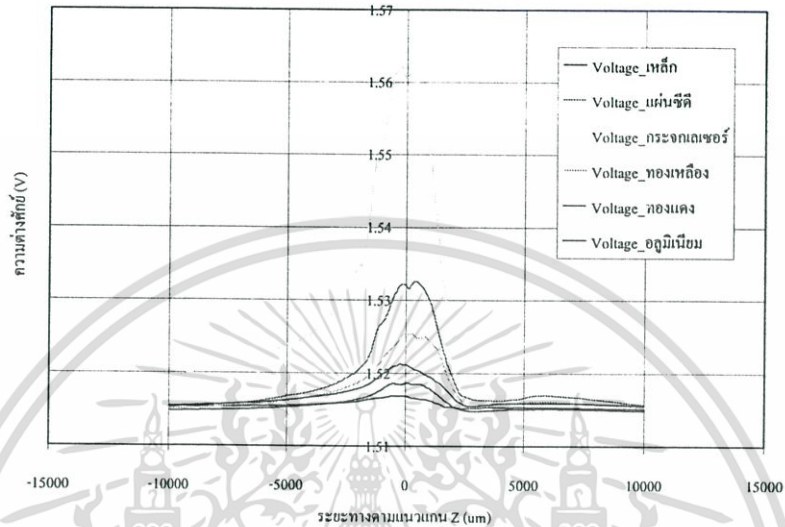


รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบสัญญาณการสะท้อนกลับของแสงจากภายนอกของพื้นผิวต่างๆ กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของโฟโตไดโอดภายในเลเซอร์ไดโอด ขนาด 5 mW ที่กระแสแสงไฟฟ้า 50 mA ที่ทำให้เกิดเลเซอร์

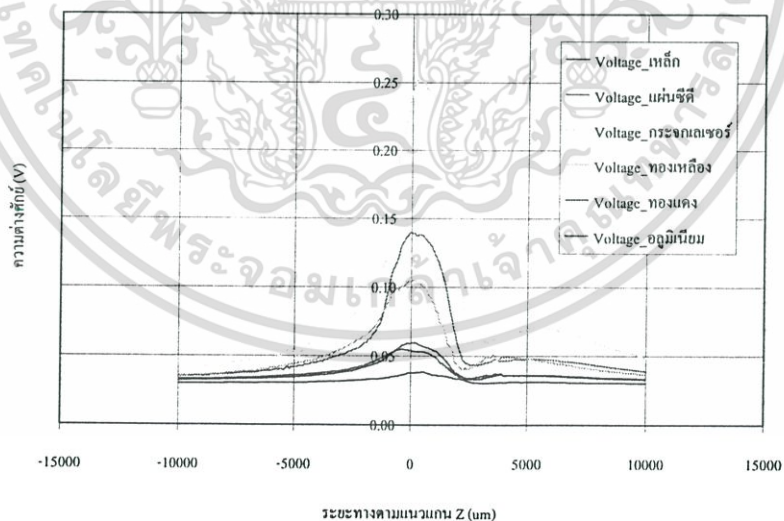


รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบสัญญาณการสะท้อนกลับของแสงจากภายนอกของพื้นผิวต่างๆ กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของโฟโตไดโอดภายในเลเซอร์ไดโอด ขนาด 10 mW ที่กระแสแสงไฟฟ้า 70 mA ที่ทำให้เกิดเลเซอร์

จากผลการทดลองจะพบว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของโฟโตไดโอดภายในเลเซอร์ไดโอดจะมีค่าน้อยเมื่อมีสัญญาณการสะท้อนกลับมาก ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของพื้นผิวการสะท้อนซึ่งมีผลต่อสัญญาณการสะท้อนกลับของแสงจากภายนอก และถ้าพิจารณาเปรียบเทียบกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอด ซึ่งผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.19 และ รูปที่ 4.20



รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบสัญญาณการสะท้อนกลับของแสงจากภายนอกของพื้นผิวต่างๆ กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอด ขนาด 5 mW ที่กระแสไฟฟ้า 50 mA ที่ทำให้เกิดเลเซอร์

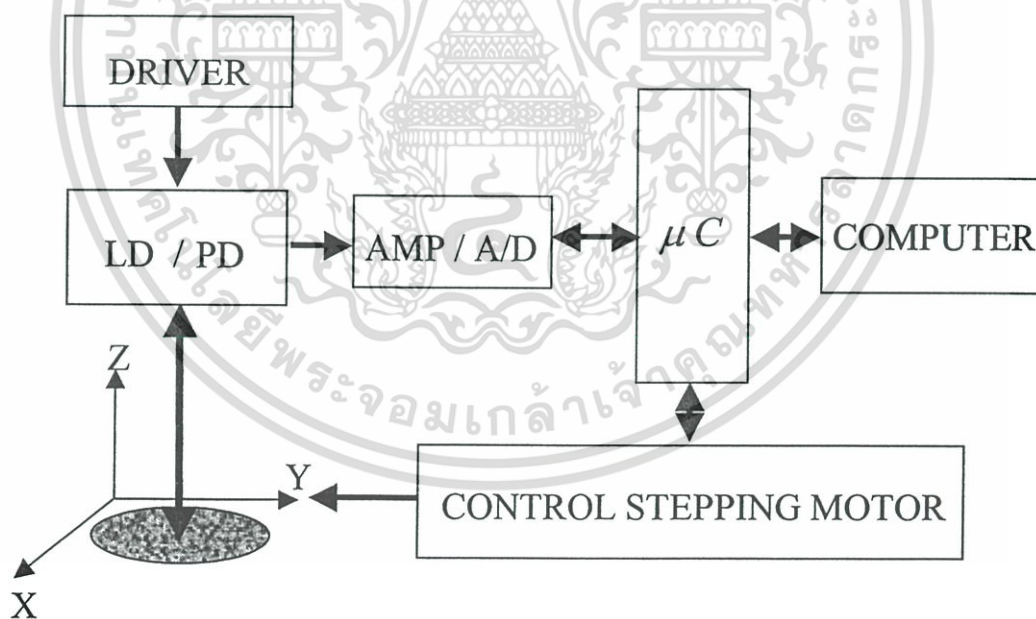


รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบสัญญาณการสะท้อนกลับของแสงจากภายนอกของพื้นผิวต่างๆ กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอด ขนาด 10 mW ที่กระแสไฟฟ้า 70 mA ที่ทำให้เกิดเลเซอร์

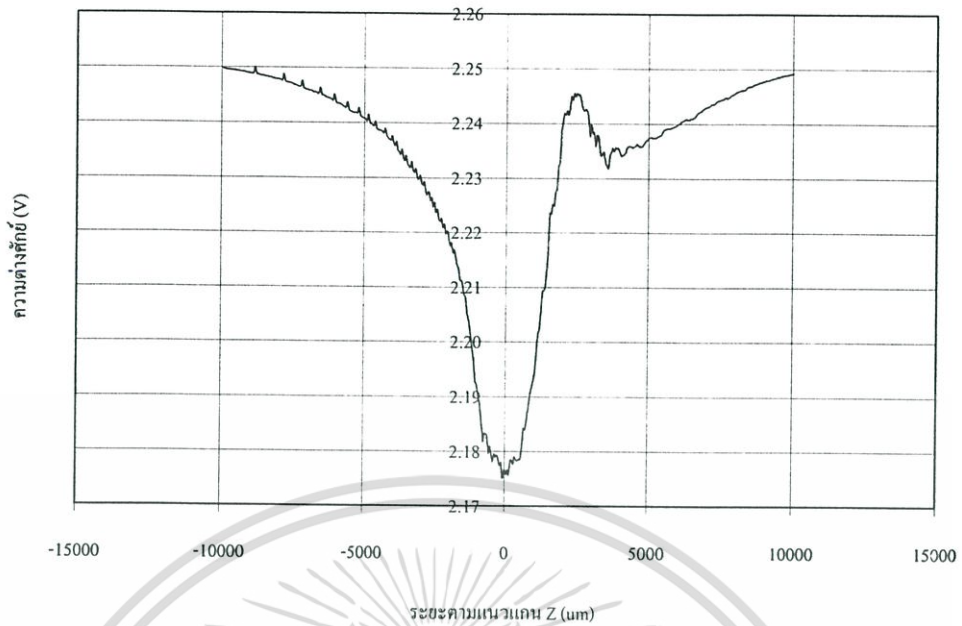
จากผลการทดลองพบว่าลักษณะของพื้นผิววัตถุจะมีผลต่อสัญญาณการสะท้อนกลับของแสง ซึ่งถ้าสัญญาณการสะท้อนกลับของแสงจากภายนอกมาก ค่าความต่างศักย์ที่โฟโตไดโอดภายในเลเซอร์ไดโอดจะมีค่าลดลง ดังนั้นปริมาณกระแสอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นที่โฟโตไดโอดภายในเลเซอร์ไดโอดจะมีค่ามาก ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดก็จะมีค่ามากด้วย

4.3 การศึกษาความเป็นเชิงเส้นของสัญญาณการสะท้อนของแสง

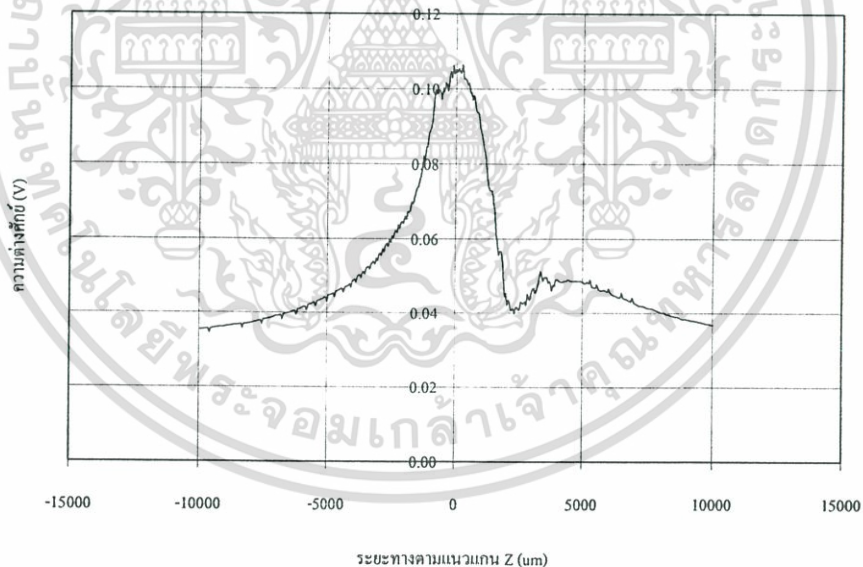
การศึกษาวิจัยนี้เป็นการพิจารณาถึงความเป็นเชิงเส้นของสัญญาณการสะท้อนของแสง จากพื้นผิววัตถุที่มีลักษณะต่างๆ เพื่อนำไปสู่การสร้างภาพพื้นผิววัตถุ การทดลองจะทำการควบคุมปริมาณความเข้มของแสงเลเซอร์ โดยจะควบคุมกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเลเซอร์ไดโอดที่จุดทำงานของเลเซอร์ค่าต่างๆ และวัดสัญญาณการสะท้อนโดยเปลี่ยนแปลงระยะห่างตามแนวแกน Z ระหว่างเลเซอร์ไดโอดซึ่งภายในมีโฟโตไดโอดกับพื้นผิววัตถุ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงระยะห่างตามแนวแกน Z นี้เป็นการเปลี่ยนแปลงความยาวเลวติภายนอก โดยระยะตามแนวแกน Z นี้จะถูกควบคุมโดยชุดควบคุมมอเตอร์ในแนวแกน Z c) ควบคุมพิวเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ซึ่งผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.21 แผนภาพแสดงการวัดสัญญาณการสะท้อนโดยเปลี่ยนแปลงระยะห่างตามแนวแกน Z ระหว่างเลเซอร์ไดโอดซึ่งภายในมีโฟโตไดโอด กับพื้นผิววัตถุ



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่โฟโตไดโอด (PD) กับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 10 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 70 mA ที่พื้นผิวการสะท้อนของทองเหลือง



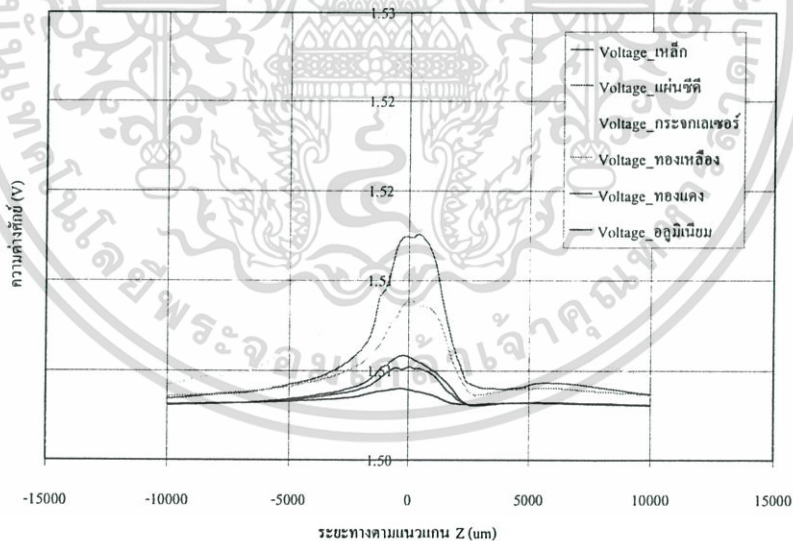
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตัวต้านทาน R กับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 10 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 70 mA ที่พื้นผิวการสะท้อนของทองเหลือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

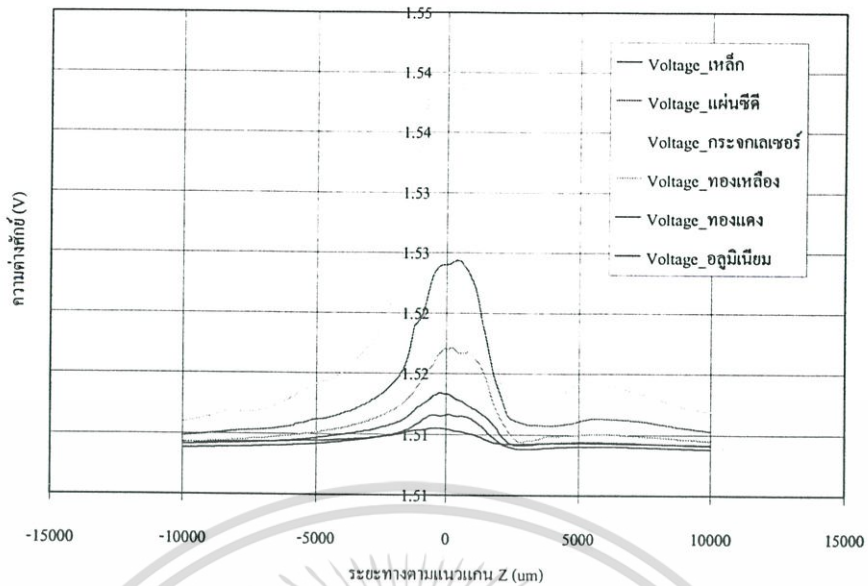
จากผลการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ระยะการสะท้อนตามแนวแกน Z ของพื้นผิววัตถุที่อยู่ในสนามไกลเลเซอร์ไดโอดซึ่งสัญญาณที่ได้ไม่ว่าจะวัดที่โฟโตไดโอดหรือที่ตัวต้านทาน R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอด ค่าสัญญาณที่ได้จะมีค่าเป็นเชิงเส้นน้อยกว่าส่วนที่ระยะการสะท้อนตามแนวแกน Z ของพื้นผิววัตถุที่อยู่ในสนามไกลเลเซอร์ไดโอด ซึ่งที่ระยะการสะท้อนของสนามไกลเลเซอร์ไดโอดนี้การย้อนกลับทางแสงจะสูงซึ่งจะทำให้เกิดการแทรกสอดของแสงแบบเคลฟมิกซึ่งภายในเลเซอร์แควิตีแบบฟาบรี-เพอร์โร ซึ่งสัญญาณที่ได้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะลูกคลื่น และค่าสัญญาณที่ระยะการสะท้อนไกลเลเซอร์ไดโอดนี้มีความเป็นเชิงเส้น ในช่วงความเป็นเชิงเส้นนี้จะนำมาใช้ในการสร้างภาพพื้นผิวของวัตถุต่อไป ค่าสัญญาณการสะท้อนนี้มีค่าขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น กำลังของเลเซอร์ไดโอดซึ่งรวมถึงความเข้มของแสงเลเซอร์ ลักษณะพื้นผิววัตถุในที่นี่จะศึกษาวัตถุที่มีเนื้อเดียวกัน ซึ่งจะแบ่งการพิจารณาออกเป็น ส่วนต่างๆ ดังนี้

4.3.1 ศึกษาค่าสัญญาณการสะท้อนที่ลักษณะพื้นผิวต่างๆ ขณะที่ความเข้มของแสงเลเซอร์คงที่

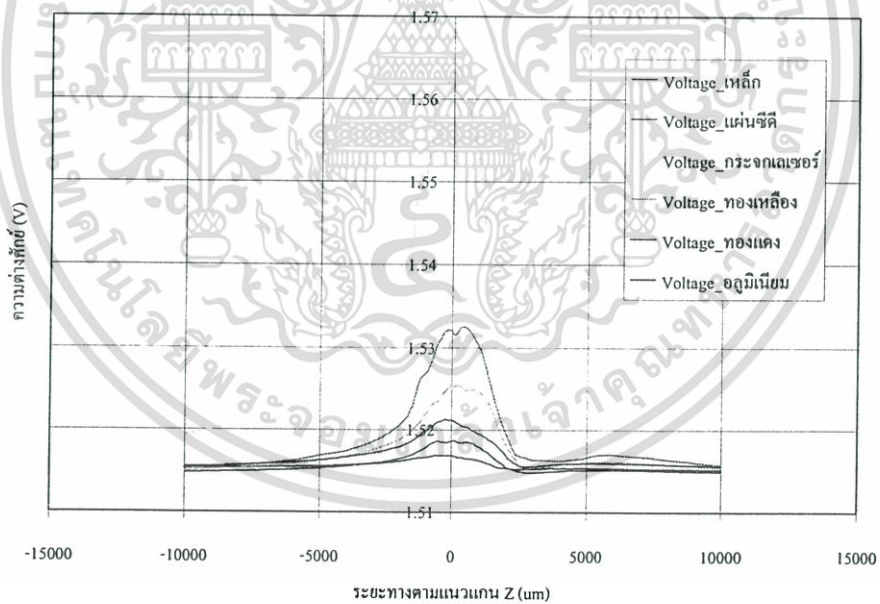
การศึกษาวิจัยนี้จะศึกษาเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิววัตถุต่างๆ ที่มีผลทำให้สัญญาณการสะท้อนเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอด โดยที่ความเข้มของแสงเลเซอร์คงที่ต่างๆ ซึ่งผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของลักษณะพื้นผิววัตถุต่างๆ ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 5 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 30 mA



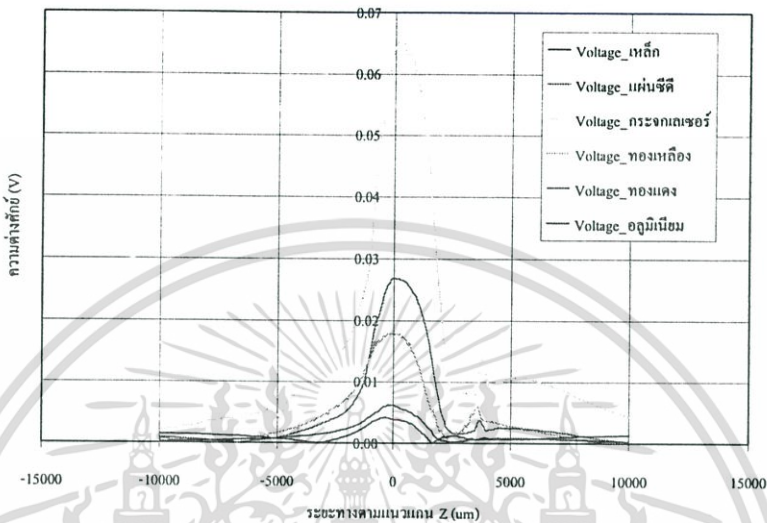
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของลักษณะพื้นผิววัตถุต่างๆ ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 5 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 40 mA



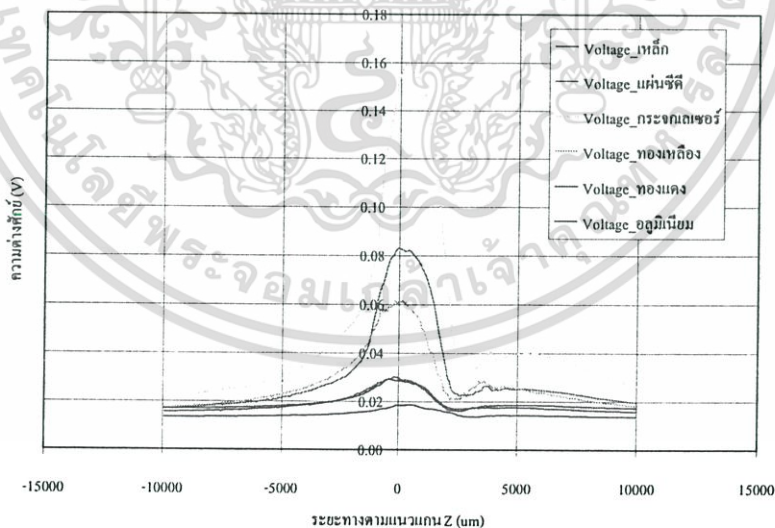
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของลักษณะพื้นผิววัตถุต่างๆ ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 5 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

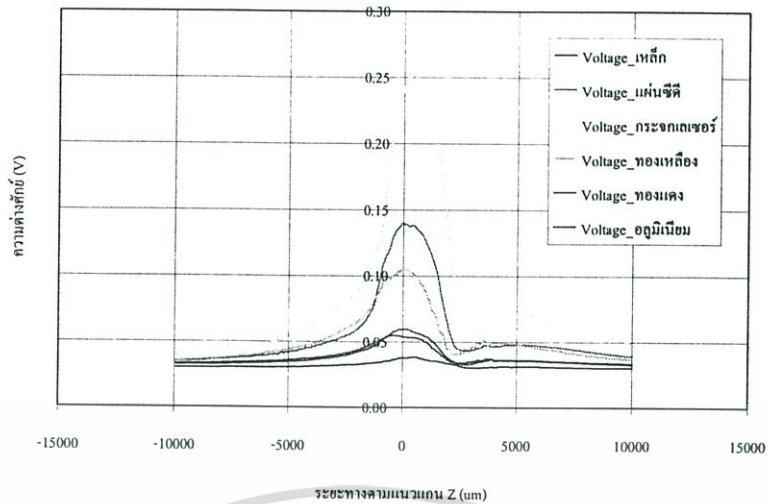
จากผลการทดลองพบว่า ลักษณะพื้นผิวที่มีการสะท้อนได้ดีนั้นสามารถที่จะดูได้จากค่าความชันของกราฟของสนามไกล ซึ่งสัญญาณการสะท้อนที่พื้นผิววัตถุในที่นี้พื้นผิววัตถุที่มีการสะท้อนได้ดีนั้นได้แก่ กระจกเลเซอร์ซึ่งจะมีความเรียบและเป็นมันเงา และพื้นผิววัตถุที่มีการสะท้อนไม่ดีนั้นได้แก่ เหล็ก และจากการศึกษาเพิ่มความเข้มของแสงเลเซอร์หรือกำลังของเลเซอร์เพิ่มขึ้น ผลของสัญญาณการสะท้อนสามารถแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของลักษณะพื้นผิววัตถุต่างๆ ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 10 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 mA

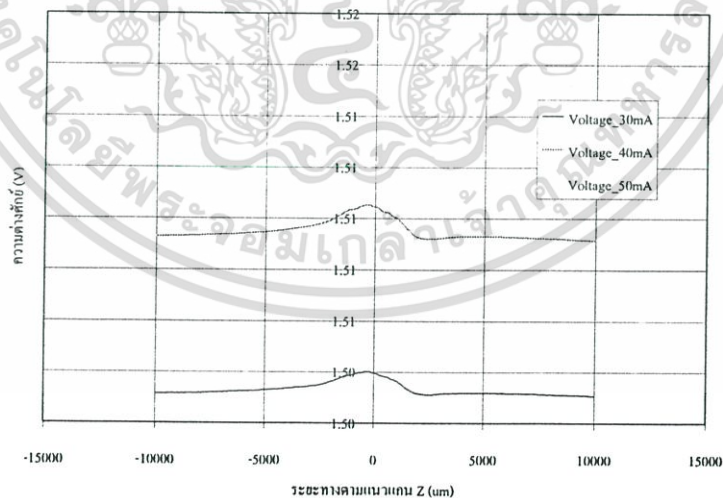


รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของลักษณะพื้นผิววัตถุต่างๆ ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 10 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 60 mA

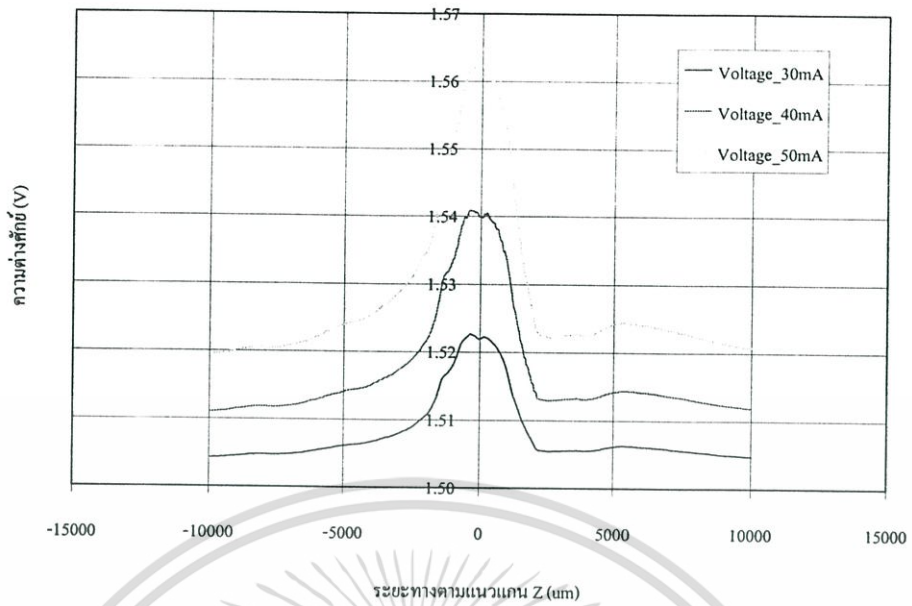


รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของลักษณะพื้นผิววัตถุต่างๆ ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 10 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 70 mA

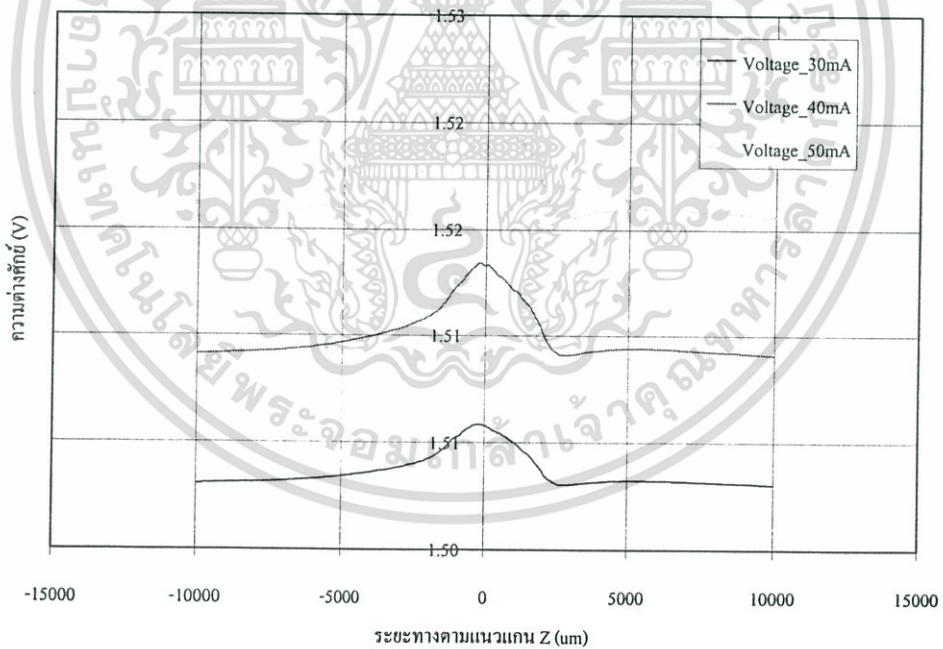
จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มของแสงเลเซอร์หรือกำลังของเลเซอร์เพิ่มขึ้น ค่าสัญญาณการสะท้อนที่พื้นผิววัตถุจะมีค่าสูงขึ้น ปริมาณกระแสอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นที่โฟโตไดโอดก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย และจากการศึกษาพบว่าที่ลักษณะพื้นผิวการสะท้อนเดียวกันเมื่อเพิ่มความเข้มของแสงเลเซอร์เพิ่มขึ้น ค่าสัญญาณการสะท้อนจะมีค่าสูงขึ้น ซึ่งผลของสัญญาณการสะท้อนสามารถแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างความเข้มของแสงเลเซอร์ที่เพิ่มขึ้นกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 5 mW ของพื้นผิวเหล็ก

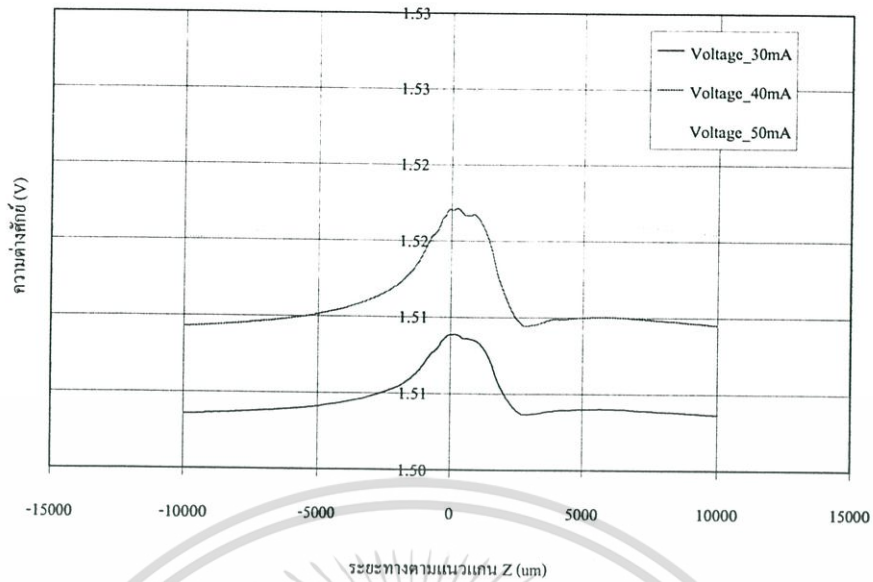


รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างความเข้มของแสงเลเซอร์ที่เพิ่มขึ้นกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 5 mW ของพื้นผิวกระจกเลเซอร์

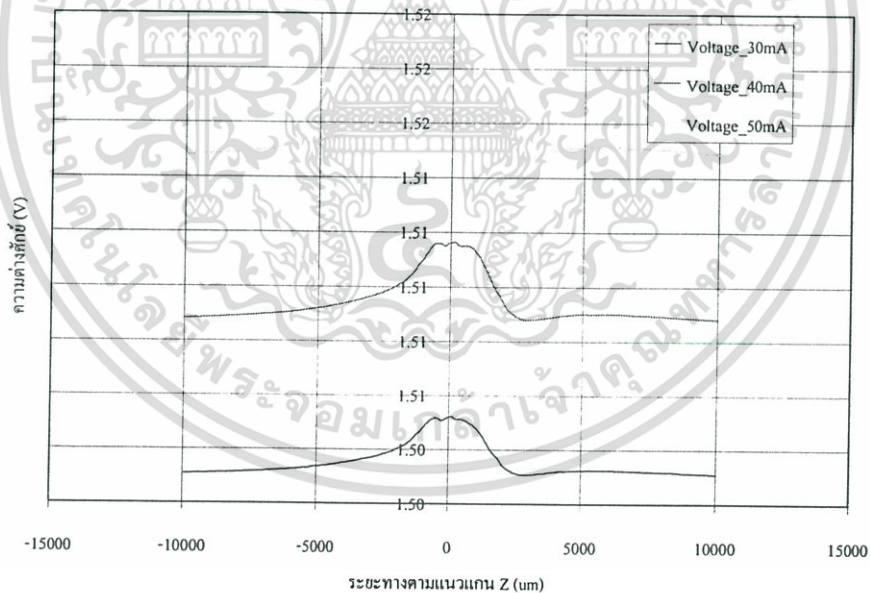


รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างความเข้มของแสงเลเซอร์ที่เพิ่มขึ้นกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 5 mW ของพื้นผิวทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

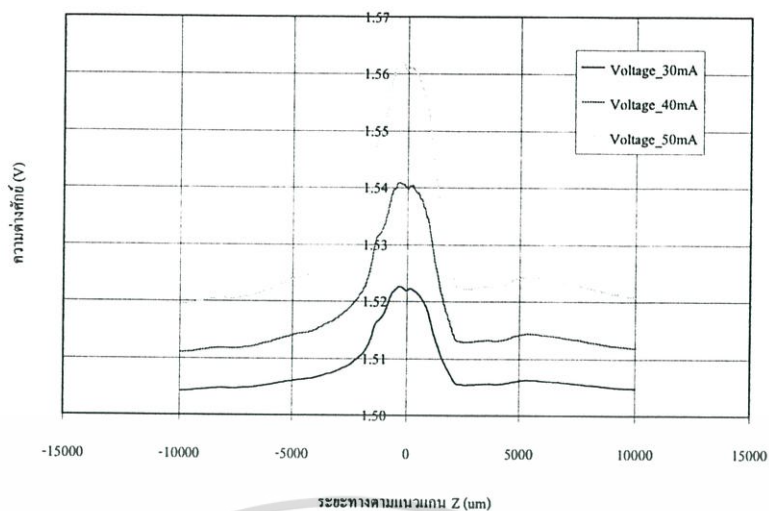


รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างความเข้มของแสงเลเซอร์ที่เพิ่มขึ้นกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 5 mW ของพื้นผิวทองเหลือง



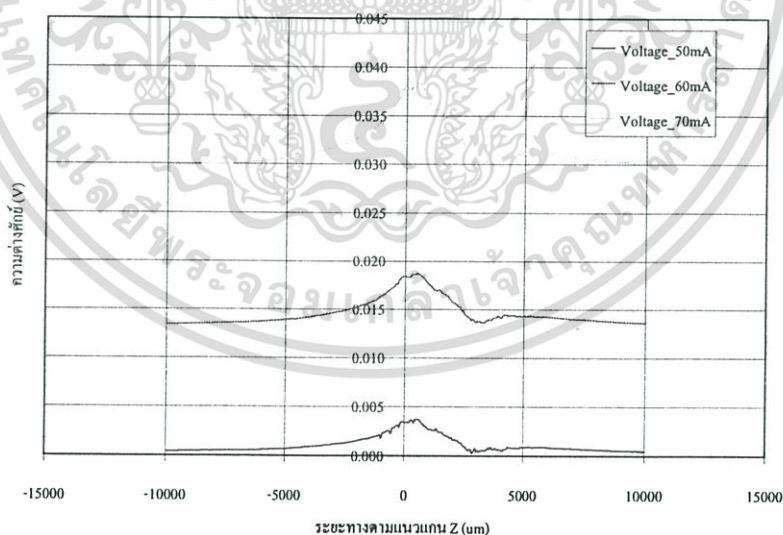
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างความเข้มของแสงเลเซอร์ที่เพิ่มขึ้นกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 5 mW ของพื้นผิวอลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

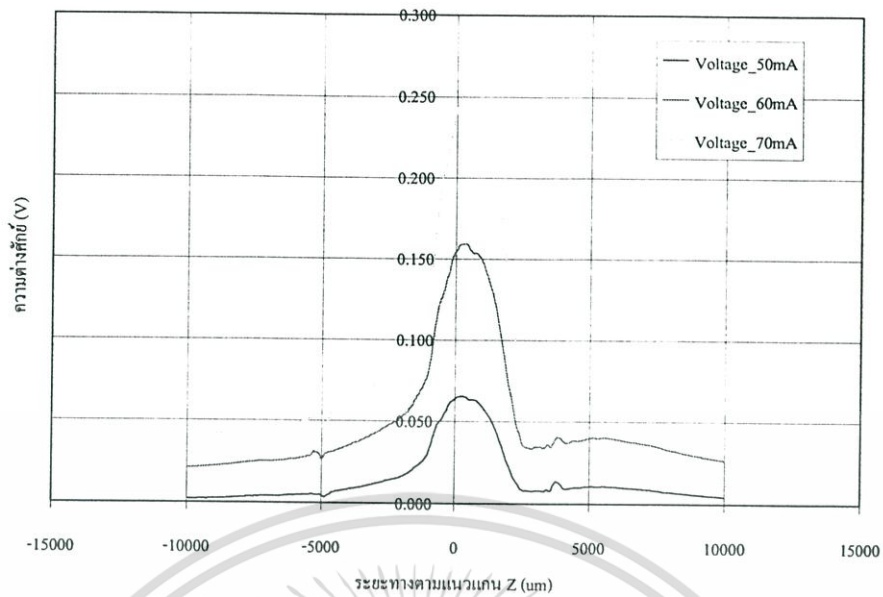


รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างความเข้มของแสงเลเซอร์ที่เพิ่มขึ้นกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดที่ระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 5 mW ของพื้นผิวแผ่นซีดี

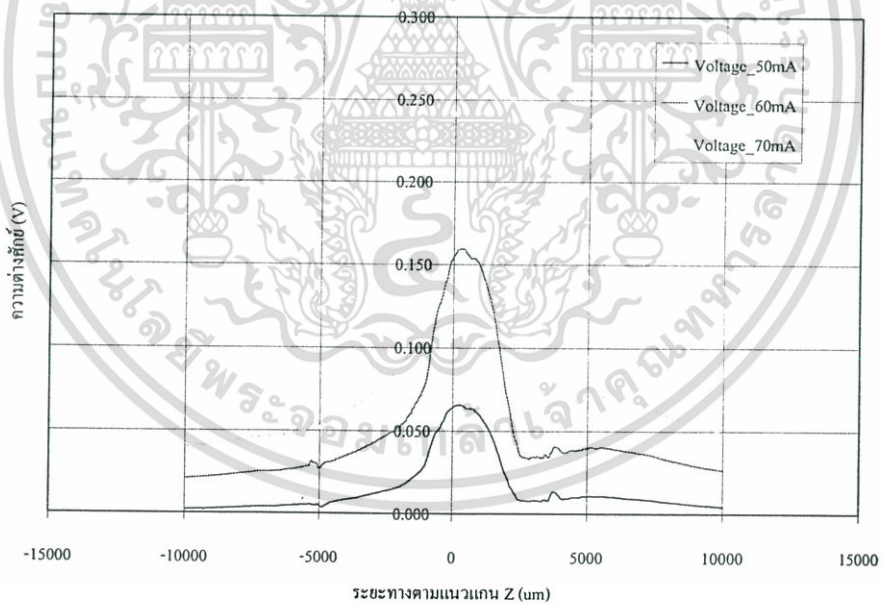
จากผลการทดลองพบว่าลักษณะพื้นผิววัตถุต่างๆ ความเข้มของแสงเลเซอร์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณกระแสอิเล็กตรอนมีค่ามากขึ้น ซึ่งจะมีผลทำค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดมีค่าเพิ่มขึ้น และถ้าเพิ่มความเข้มของแสงเลเซอร์หรือกำลังของเลเซอร์เพิ่มขึ้น ผลของสัญญาณการสะท้อนสามารถแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างความเข้มของแสงเลเซอร์ที่เพิ่มขึ้นกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดที่ระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 10 mW ของพื้นผิวเหล็ก

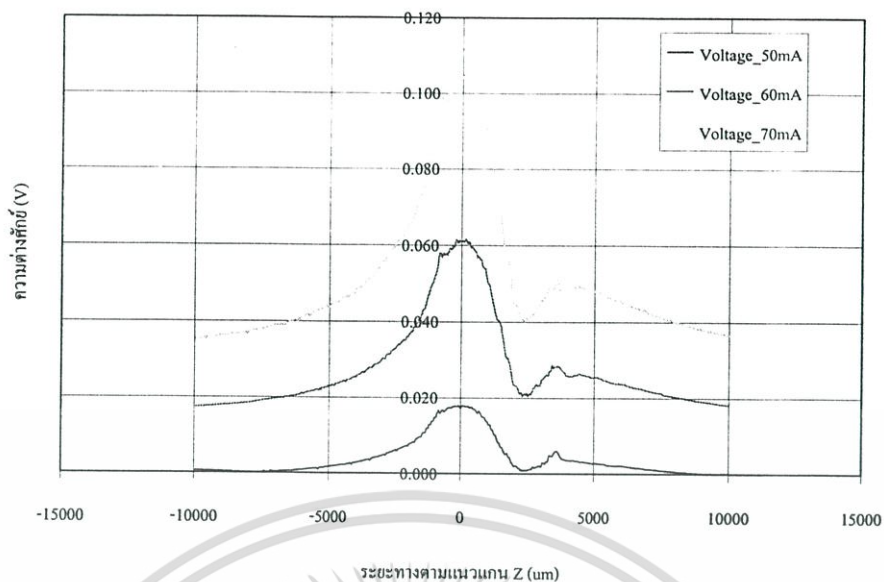


รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างความเข้มของแสงเลเซอร์ที่เพิ่มขึ้นกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 10 mW ของพื้นผิวกระจกเลเซอร์

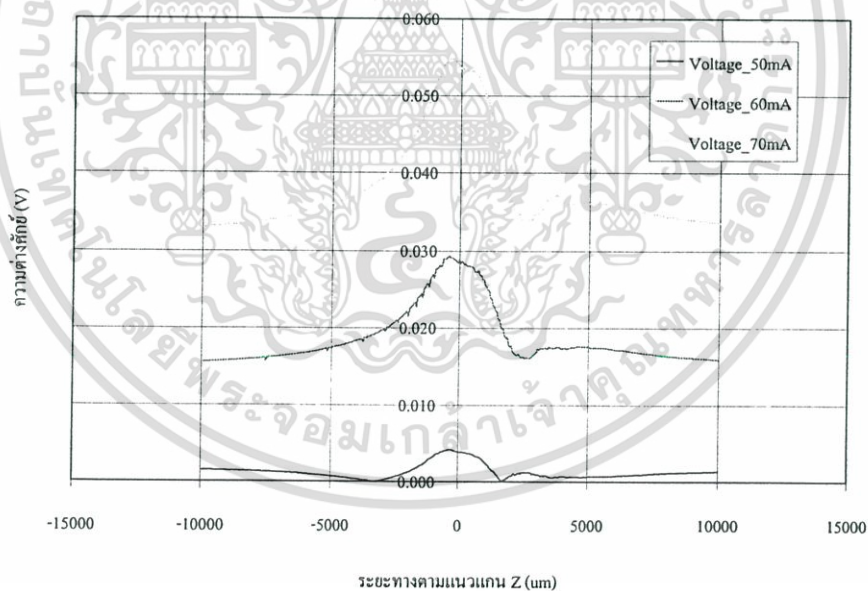


รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างความเข้มของแสงเลเซอร์ที่เพิ่มขึ้นกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 10 mW ของพื้นผิวทองแดง

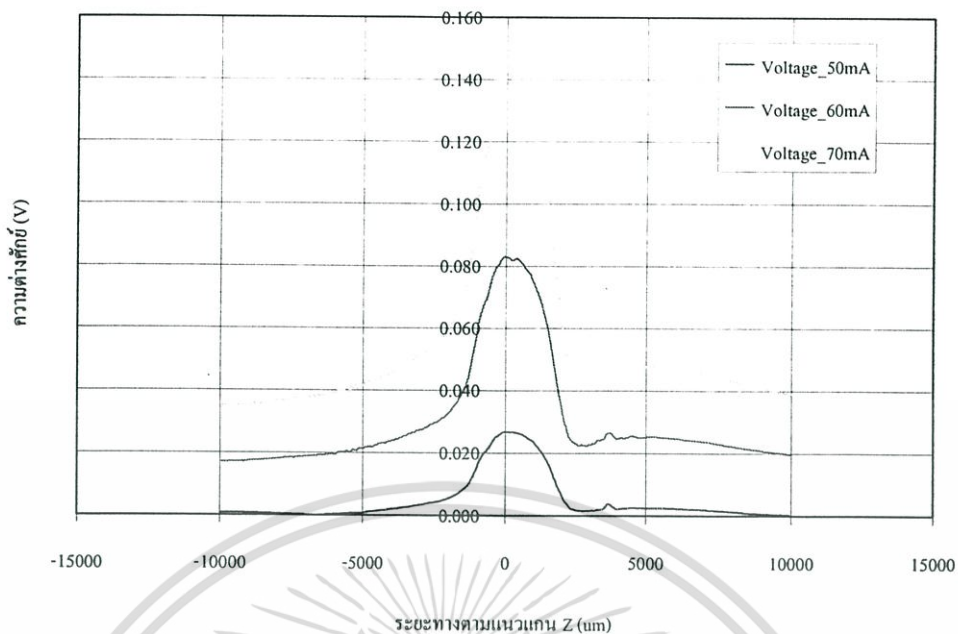
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างความเข้มของแสงเลเซอร์ที่เพิ่มขึ้นกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 10 mW ของพื้นผิวทองเหลือง



รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างความเข้มของแสงเลเซอร์ที่เพิ่มขึ้นกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 10 mW ของพื้นผิวอลูมิเนียม

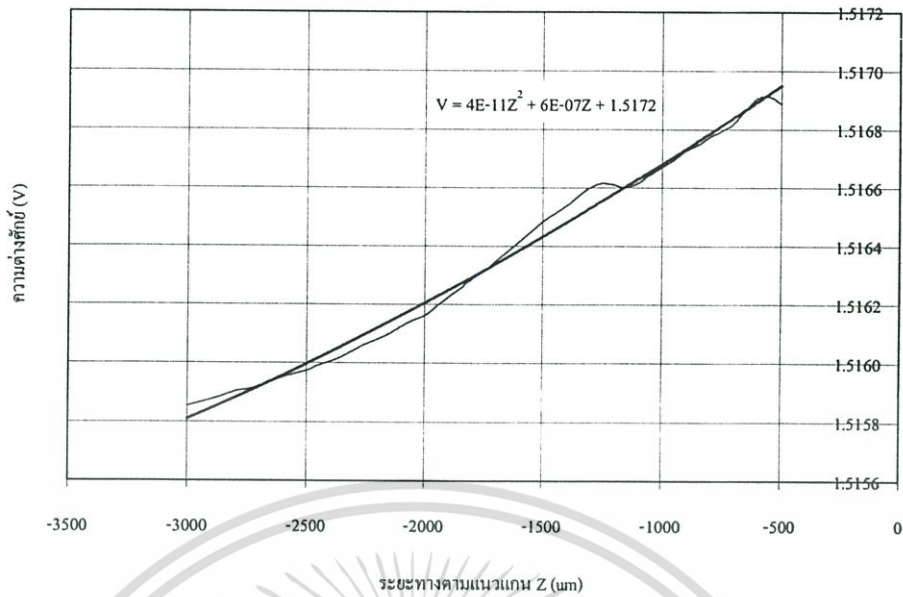


รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างความเข้มของแสงเลเซอร์ที่เพิ่มขึ้นกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 10 mW ของพื้นผิวแผ่นซีดี

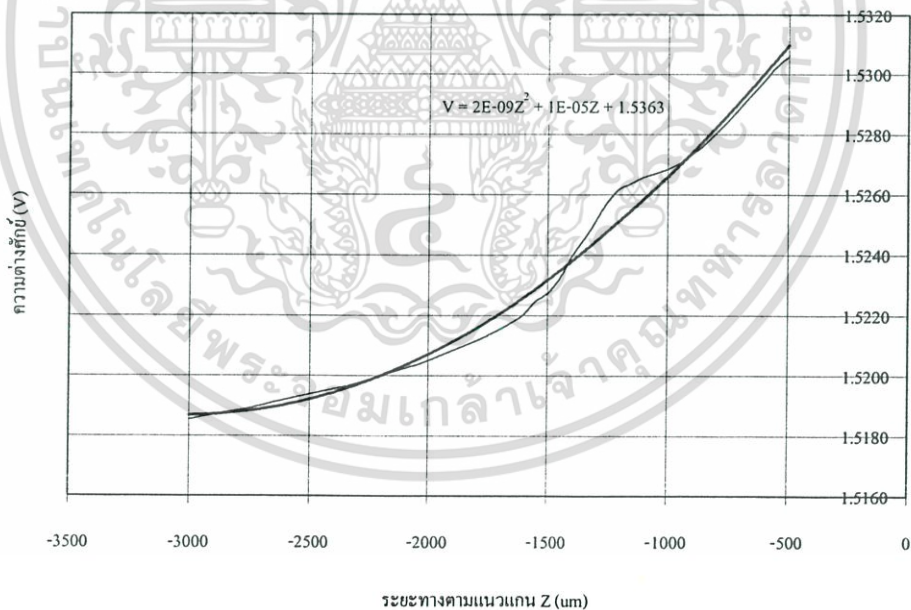
จากผลการทดลองพบว่าลักษณะพื้นผิววัตถุต่างๆ เมื่อเพิ่มความเข้มของแสงเลเซอร์หรือกำลังของเลเซอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณกระแสอิเล็กทรอนิกส์มีค่ามากขึ้น ซึ่งจะมีผลทำค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน จากผลการทดลองที่ผ่านมาจะสังเกตเห็นว่าความเป็นเชิงเส้นของสัญญาณการสะท้อนที่ระยะห่างจากเลเซอร์แควิตีเท่าๆ กัน สัญญาณการสะท้อนที่ได้ไม่ว่าจะวัดที่โฟโตไดโอดหรือที่ตัวต้านทานก็มีความเป็นเชิงเส้นอยู่ในช่วงสนามไกล ที่สามารถนำสัญญาณข้อมูลมาสร้างภาพพื้นผิววัตถุได้

4.3.2 การศึกษาความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามใกล้และสนามไกลของลักษณะพื้นผิวต่างๆ ขณะที่ความเข้มของแสงเลเซอร์คงที่

การศึกษาวิจัยเพื่อพิจารณาความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามใกล้ ของลักษณะพื้นผิวต่างๆ ขณะที่ความเข้มของแสงเลเซอร์คงที่ว่ามีความเป็นเชิงเส้นน้อยกว่าความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามไกล เพื่อเลือกช่วงความเป็นเชิงเส้น เพื่อนำไปสู่การสร้างภาพพื้นผิวต่อไป ซึ่งผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังนี้

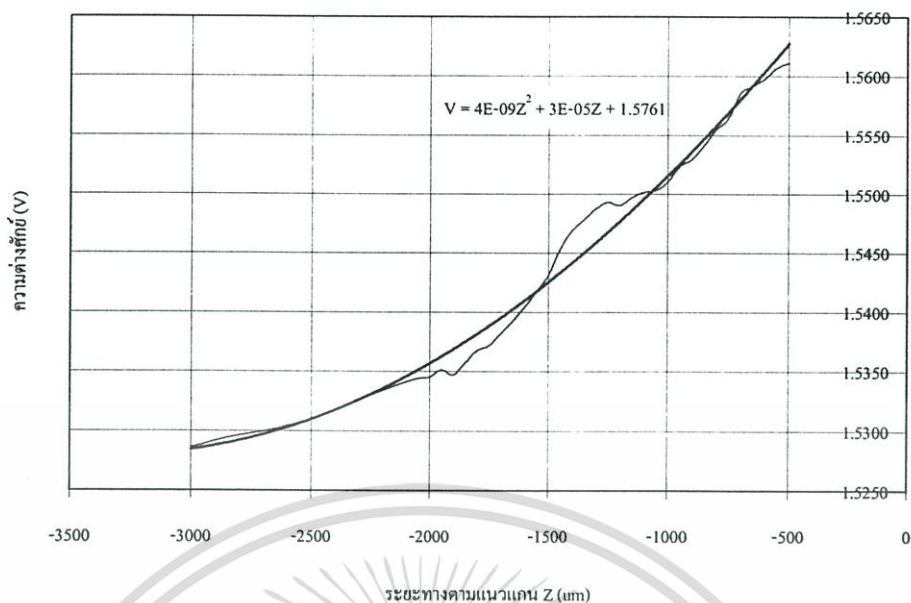


รูปที่ 4.42 ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามใกล้ ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 5 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 mA ของลักษณะพื้นผิวเหล็ก

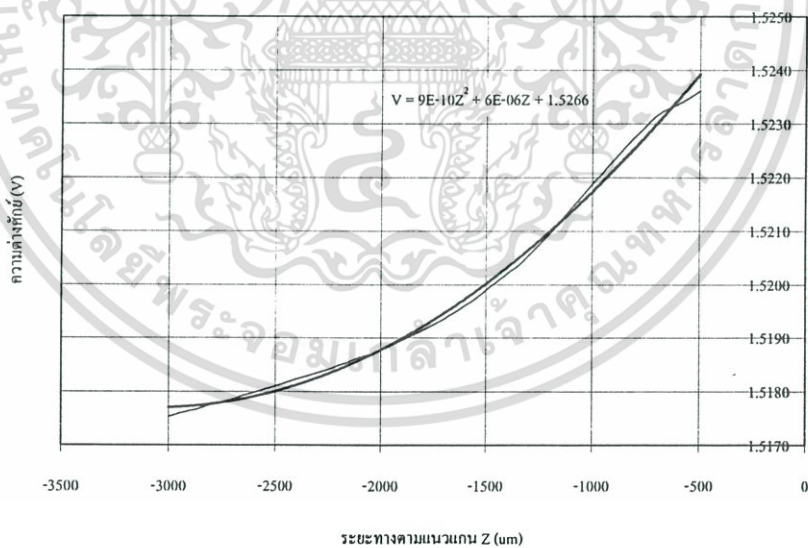


รูปที่ 4.43 ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามใกล้ ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 5 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 mA ของลักษณะพื้นผิวแผ่นซีดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

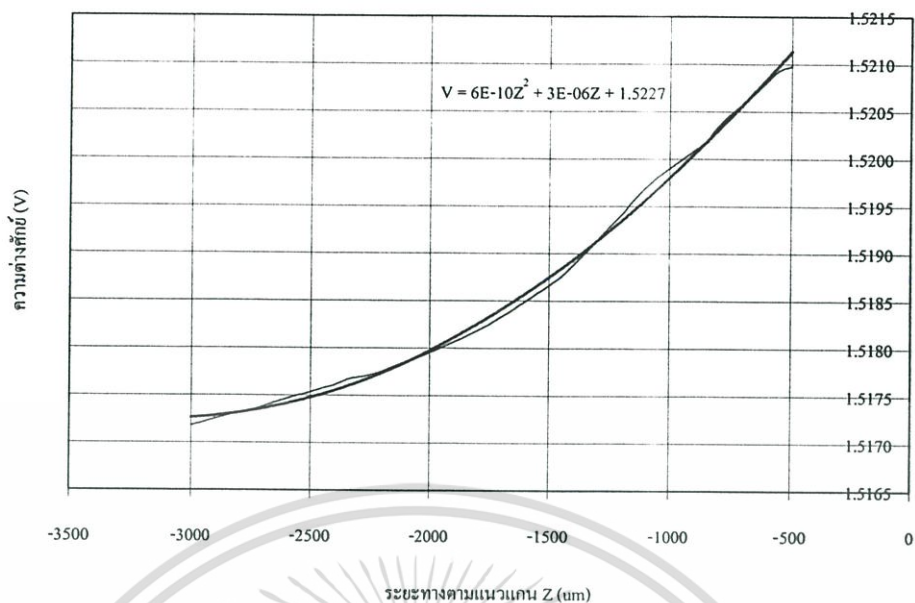


รูปที่ 4.44 ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามใกล้ ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 5 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 mA ของลักษณะพื้นผิวกระจกเลเซอร์

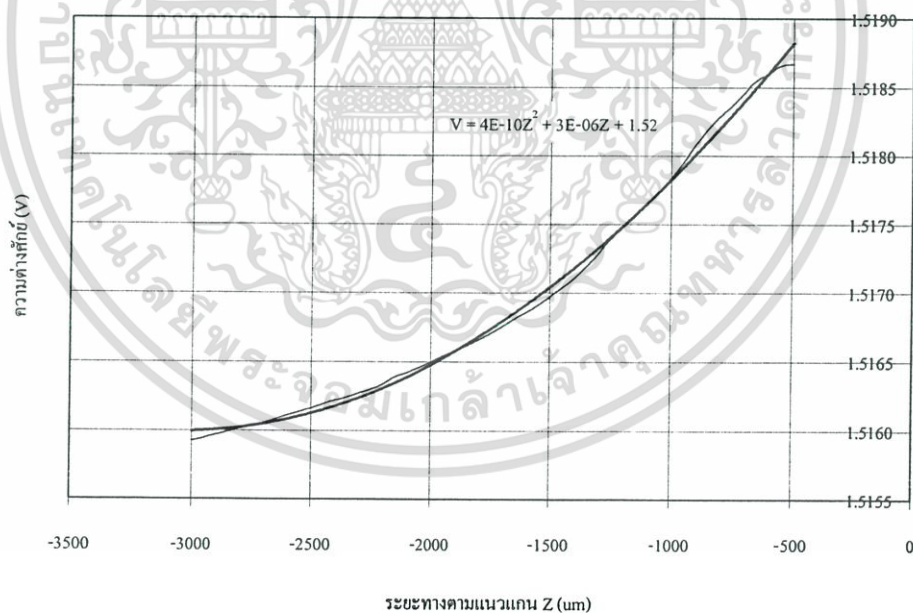


รูปที่ 4.45 ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามใกล้ ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 5 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 mA ของลักษณะพื้นผิวทองเหลือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



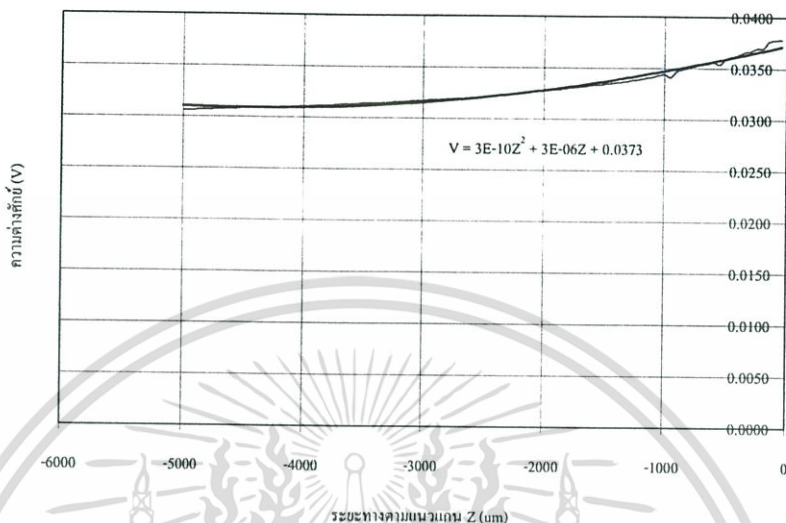
รูปที่ 4.46 ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามใกล้ ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 5 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 mA ของลักษณะพื้นผิวทองแดง



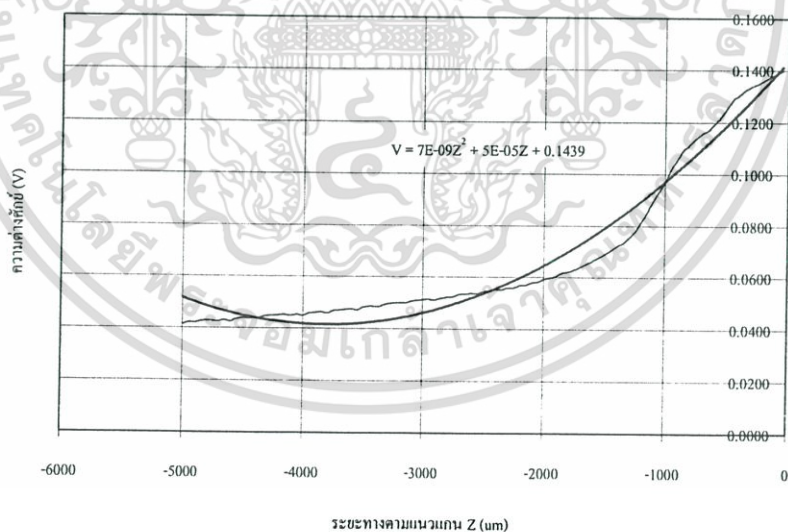
รูปที่ 4.47 ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามใกล้ ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 5 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 mA ของลักษณะพื้นผิวอลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

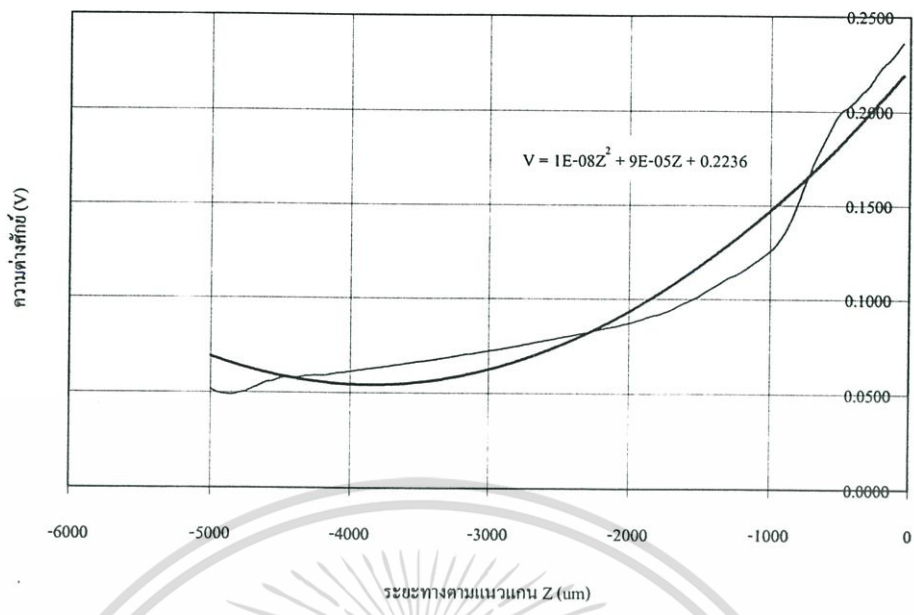
จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามใกล้ ของลักษณะพื้นผิวต่างๆ ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z จะไม่มีความเป็นเชิงเส้นที่จะสามารถนำมาสร้างภาพพื้นผิววัตถุได้ และเมื่อเพิ่มความเข้มหรือกำลังของเลเซอร์ให้เพิ่มมากขึ้น ผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังนี้



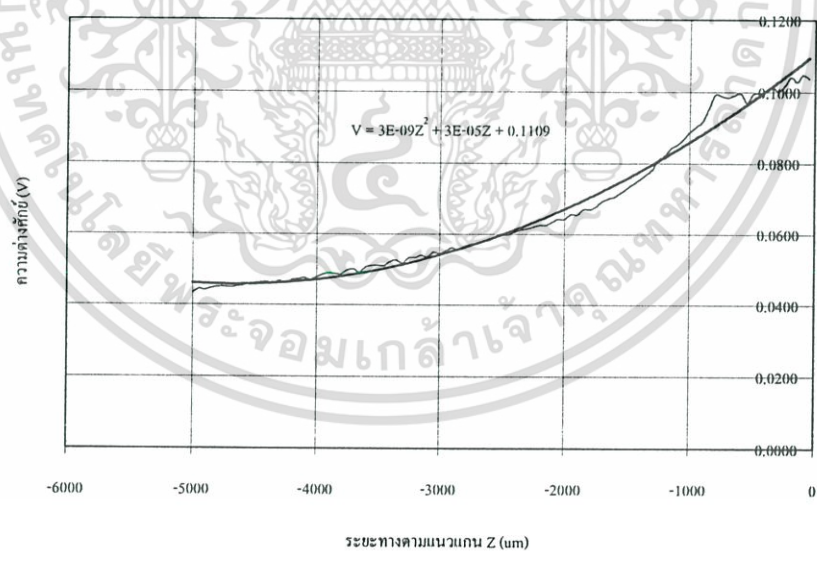
รูปที่ 4.48 ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามใกล้ ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ ไดโอด ขนาด 10 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 70 mA ของลักษณะพื้นผิวเหล็ก



รูปที่ 4.49 ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามใกล้ ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ ไดโอด ขนาด 10 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 70 mA ของลักษณะพื้นผิวแผ่นซีดี

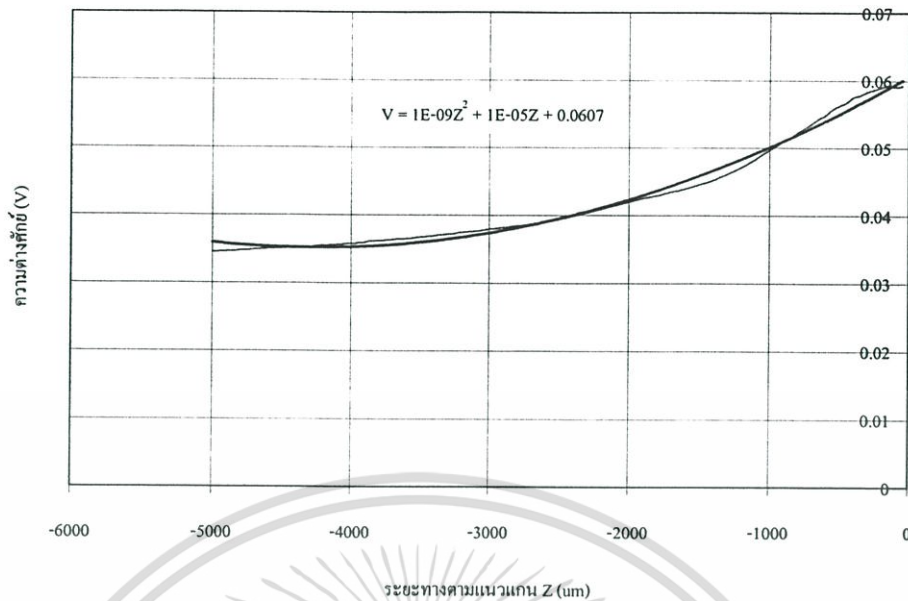


รูปที่ 4.50 ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามใกล้ ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 10 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 70 mA ของลักษณะพื้นผิวกระจกเลเซอร์

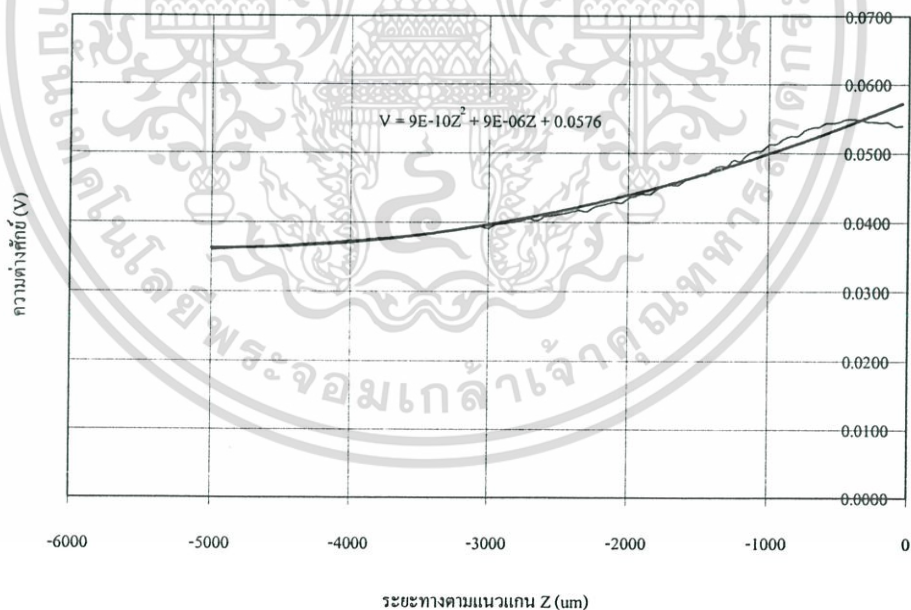


รูปที่ 4.51 ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามใกล้ ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 10 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 70 mA ของลักษณะพื้นผิวทองเหลือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

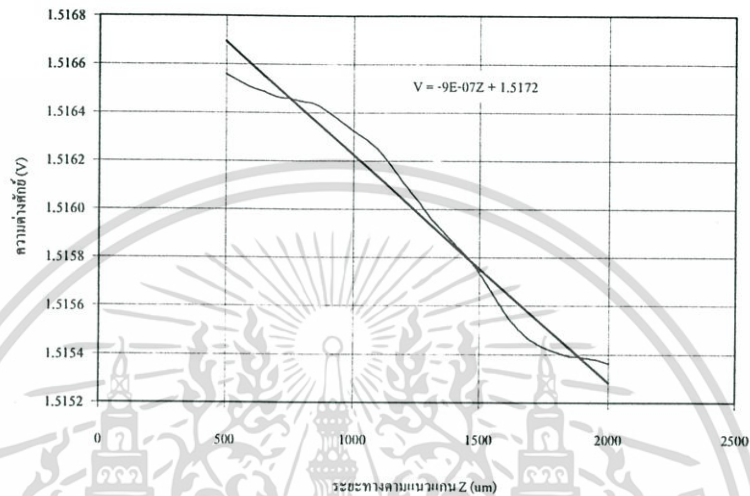


รูปที่ 4.52 ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามใกล้ ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 10 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 70 mA ของลักษณะพื้นผิวทองแดง

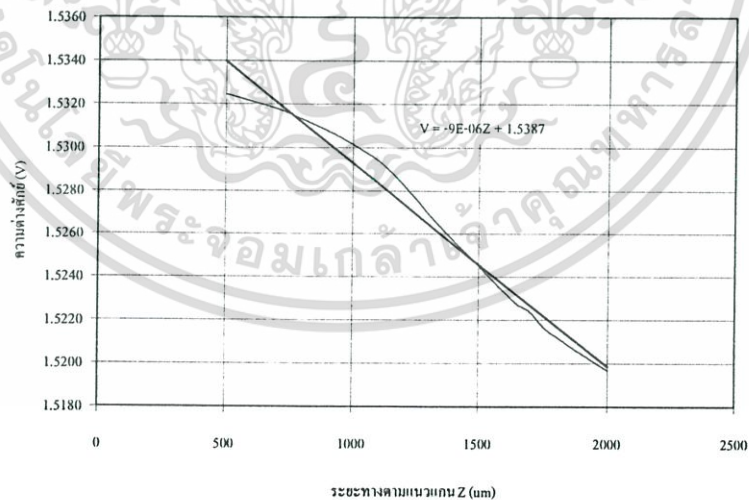


รูปที่ 4.53 ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามใกล้ ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 10 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 70 mA ของลักษณะพื้นผิวอลูมิเนียม

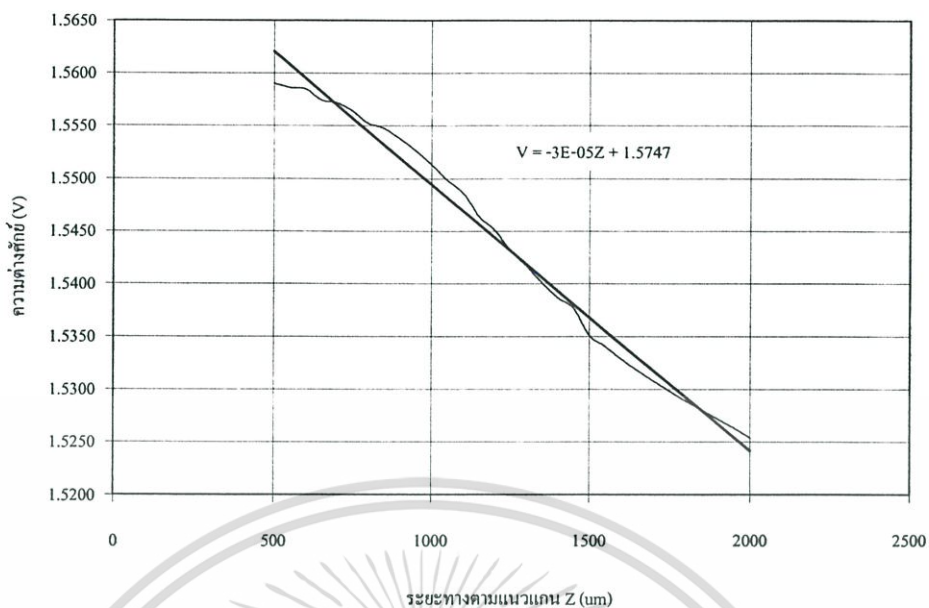
จากผลการทดลองการเพิ่มความเข้มหรือกำลังของเลเซอร์ให้เพิ่มมากขึ้น จะเห็นได้ว่าค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามไกล ของลักษณะพื้นผิวต่างๆ ที่วัดได้จาก R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ก็จะไม่เป็นเชิงเส้นมากขึ้นตามดั่งนั้นข้อมูลที่ได้จะไม่สามารถนำมาสร้างภาพพื้นผิววัตถุได้ และถ้าพิจารณาความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามไกล ของลักษณะพื้นผิวต่างๆ ขณะที่ความเข้มของแสงเลเซอร์คงที่ ผลการทดลองแสดงได้ดังนี้



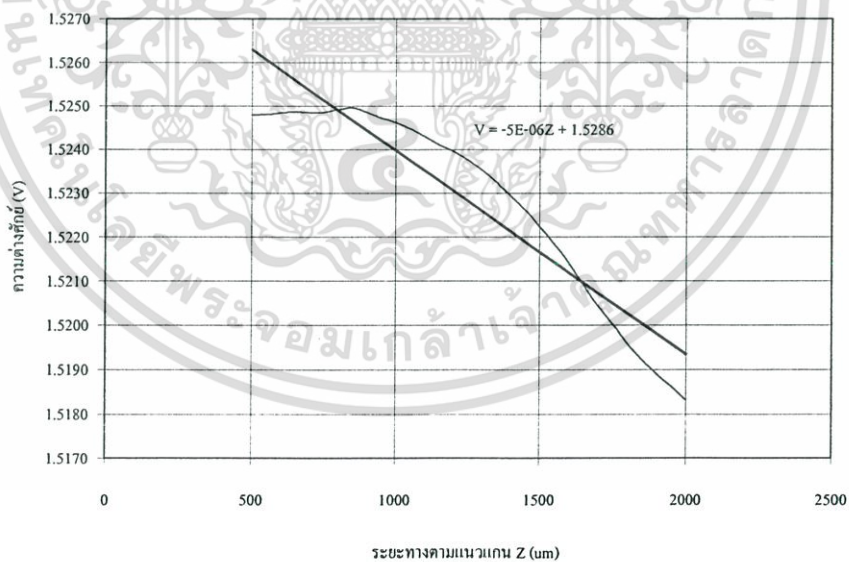
รูปที่ 4.54 ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามไกล ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 5 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 mA ของลักษณะพื้นผิวเหล็ก



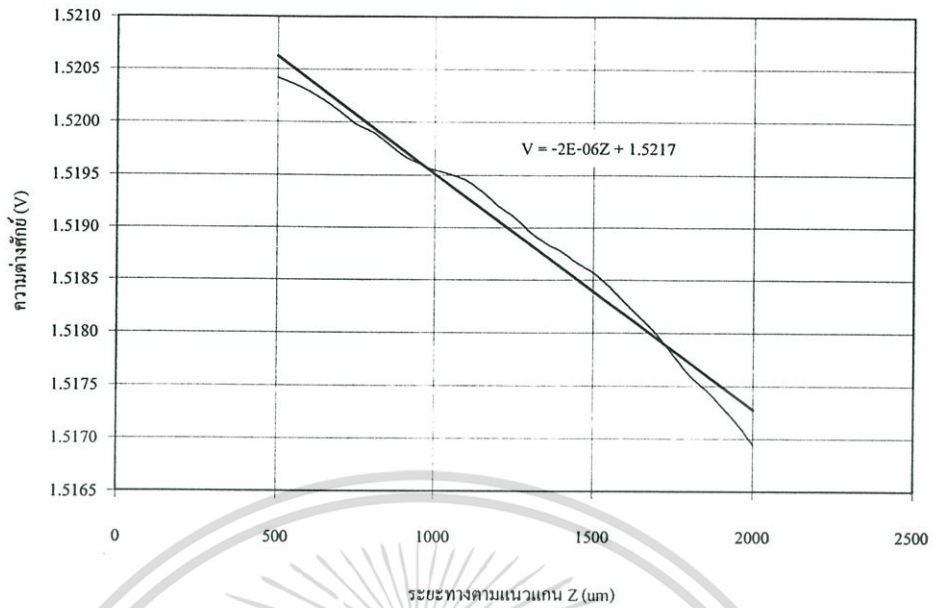
รูปที่ 4.55 ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามไกล ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 5 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 mA ของลักษณะพื้นผิวแผ่นซีดี



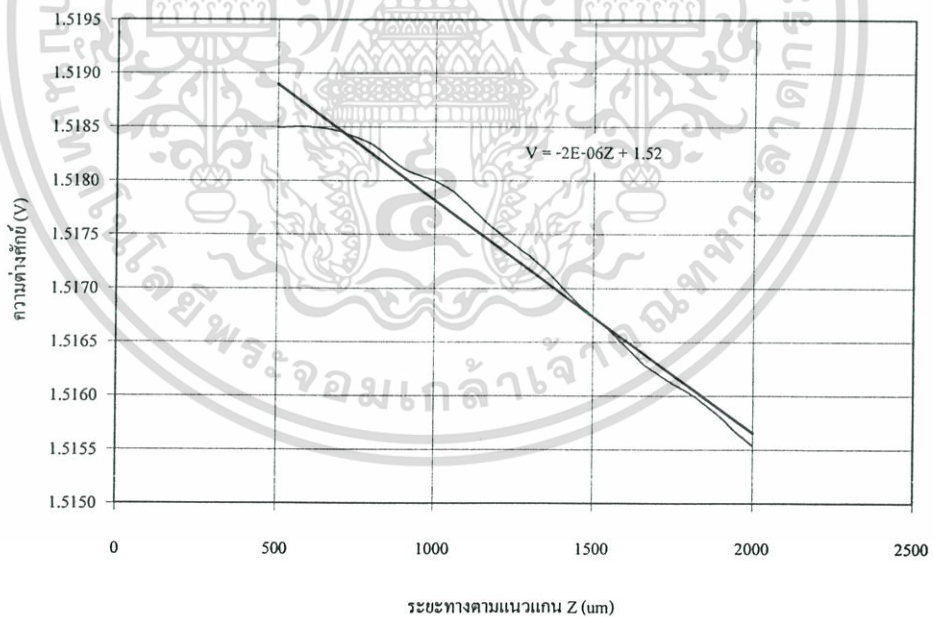
รูปที่ 4.56 ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามไกล ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 5 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 mA ของลักษณะพื้นผิวกระจกเลเซอร์



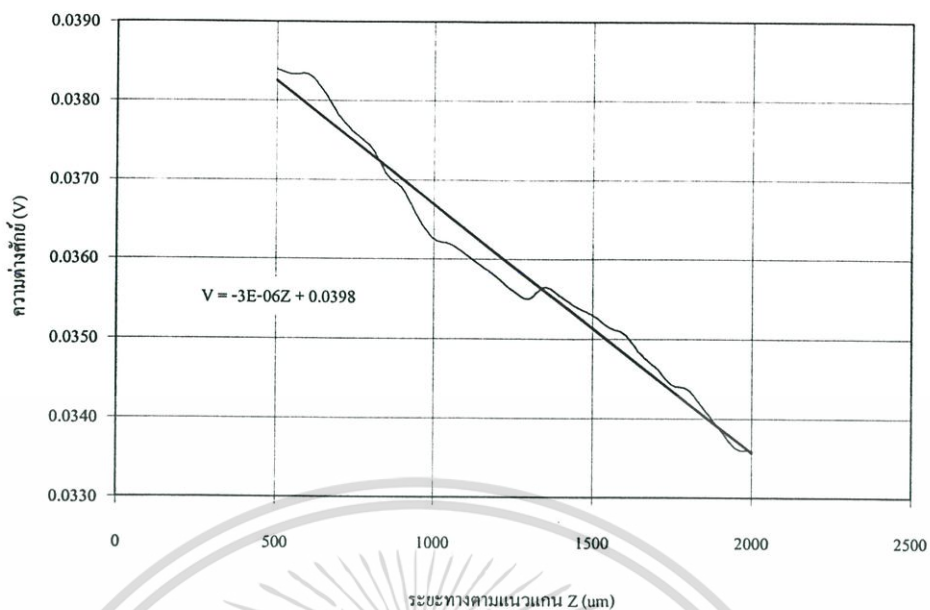
รูปที่ 4.57 ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามไกล ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 5 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 mA ของลักษณะพื้นผิวทองเหลือง



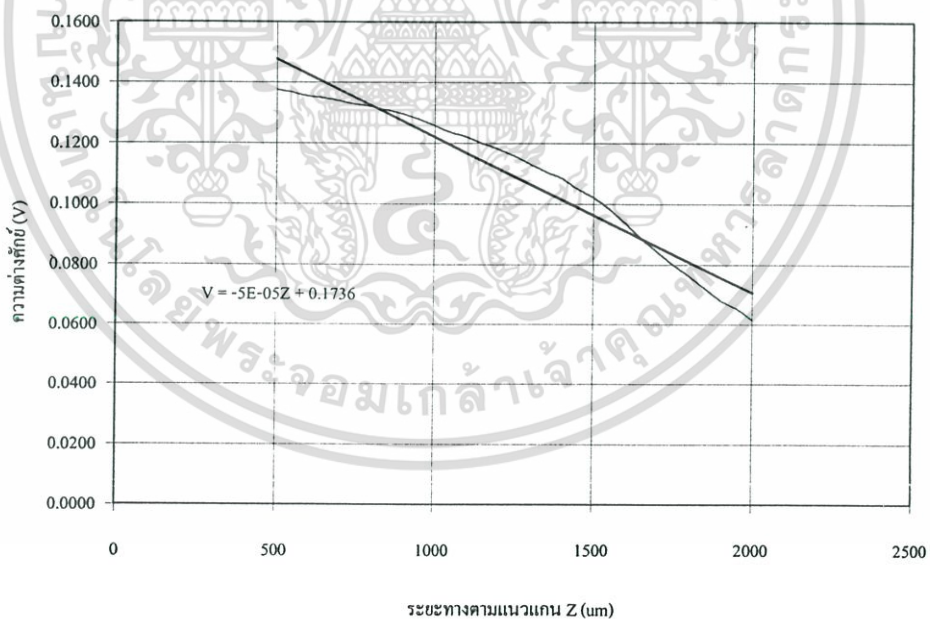
รูปที่ 4.58 ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามไกล ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดที่ระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 5 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 mA ของลักษณะพื้นผิวทองแดง



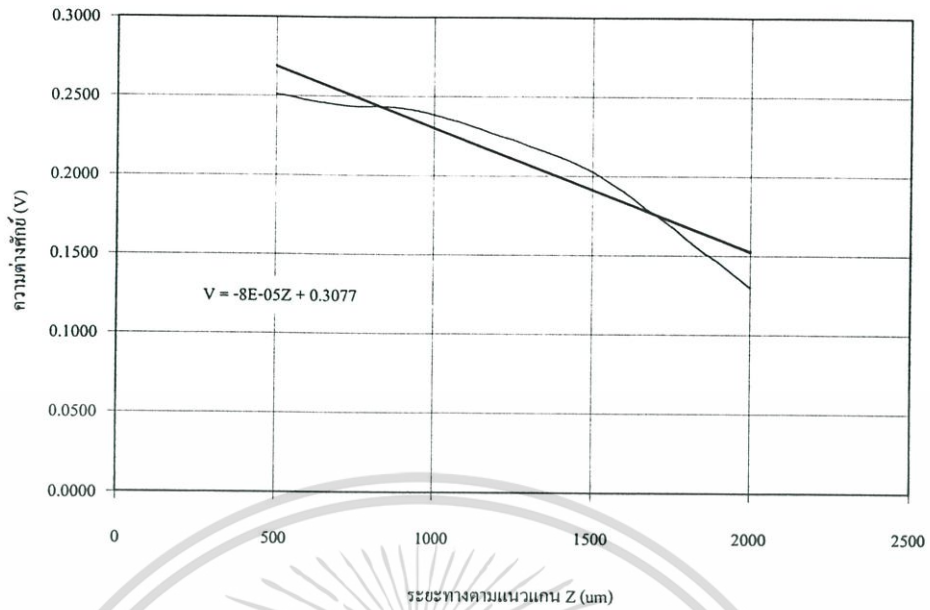
รูปที่ 4.59 ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามไกล ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดที่ระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 5 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 mA ของลักษณะพื้นผิวอลูมิเนียม



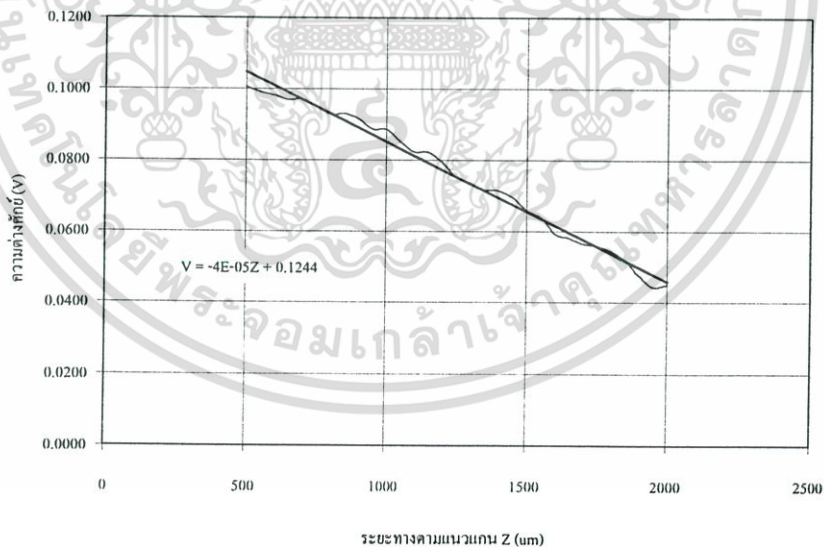
รูปที่ 4.60 ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามไกล ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 10 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 70 mA ของลักษณะพื้นผิวหลัก



รูปที่ 4.61 ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามไกล ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 10 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 70 mA ของลักษณะพื้นผิวแผ่นซีดี

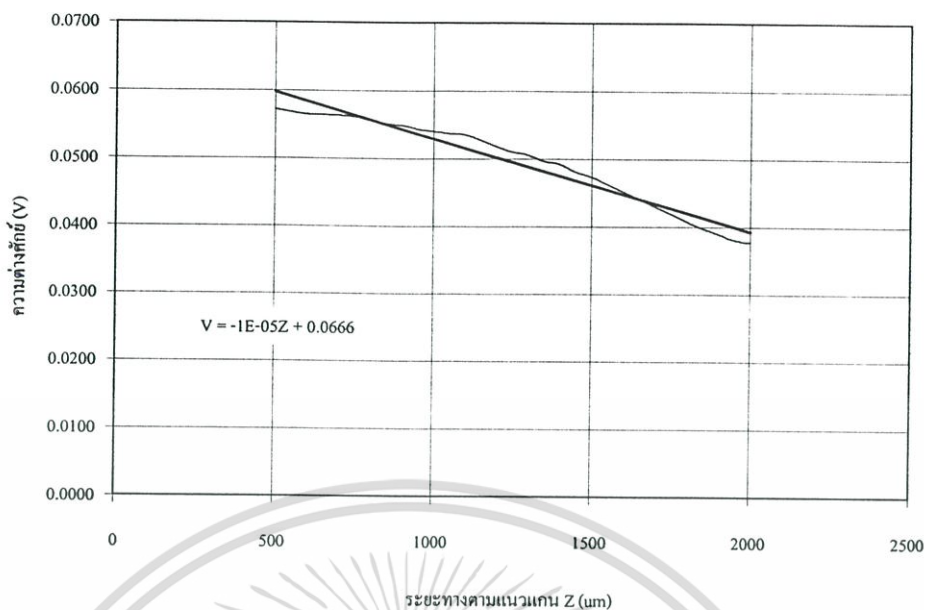


รูปที่ 4.62 ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามไกล ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 10 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 70 mA ของลักษณะพื้นผิวกระจกเลเซอร์

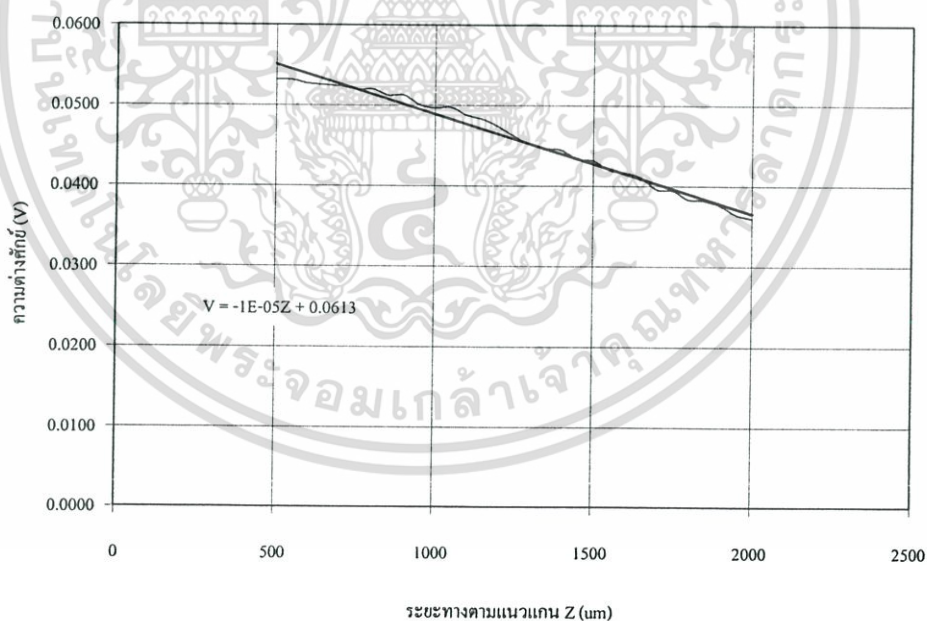


รูปที่ 4.63 ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามไกล ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 10 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 70 mA ของลักษณะพื้นผิวทองเหลือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.64 ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามไกล ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 10 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 70 mA ของลักษณะพื้นผิวทองแดง



รูปที่ 4.65 ความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามไกล ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 10 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 70 mA ของลักษณะพื้นผิวอลูมิเนียม

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามไกล ของลักษณะพื้นผิวต่างๆ ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ไม่ว่าจะความเข้มหรือกำลังของเลเซอร์จะเพิ่มขึ้น ก็ยังมีความเป็นเชิงเส้นที่จะสามารถนำมาสร้างภาพพื้นผิววัตถุได้ และจากผลการทดลองพบว่าที่การเปลี่ยนแปลงระยะในแนวแกน Z ที่เท่ากันนี้ การเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์จะเป็นตัวแปรที่บอกถึงการสะท้อนของสัญญาณว่าดีหรือไม่ หรืออาจจะพิจารณาได้จากค่าความชันของกราฟดังตารางที่ 4.1 และ ตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามไกล ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 5 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 mA ของลักษณะพื้นผิวต่างๆ

ลักษณะพื้นผิว	สมการเชิงเส้น	ความชัน	ลำดับการสะท้อน
1. เหล็ก	$V = -9 \times 10^{-7} Z + 1.5172$	9×10^{-7}	6
2. แผ่นซีดี	$V = -9 \times 10^{-6} Z + 1.5387$	9×10^{-6}	2
3. กระจกเลเซอร์	$V = -3 \times 10^{-5} Z + 1.5747$	3×10^{-5}	1
4. ทองเหลือง	$V = -5 \times 10^{-6} Z + 1.5286$	5×10^{-6}	3
5. ทองแดง	$V = -2 \times 10^{-6} Z + 1.5217$	2×10^{-6}	4
6. อลูมิเนียม	$V = -2 \times 10^{-6} Z + 1.5200$	2×10^{-6}	5

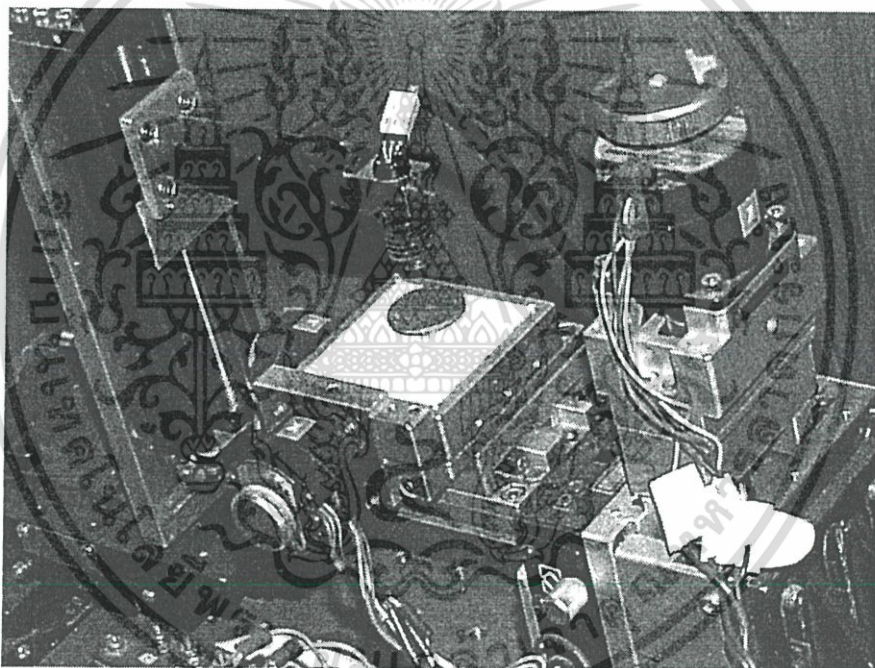
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามไกล ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด ขนาด 10 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 70 mA ของลักษณะพื้นผิวต่างๆ

ลักษณะพื้นผิว	สมการเชิงเส้น	ความชัน	ลำดับการสะท้อน
1. เหล็ก	$V = -3 \times 10^{-6} Z + 0.0398$	3×10^{-6}	6
2. แผ่นซีดี	$V = -5 \times 10^{-5} Z + 0.1736$	5×10^{-5}	2
3. กระจกเลเซอร์	$V = -8 \times 10^{-5} Z + 0.3077$	8×10^{-5}	1
4. ทองเหลือง	$V = -4 \times 10^{-5} Z + 0.1244$	4×10^{-5}	3
5. ทองแดง	$V = -1 \times 10^{-5} Z + 0.0666$	1×10^{-5}	4
6. อลูมิเนียม	$V = -1 \times 10^{-5} Z + 0.0613$	1×10^{-5}	5

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามไกล ของลักษณะพื้นผิวต่างๆ ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ไม่ว่าจะความเข้มหรือกำลังของเลเซอร์จะเพิ่มขึ้น ความเป็นเชิงเส้นก็ยังคงสอดคล้องกัน ซึ่งความเป็นเชิงเส้นนี้สามารถนำมาสร้างภาพพื้นผิววัตถุได้

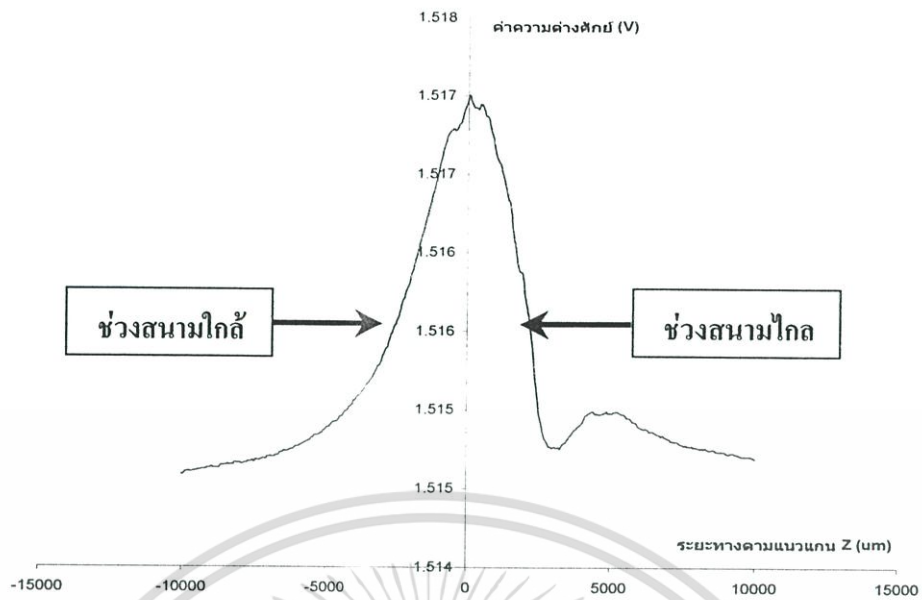
4.4 การสร้างภาพพื้นผิววัตถุจากความเป็นเชิงเส้นของสัญญาณการสะท้อนของแสง

การสร้างภาพพื้นผิววัตถุจากความเป็นเชิงเส้นของสัญญาณการสะท้อนของแสง มีขั้นตอนการดำเนินการปฏิบัติดังนี้ นำวัตถุที่ต้องการสร้างภาพพื้นผิวมาจัดวางลงบนแท่นสแกน XYZ ในที่นี้ใช้เหรียญ 5 บาทของไทยเพราะมีความสูงค่าของพื้นผิววัตถุที่ต้องการมาจัดวางดังรูปที่ 4.66 และสแกนในแนวแกน Z เพื่อศึกษาความเป็นเชิงเส้นของวัตถุที่สนามใกล้และที่สนามไกล

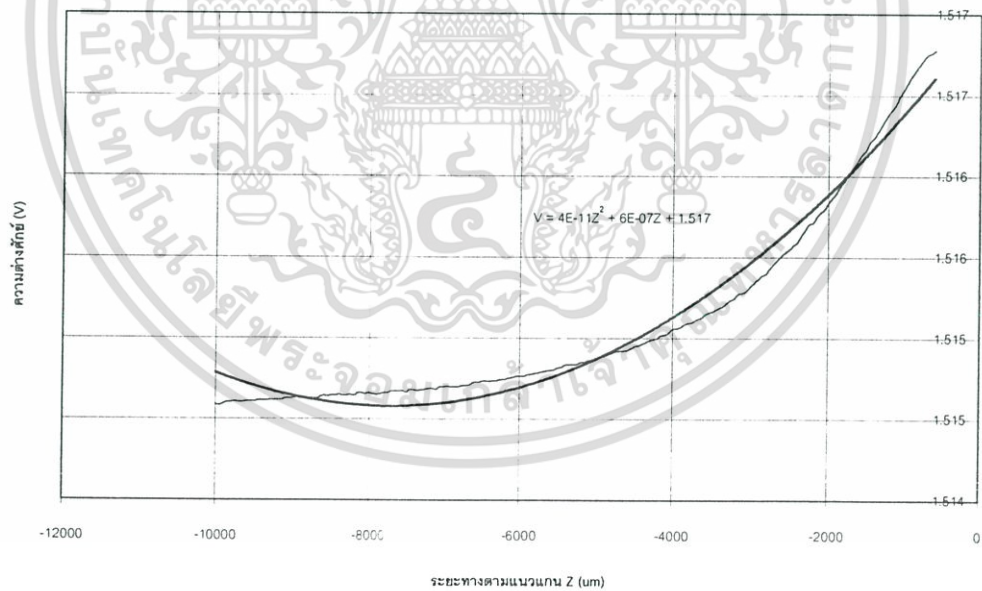


รูปที่ 4.66 การจัดวางวัตถุบนแท่นสแกน XYZ

จากผลการทดลองการสแกนในแนวแกน Z สามารถได้ค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามใกล้และสนามไกลดังรูปที่ 4.67 ซึ่งจะเป็นการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอด และสามารถที่จะแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงสนามใกล้ และช่วงสนามไกล ดังรูปที่ 4.68 และ รูปที่ 4.69

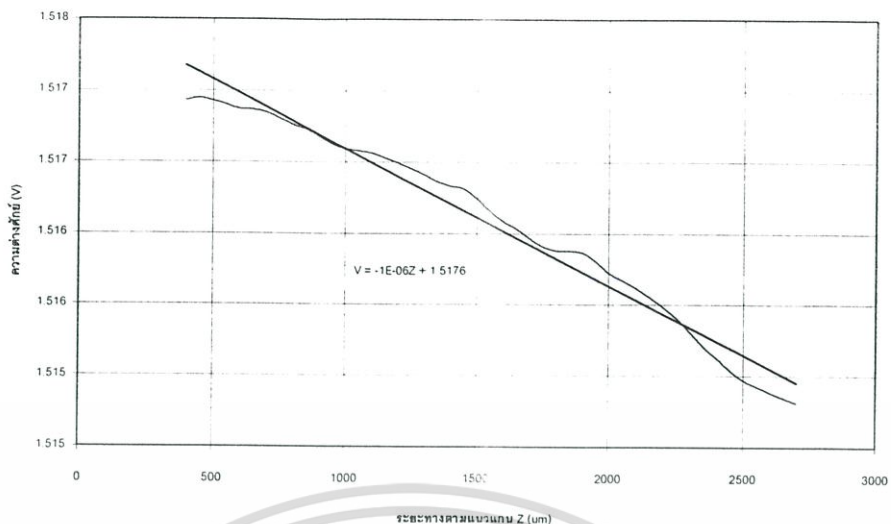


รูปที่ 4.67 ค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามใกล้และสนามไกล ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอดของลักษณะพื้นผิวหริยัญ



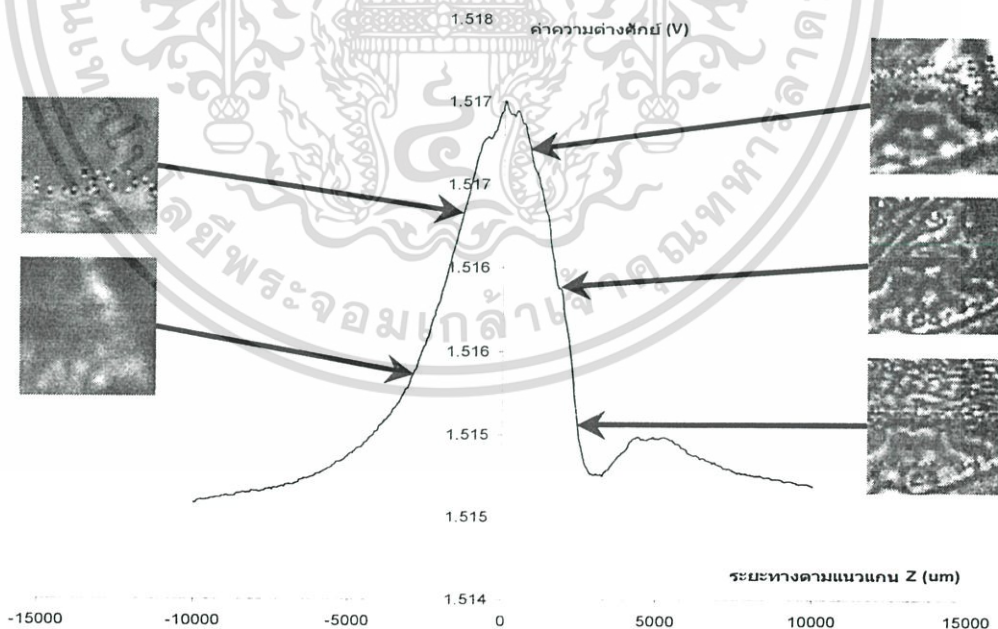
รูปที่ 4.68 ช่วงของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามใกล้ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอดของลักษณะพื้นผิวหริยัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.69 ช่วงของค่าสัญญาณการสะท้อนที่สนามไกลของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม R ที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดกับระยะห่างตามแนวแกน Z ของเลเซอร์ไดโอดของลักษณะพื้นผิวเหรียญ

จากผลการทดลองถ้าพิจารณาที่จุดต่างๆ บนกราฟรูปที่ 4.67 ช่วงที่มีความเป็นเชิงเส้นเท่านั้นที่จะสามารถสร้างรูปพื้นผิววัตถุได้ และพบว่าช่วงสัญญาณที่มีความเป็นเชิงเส้นจะอยู่ที่ช่วงสนามไกลซึ่งสามารถสร้างเป็นภาพได้ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.70



รูปที่ 4.70 ภาพที่ได้จากการนำข้อมูลในช่วงสนามใกล้และสนามไกลมาสร้างภาพ

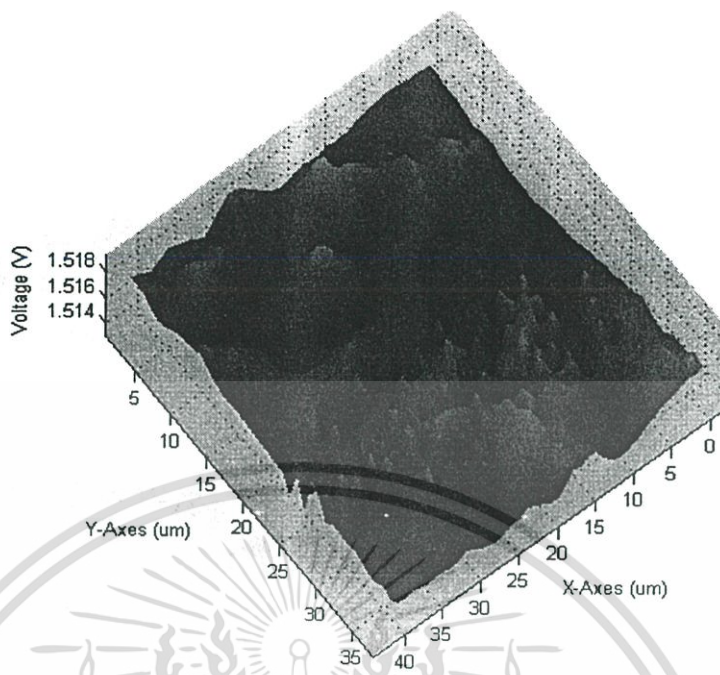
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการสแกนโดยใช้เลเซอร์ไดโอด ขนาด 5 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 mA ในช่วงสัณฐานที่มีความเป็นเชิงเส้น โดยสแกนในส่วนต่างๆ ของวัตถุที่เป็นเหรียญจะได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.71



รูปที่ 4.71 ภาพที่ได้จากการสแกนส่วนต่างๆ ของวัตถุที่เป็นเหรียญโดยใช้เลเซอร์ไดโอด ขนาด 5 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 mA ในช่วงสัณฐานที่มีความเป็นเชิงเส้น

จากรูปที่ 4.70 สามารถที่จะนำภาพที่ได้จากการสแกนส่วนหนึ่งของวัตถุที่เป็นเหรียญโดยใช้เลเซอร์ไดโอด ขนาด 5 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 mA ในช่วงสัณฐานที่มีความเป็นเชิงเส้น มาสร้างเป็นภาพ 3 มิติ ที่แสดงถึงความสูงต่ำของภาพได้ ดังรูปที่ 4.72



รูปที่ 4.72 ภาพ 3 มิติที่ได้จากการสแกนส่วนหนึ่งของวัตถุที่เป็นเหรียญโดยใช้เลเซอร์ไดโอด ขนาด 5 mW ปริมาณกระแสไฟฟ้า 50 mA ในช่วงสัญญาณที่มีความเป็นเชิงเส้น และจากการทดลองพบว่าถ้าวัตถุมีสีที่แตกต่างกัน แต่มีพื้นผิวเรียบเท่ากันความแตกต่างของสียังเป็นปัจจัยการสะท้อนของสัญญาณซึ่งผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.73



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.73 ภาพที่ได้จากการสแกนวัตถุมีสีที่แตกต่างกัน แต่มีพื้นผิวเรียบเท่ากัน

(ก) ภาพ 2 มิติที่ได้จากการสแกนวัตถุมีสีที่แตกต่างกัน แต่มีพื้นผิวเรียบเท่ากัน

(ข) ภาพ 3 มิติที่ได้จากการสแกนวัตถุมีสีที่แตกต่างกัน แต่มีพื้นผิวเรียบเท่ากัน

จากรูปที่ 4.73 ภาพ 3 มิติที่ได้จากการสแกนวัตถุมีสีที่แตกต่างกัน แต่มีพื้นผิวเรียบเท่ากันนี้ ความสูงต่ำของภาพเป็นตัวบ่งบอกถึงความแตกต่างของสี ซึ่งสีนี้จะมีผลต่อสัญญาณการสะท้อน ซึ่งจากผลการทดลองสร้างภาพพื้นผิววัตถุด้วยหลักการเซลฟมิกซิงในเลเซอร์ไดโอด ปัจจัยที่มีผลต่อการสร้างภาพได้แก่ กำลังเอาต์พุตหรือความเข้มของเลเซอร์ไดโอด ลักษณะพื้นผิวที่นำมาสร้างภาพความสูงต่ำต้องอยู่ในช่วงการสแกนที่มีความเป็นเชิงเส้น และพื้นผิววัตถุที่นำมาสแกนจะต้องเป็นเนื้อวัสดุเดียวกันเพื่อให้สัญญาณการสะท้อนเปลี่ยนแปลงตามความสูงต่ำของพื้นผิววัตถุเท่านั้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทสรุป แนวทางการพัฒนาและการประยุกต์

ในบทนี้เป็นส่วนสรุปผลการดำเนินงานวิจัย ของการศึกษการสร้างภาพพื้นผิววัตถุด้วยหลักการเซลล์ฟิสิกซิงในเลเซอร์ไดโอด ตลอดจนปัญหาที่พบระหว่างดำเนินงานวิจัยรวมถึงผลการทดลองที่ได้ ในส่วนท้ายของบทนี้ได้เสนอข้อเสนอแนะ แนวทางปรับปรุง การพัฒนาประยุกต์ใช้งาน และเพื่อเป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัยต่อไป

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. การสร้างภาพพื้นผิววัตถุด้วยหลักการเซลล์ฟิสิกซิงในเลเซอร์ไดโอด จะอาศัยหลักการสะท้อนของแสง โดยเลเซอร์ไดโอดที่ใช้จะมีเลเซอร์ไดโอดและโฟโตไดโอดอยู่ในตัวเดียวกัน ซึ่งระบบไม่ต้องมี ผลึกแยกลำแสง กระจกอ้างอิง ดีเทคเตอร์ ซึ่งการจัดวางอุปกรณ์ไม่ค่อนข้างยุ่งยาก เมื่อแสงเลเซอร์ถูกปล่อยออกจากแหล่งกำเนิดตกกระทบกับพื้นผิววัตถุ แสงก็จะมีการสะท้อนกลับโดยให้มุมที่แสงตกกระทบกับพื้นผิววัตถุทำมุม 90 องศา ซึ่งจะทำให้สัญญาณแสงเคลื่อนที่สะท้อนกลับมาในแนวเดิมและมีความเข้มแสงมากที่สุด และสัญญาณแสงที่สะท้อนกลับมานี้จะเกิดการแทรกสอดแบบเซลล์ฟิสิกซิงแบบฟาบริ-เพอร์โร ภายในเลเซอร์แควิตี และสามารถวัดสัญญาณการเปลี่ยนแปลงที่ได้นี้จากโฟโตไดโอด ซึ่งโดยทั่วๆ ไปแล้วโฟโตไดโอดนี้จะมีไว้ควบคุมกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้เลเซอร์ไดโอด เพื่อให้เลเซอร์จ่ายกำลังเอาท์พุทคงที่ตลอดเวลาการทำงาน แต่ในงานวิจัยนี้ได้จ่ายกระแสไฟฟ้าที่คงที่ให้กับเลเซอร์ไดโอดและใช้ประโยชน์จากโฟโตไดโอดในการรับสัญญาณการเปลี่ยนแปลง ซึ่งค่าสัญญาณการเปลี่ยนแปลงนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างเช่น กำลังเอาท์พุทของเลเซอร์ไดโอด ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดเลเซอร์กับพื้นผิววัตถุซึ่งเป็นตัวสะท้อนภายนอก ลักษณะของพื้นผิววัตถุที่มีผลต่อการสะท้อนแสง เช่น สีของพื้นผิววัตถุ ความเรียบรวมถึงความมันวาวของพื้นผิววัตถุ ความสูงต่ำของพื้นผิววัตถุ ในการวิจัยนี้จะพิจารณาพื้นผิววัตถุที่มีเนื้อเดียวกัน ซึ่งจะนำค่าสัญญาณการเปลี่ยนแปลงนี้ไปวิเคราะห์เพื่อหาช่วงความเป็นเชิงเส้นของสัญญาณ ความเรียบของพื้นผิวซึ่งจะบอกถึงความสูงต่ำของพื้นผิววัตถุได้

2. ระบบที่สร้างขึ้นใช้เลเซอร์ขนาด 5 mW และ 10 mW ซึ่งมีความยาวคลื่น 635 นาโนเมตรและ 670 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงสีแดงเหมาะสมสำหรับการจัดวางระบบ ซึ่งจากการศึกษาวิจัยพบว่ากำลังเอาท์พุทหรือความเข้มของเลเซอร์สามารถที่จะควบคุมได้โดยจ่ายกระแสไฟฟ้า แต่ต้องไม่เกินขีดจำกัดสูงสุดที่เลเซอร์ไดโอดทนได้ ซึ่งจะมีผลต่อสัญญาณการสะท้อนกลับ

ที่วัดได้จากตัวด้านทานที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอด และลักษณะของพื้นผิวก็มีผลต่อสัญญาณการสะท้อนเช่นกัน

3. ระบบสแกนสามารถที่จะสแกนในแนว XYZ โดยระยะในการสแกน 2 ไมโครเมตร โดยมีชุดควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ซึ่งต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ และมีตัวแปลงสัญญาณที่มีความละเอียดสูงถึง 20 บิต สามารถแปลงสัญญาณที่มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยได้ซึ่งมีวงจรรขยายสัญญาณอยู่ในทำให้สัญญาณถูกรบกวนน้อยมาก ซึ่งจะถูกควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ การเก็บข้อมูล และวิเคราะห์ข้อมูลจะทำโดยคอมพิวเตอร์ซึ่งจะมีโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ความเป็นเชิงเส้น และสามารถสร้างภาพ 2 มิติ และ 3 มิติได้

4. ในการสร้างภาพจะต้องนำวัตถุที่มีเนื้อของวัสดุเดียวกันมาทำการทดสอบหาความเป็นเชิงเส้นของค่าสัญญาณการเปลี่ยนแปลงในแนวแกน Z ในที่นี้จะวัดค่าความต่างศักย์ที่ตัวด้านทานที่ต่ออนุกรมอยู่กับโฟโตไดโอดเพื่อกำหนดช่วงการสแกน โดยความสูงต่ำของวัตถุจะต้องอยู่ในช่วงความเป็นเชิงเส้นและนำข้อมูลที่ได้มาสร้างเป็นภาพ 2 มิติ และ 3 มิติได้

5. คุณภาพของสัญญาณที่ได้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบปัจจัยหลายๆ อย่าง เช่น สีของพื้นผิววัตถุ ความเรียบรวมถึงความมันวาวของพื้นผิววัตถุ ความสูงต่ำของพื้นผิววัตถุ ในการวิจัยนี้จะพิจารณาพื้นผิววัตถุที่มีเนื้อเดียวกัน ซึ่งจากผลการทดลองสัญญาณข้อมูลที่วัดได้ และภาพที่สร้างขึ้นจากสัญญาณข้อมูลมีความคมชัดและสามารถแยกแยะความสูงต่ำได้

5.2 ปัญหาที่พบ แนวทางแก้ไขและพัฒนาในอนาคต

ปัญหาที่พบในการสร้างภาพพื้นผิววัตถุด้วยหลักการเซลฟมิกซิงในเลเซอร์ไดโอดนี้ ได้แก่

1. เนื่องจากระบบการสแกนที่สร้างขึ้นมีการสั่นขณะที่มีมอเตอร์มีการเคลื่อนที่ เพราะระยะในการสแกนมีค่าระดับไมโครเมตรดังนั้นแทนสแกนระยะในแนวแกน XY ที่วางวัตถุจะมีการเคลื่อนที่และหยุดบ่อยครั้งจึงทำให้สัญญาณที่วัดได้ไม่คงที่ ดังนั้นจะต้องทำการวัดค่าสัญญาณหลายๆ ครั้งและนำค่าสัญญาณที่ได้มาเฉลี่ย และนำข้อมูลสัญญาณที่ได้ไปใช้ต่อไป จากการทดลองพบว่ากรณีที่ให้แทนสแกนระยะในแนวแกน XY เคลื่อนที่โดยติดตั้งบนแทนสแกนระยะในแนวแกน Z จะดีกว่าที่จะให้เลเซอร์ไดโอดเคลื่อนที่เพราะถ้าให้เลเซอร์เคลื่อนที่ลำแสงจะเกิดการสั่นมากกว่า สัญญาณที่ได้จะเกิดข้อผิดพลาดมากกว่าไม่สามารถนำสัญญาณที่ได้มาวิเคราะห์

2. การจัดวางระบบแทนสแกนให้ได้ระนาบควรจะนำแทนสแกน XYZ มาจัดวางไว้ด้วยกันให้มีการเคลื่อนที่ไปพร้อมๆ กันทั้งระบบ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ทางแสงได้มีมาตรฐานเดียวกันทั่วโลก การประกอบอุปกรณ์ที่ได้มาตรฐานนี้ความผิดพลาดย่อมเกิดขึ้นน้อยกว่าการประดิษฐ์ขึ้นเอง แต่ผลของการศึกษาวิจัยนี้ทำให้เห็นว่าถึงแม้จะเกิดความผิดพลาดจากการจัดวางระบบที่ทำขึ้นเองนั้น เช่น ระบบการสแกนในแนวแกน XY ไม่ได้ระดับ ระบบสแกนในแนวแกน XY ที่วางอยู่

บนระบบสแกนในแนวแกน Z ไม่ตั้งฉากกันทำให้ลำแสงที่ตกกระทบและสะท้อนไม่ได้เคลื่อนที่ในแนวเดียวกัน ค่าสัญญาณการสะท้อนที่ได้มีค่าน้อยกว่าความเป็นจริงเล็กน้อย แต่ถ้าสามารถที่จะทำให้ลำแสงตกกระทบและสะท้อนเคลื่อนที่ในแนวเดียวกันการจะเห็นปรากฏการณ์เซลล์ฟิมิกซิงจะสามารถทำได้ แต่สัญญาณที่เป็นลูกคลื่นของการแทรกสอดแบบเซลล์ฟิมิกซิงแบบฟาบรี-เพอร์โรในเลเซอร์ควิตีในช่วงสัญญาณที่เป็นเชิงเส้นจะมีผลต่อการสร้างภาพ ดังนั้นการทำให้สัญญาณลูกคลื่นหายไปจึงเป็นผลดีต่อการสร้างภาพพื้นผิววัตถุ

3. สัญญาณและภาพที่ได้จะมีบางจุดที่เกิดการผิดพลาด ซึ่งอาจเกิดจากพื้นผิววัตถุที่นำมาทดสอบอาจมีบางจุดที่มีเนื้อวัตถุแตกต่างกัน เพื่อลดข้อผิดพลาดของสัญญาณควรเลือกวัตถุที่มีเนื้อเดียวกัน และข้อผิดพลาดอีกประการที่ไม่อาจมองข้ามได้ คือ จังหวะการเคลื่อนของมอเตอร์และจังหวะการเก็บสัญญาณ ถ้าเก็บสัญญาณในจังหวะที่มอเตอร์หยุดพอดี สัญญาณที่ได้ก็จะเป็นสัญญาณการสะท้อนที่ยังไม่คงที่ ดังนั้นความเร็วในการเคลื่อนมอเตอร์และจังหวะการเก็บควรมีความสัมพันธ์กัน

4. จำนวนข้อมูลที่ต้องการเก็บมีมากถ้าทำการสแกนพื้นที่ผิววัตถุใหญ่ๆ การเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลของคอมพิวเตอร์ไม่สามารถรับได้ และถ้าระยะในการสแกนเก็บข้อมูลมากภาพที่ได้ก็จะหยาบ ซึ่งการวิเคราะห์ภาพ 3 มิติก็จะทำได้ยากขึ้น ดังนั้นขนาดของพื้นที่และระยะการสแกนต้องเหมาะสมกับการสแกนและระยะเวลาของการเก็บข้อมูล ซึ่งถ้าจะมีการพัฒนาต่อและสามารถหาเลเซอร์ไดโอดที่มีโฟโต ไดโอดอยู่ภายในตัวเดียวกันแบบเรียงกันเป็นแถวจะทำให้เวลาในการสแกนเร็วขึ้น

5. การเปลี่ยนเลเซอร์เพื่อเพิ่มกำลังของเลเซอร์จาก 5 mW เป็น 10 mW ทำให้ยุ่งยากเพราะระบบจะถูกกระทบกระเทือนทำให้ระยะผิดพลาดไป ดังนั้นเมื่อต้องการศึกษาวิจัยควรที่จะทำการทดลองในจุดนั้นๆ ให้เสร็จไม่ควรเปลี่ยนไปเปลี่ยนมา และในแต่ละการทดลองควรทำซ้ำเพื่อหาค่าสัญญาณเฉลี่ย เพื่อนำค่าสัญญาณนี้ไปใช้ต่อไป

6. ระบบสแกนในงานวิจัยนี้สามารถที่จะสแกนในแนว XYZ โดยระยะในการสแกน 2 ไมโครเมตร แต่ถ้ามีระบบสแกนที่สามารถเคลื่อนระยะสแกนได้น้อยกว่า 2 ไมโครเมตรจะทำให้สามารถพิจารณาศึกษาพื้นผิววัตถุขนาดเล็กๆ และสัญญาณที่ได้สามารถวิเคราะห์เป็นภาพ 2 มิติ และ 3 มิติได้ละเอียดมากขึ้น

7. ค่าความต่างศักย์ของสัญญาณต่างๆ ที่วัดได้จะไม่มีการเทียบกับจุดอ้างอิงเดียวกันดังนั้นค่าที่แสดงบนกราฟจะมีค่ามากกว่าความเป็นจริงอยู่ดังนั้น ควรมีการปรับปรุงการวัดค่าความต่างศักย์ของสัญญาณต่างๆ ให้มีการเทียบกับจุดอ้างอิงเดียวกัน เพื่อให้ค่าที่วัดได้มีค่าถูกต้องมากยิ่งขึ้น

อย่างไรก็ตามการศึกษาวิจัยการสร้างภาพพื้นผิววัตถุด้วยหลักการเซลล์ฟิมิกซิงในเลเซอร์ไดโอด จะยังมีข้อจำกัดและปัญหาอยู่บ้าง แต่ผลการทดลองศึกษาวิจัยก็พบว่ามีความสามารถเทียบเท่าเครื่องมือของต่างประเทศ ซึ่งระบบที่สร้างขึ้นก็ไม่มี ความยุ่งยากมากนัก สามารถที่จะพัฒนาเป็น

เครื่องมือตรวจสอบพื้นผิววัตถุแบบไม่ทำลาย เพื่อที่จะหาจุดบกพร่องของพื้นผิว สามารถที่จะพัฒนาเป็นมิเตอร์วัดระยะการกระจัดหรือระยะทางได้ และใช้ความแตกต่างของสัญญาณการสะท้อนที่เกิดจากลักษณะพื้นผิวที่แตกต่างกันมาสร้างเป็นเครื่องมือวิเคราะห์เนื้อสารที่มีสีหรือมีลักษณะของพื้นผิวต่อการสะท้อนของสัญญาณที่แตกต่างกัน

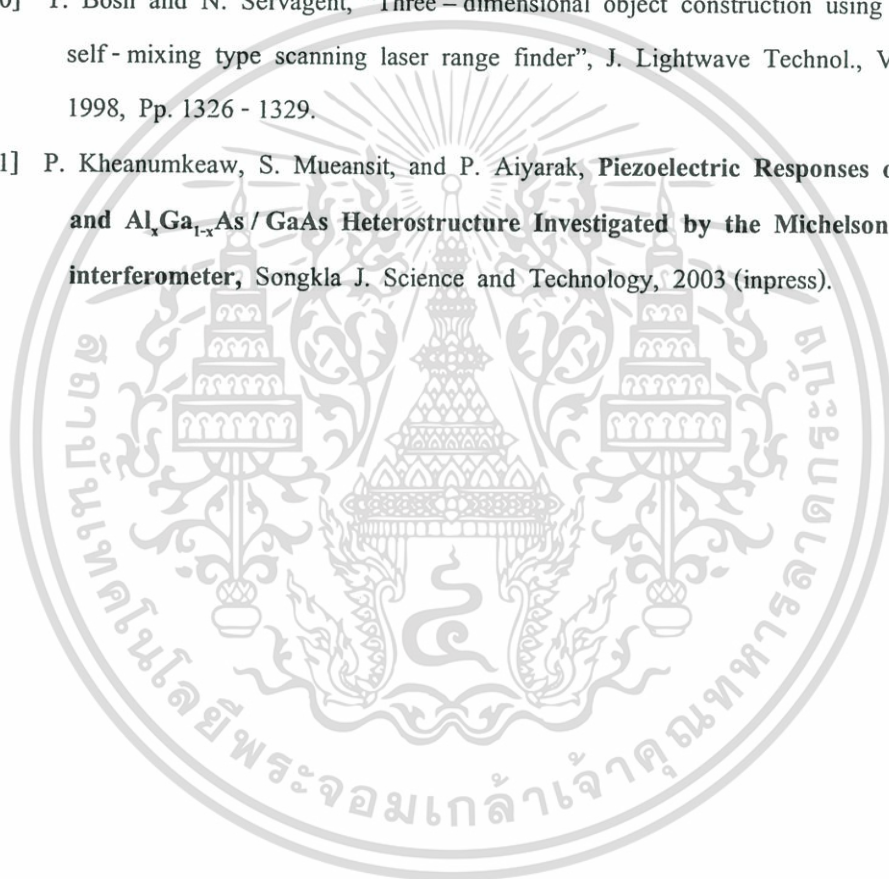


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว. เลเซอร์เอนจิเนียริง. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2519
- [2] คุณิต เครื่องงาม. สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2542
- [3] คุณิต เครื่องงาม. โซลิตอนเทคฟิสิกส์. กรุงเทพมหานคร : ซีเอ็ดยูเคชั่น. 2521
- [4] Jeff Heacht. **Laser Pioneer**. Boston. : Academic Press. 1992
- [5] Joseph T. Verdeyen. **Laser Electronics**. 3rd Ed. New Jersey : Prentice, Inc. 1995
- [6] John Wilson, J. F. B. Hawkes. **Lasers : Principles and Applications**. New York : Prentice – Hall , Inc. 1987
- [7] Peter W. Milonni, Joseph H. Eberly. **Laser**. United States. : John Wiley & Sons, Inc. 1988
- [8] Christopher C. Davis. **Laser and Electro – Optics**. London. Cambridge University Press. 1996
- [9] Born, M. and Wolf, E. **Principle of Optics**. 6th Ed. Oxford : Pergamon Press. 1986.
- [10] E. Gagnon, J.F. Rivest, “Laser range imaging self-mixing effect in a laser diode”, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 48, No.3, 1999. Pp. 693 - 966.
- [11] H. Kakiuchida and J. Ohtsubo, “Characteristics of semiconductor laser with external feedback”, *Quantum Elec.*, Vol. 30, No.9, 1994. Pp. 2287 - 2097.
- [12] R. Lang and K. Kobayashi, “External optical feedback effect on semiconductor injection laser properties”, *Quantum Elec.*, Vol. QE – 16 No.3, 1980. Pp. 347 - 355.
- [13] W.M. Wang, K. T. V. Grattan, A.W. Palmer and W.J.O. Boyle, “Self – mixing interference inside a single mode diode laser for optical sensing applications”, *Lightwave Technol.*, Vol.12, No.9, 1994, Pp. 1577 - 1587.
- [14] T. Suzuki, S. Hirabayashi, O. Sasaki and T. Maruyama, “Self – mixing type of phase - locked laser diode interferometer”, *Opt.Eng.*, Vol.38, No.3, 1999. Pp. 543 – 548.
- [15] T. Yoshino, M. Nara, Sergay Mnatzakanian, Byron S. Lee and Timothy C. Strand, “Laser diode feedback interferometer for stabilization and displacement measurements”, *Appl. Phys.*, Vol.26, No.5, 1987. Pp. 892 - 897.

- [16] E. Gagnon, J. F. Rivest, "Laser range imaging using self-mixing effect in a laser diode", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 48, No.3, 1999. Pp. 693 - 699.
- [17] H. Kakiuchida and J. Ohtsubo, "Characteristics of Semiconductor Laser with External Feedback", *Quantum Elec.*, Vol.30, No.9, 1994. Pp. 2087 – 2097.
- [18] R. Lang and K Kobayashi "External optical feedback effect on semiconductor injection laser properties", *Quantum Elec.*, Vol. QE - 16, No.3, 1980. Pp. 347 - 355.
- [19] N. Servagent, T. Bosch and M. Lescure, "A laser displacement sensor using the self-mixing effect for modal analysis and defect detection", *Lightwave Technol.*, Vol.46, 1997, Pp. 847 – 850.
- [20] T. Bosh and N. Servagent, "Three-dimensional object construction using a self-mixing type scanning laser range finder", *J. Lightwave Technol.*, Vol.47, 1998, Pp. 1326 - 1329.
- [21] P. Kheanumkeaw, S. Mueansit, and P. Aiyarak, **Piezoelectric Responses of GaAs and $Al_xGa_{1-x}As$ / GaAs Heterostructure Investigated by the Michelson interferometer**, *Songkla J. Science and Technology*, 2003 (inpress).



ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Index Guided AlGaInP Laser Diode

Overview

DL-3038-033 is index guided 635 nm (Typ.) AlGaInP laser diode with low threshold current and high operating temperature.

Low threshold current and short wavelength are achieved by a strained multiple quantum well active layer. The lasing wavelength is 635 nm which is 8 times brighter than that of 670 nm lasers. DL-3038-033 is suitable for applications such as bar-code scanners, laser pointers and other optical information systems.

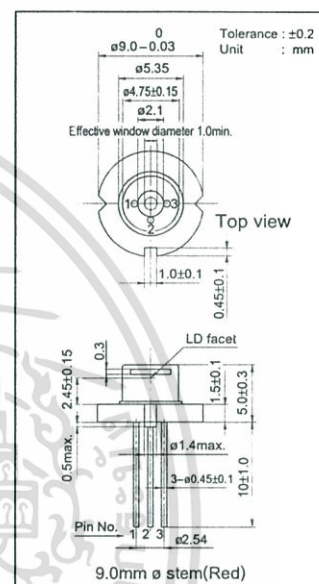
Features

- Short wavelength : 635 nm (Typ.)
- Low threshold current : $I_{th} = 30$ mA (Typ.)
- High operating temperature : 5 mW at 50°C
- Low operating voltage : $V_{op} = 2.2$ V (Typ.)

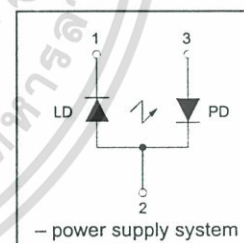
Absolute Maximum Ratings at $T_c = 25^\circ\text{C}$

Parameter	Symbol	Ratings	Unit
Light Output	P_o	5	mW
Reverse Voltage	Laser PIN	V_R	2
			30
Operating Temperature	T_{opr}	-10 to +50	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature	T_{stg}	-40 to +85	$^\circ\text{C}$

Package Dimensions



Electrical Connection



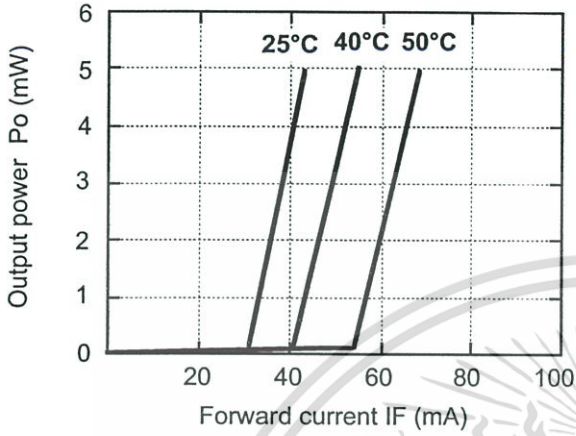
Electrical and Optical Characteristics at $T_c = 25^\circ\text{C}$

Parameter	Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
Threshold Current	I_{th}	CW	-	30	50	mA
Operating Current	I_{op}	$P_o = 5\text{mW}$	-	40	60	mA
Operating Voltage	V_{op}	$P_o = 5\text{mW}$	-	2.2	2.4	V
Lasing Wavelength	λ_p	$P_o = 5\text{mW}$	-	635	640	nm
Beam *)	Perpendicular	θ_{\perp}	25	35	40	deg.
	Parallel	θ_{\parallel}	6	8	10	deg.
Off Axis Angle	Perpendicular	$\Delta\theta_{\perp}$	-	-	± 3	deg.
	Parallel	$\Delta\theta_{\parallel}$	-	-	± 3	deg.
Differential Efficiency	dP_o/dI_{op}	-	-	0.4	-	mW/mA
Monitoring Output Current	I_m	$P_o = 5\text{mW}$	0.10	0.20	0.50	mA
Astigmatism	A_s	$P_o = 5\text{mW}$	-	8	-	μm

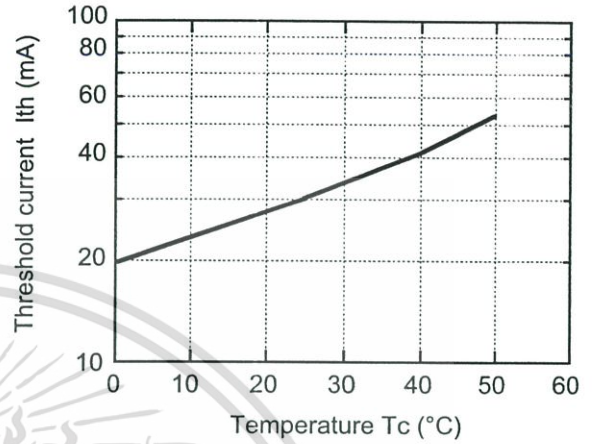
*) Full angle at half maximum note : The above product specifications are subject to change without notice.

Characteristics

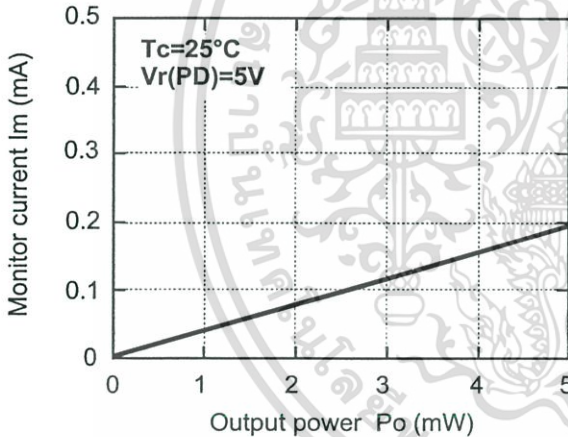
Output power vs. Forward current



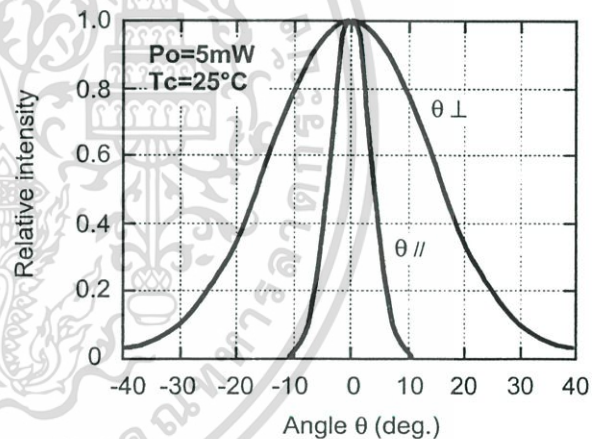
Threshold current vs. Temperature



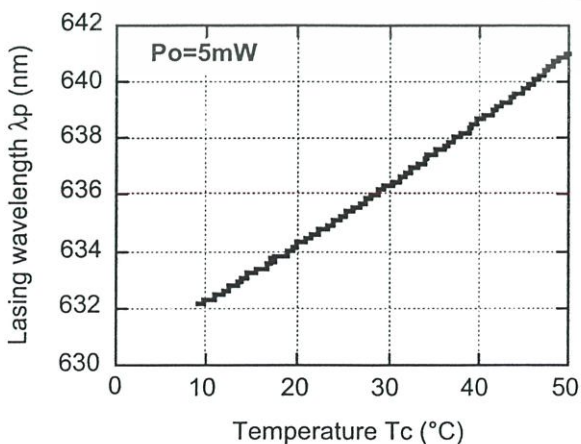
Monitor current vs. Output power



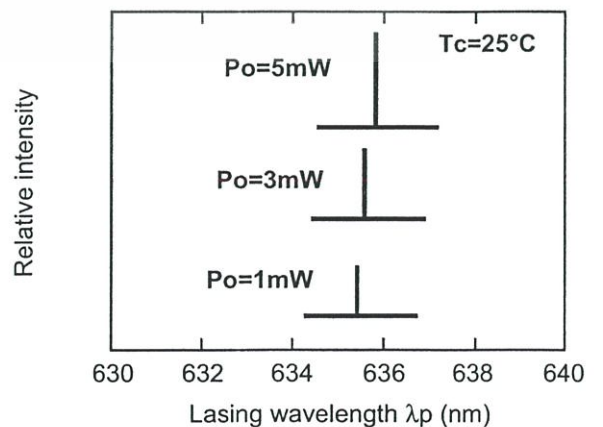
Beam divergence



Lasing wavelength vs. Temperature



Output power vs. Lasing wavelength



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามทำซ้ำ ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RED LASER DIODE

DL-4039-011

SANYO

Ver.4 Apr. 1999

Features

- Short wavelength : 675 nm (Typ.)
- High output power : 10 mW at 50°C
- Low threshold current : $I_{th} = 40$ mA (Typ.)

Applications

- Bar-code scanner
- Laser beam printer

Absolute Maximum Ratings

($T_c=25^\circ\text{C}$)

Parameter	Symbol	Ratings	Unit	
Light Output	CW	P_o	10	mW
Reverse Voltage	Laser	VR	2	V
	PD		30	
Operating Temperature	T_{opr}	-10 ~ +50	$^\circ\text{C}$	
Storage Temperature	T_{stg}	-40 ~ +85	$^\circ\text{C}$	

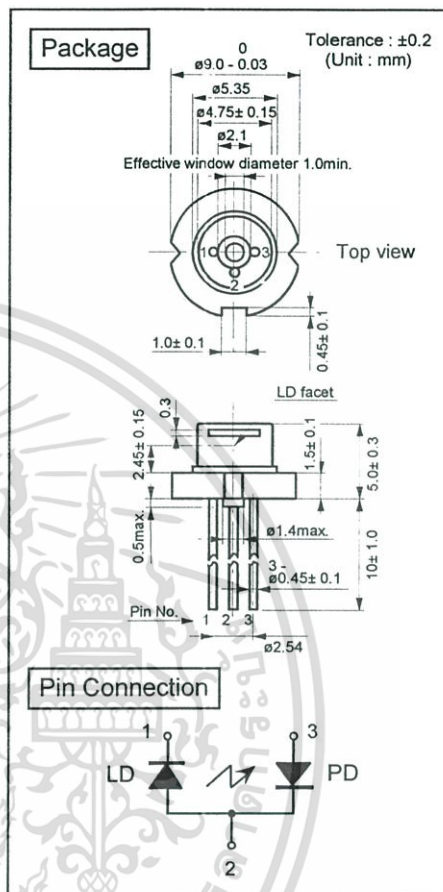
Electrical and Optical Characteristics ^{1) 2)}

($T_c=25^\circ\text{C}$)

Parameter	Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit	
Threshold Current	I_{th}	CW	-	40	70	mA	
Operating Current	I_{op}	$P_o=10\text{mW}$	-	60	90	mA	
Operating Voltage	V_{op}	$P_o=10\text{mW}$	-	2.3	2.6	V	
Lasing Wavelength	λ_p	$P_o=10\text{mW}$	665	675	685	nm	
Beam ³⁾ Divergence	Perpendicular	Q_v	$P_o=10\text{mW}$	25	30	40	$^\circ$
	Parallel	Q_h	$P_o=10\text{mW}$	6	8	10	$^\circ$
Off Axis Angle	Perpendicular	dQ_v	-	-	± 3	$^\circ$	
	Parallel	dQ_h	-	-	± 3	$^\circ$	
Differential Efficiency	dP_o/dI_{op}	-	0.2	0.5	-	mW/mA	
Monitoring Output Current	I_m	$P_o=10\text{mW}$	0.05	0.15	0.4	mA	
Astigmatism	A_s	$P_o=10\text{mW}$	-	8	-	μm	

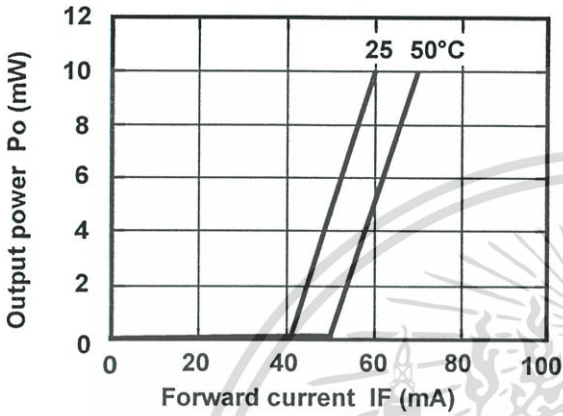
1) Initial values 2) All the above values are evaluated with Tottori Sanyo's measuring apparatus

3) Full angle at half maximum Note : The above product specification are subject to change without notice.

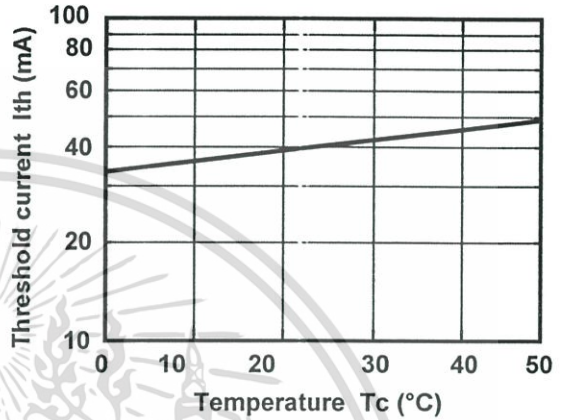


Characteristics

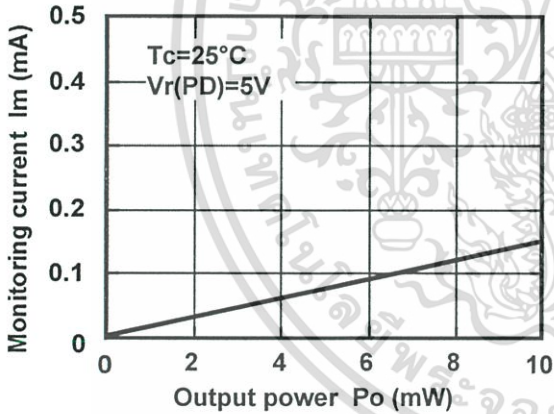
Output power vs. Forward current



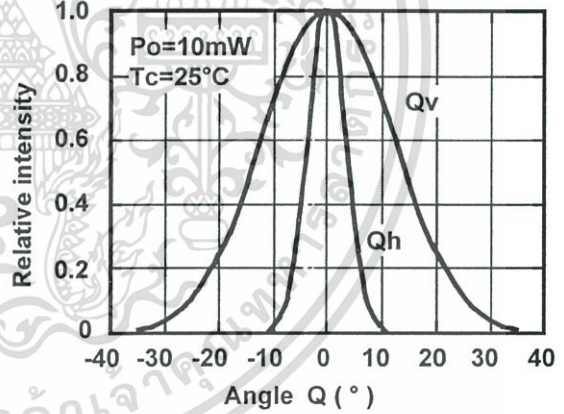
Threshold current vs. Temperature



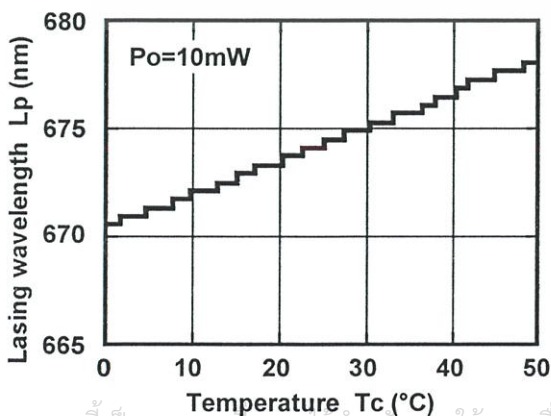
Monitoring current vs. Output power



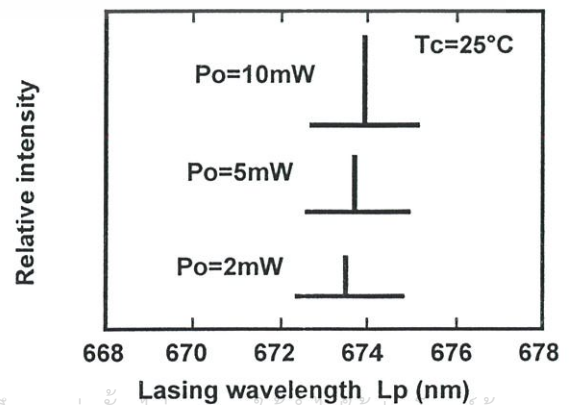
Beam divergence



Lasing wavelength vs. Temperature



Lasing wavelength vs. Output power



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกมัดให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งข้อมูลนี้ไม่ได้แสดงถึงข้อมูลเฉพาะของผลิตภัณฑ์ใด ๆ ที่มีการนำไปใช้
 This is typical data and it may not represent all products.

16/20-Bit $\Delta\Sigma$ Multi-Range ADC w/ 4-Bit Latch

Features

- **Delta-Sigma A/D Converter**
 - Linearity Error: 0.0015%FS
 - Noise Free Resolution: 18-bits
- **Bipolar/Unipolar Input Ranges**
 - 25 mV, 55 mV, 100 mV, 1 V, 2.5 V and 5 V
- **Chopper Stabilized Instrumentation Amplifier**
- **On-Chip Charge Pump Drive Circuitry**
- **4-Bit Output Latch**
- **Simple three-wire serial interface**
 - SPI™ and Microwire™ Compatible
 - Schmitt Trigger on Serial Clock (SCLK)
- **Programmable Output Word Rates**
 - 3.76 Hz to 202Hz (XIN = 32.768 kHz)
 - 11.47 Hz to 616 Hz (XIN = 100 kHz)
- **Output Settles in One Conversion Cycle**
- **Simultaneous 50/60 Hz Noise Rejection**
- **System and Self-Calibration with Read/Write Registers**
- **Single +5 V Analog Supply
+3.0 V or +5 V Digital Supply**
- **Low Power Mode Consumption: 4 mW**
 - 1.8 mW in 1 V, 2.5 V, and 5 V Input Ranges

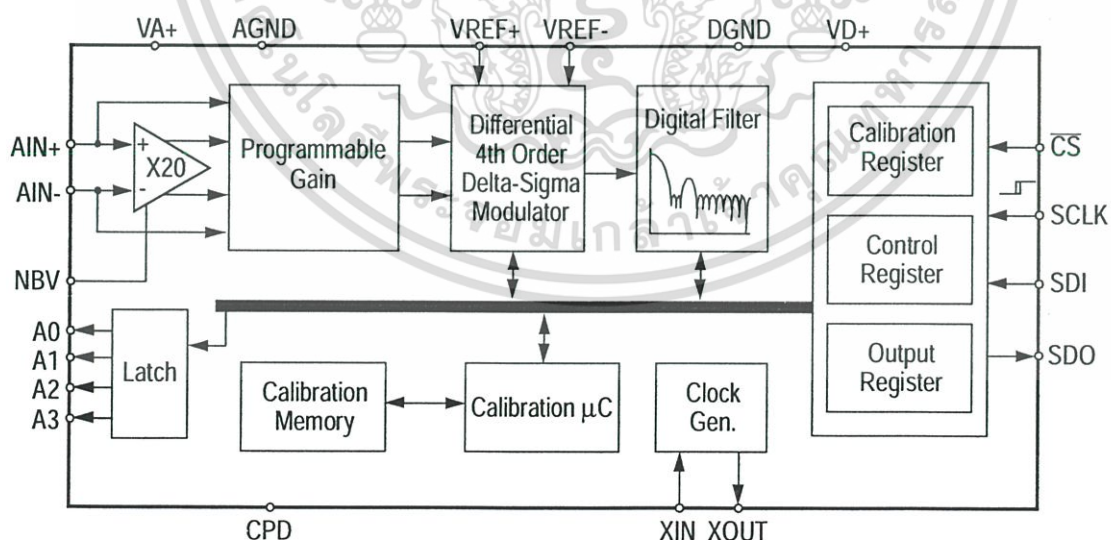
Description

The 16-bit CS5525 and the 20-bit CS5526 are highly integrated $\Delta\Sigma$ A/D converters which include an instrumentation amplifier, a PGA (programmable gain amplifier), eight digital filters, and self and system calibration circuitry.

The converters are designed to provide their own negative supply which allows their on-chip instrumentation amplifiers to measure bipolar ground-referenced signals $\leq \pm 100$ mV. By directly supplying NBV with -2.5 V and with VA+ at 5 V, ± 2.5 V signals (with respect to ground) can be measured.

The digital filters provide programmable output update rates between 3.76 Hz to 202 Hz ($XIN = 32.768$ kHz). Output word rates can be increased by approximately $3X$ by using $XIN = 100$ kHz. Each filter is designed to settle to full accuracy for its output update rate in one conversion cycle. The filters with word rates of 15 Hz or less ($XIN = 32.768$ kHz) reject both 50 and 60 Hz (± 3 Hz) line interference simultaneously.

Low power, single conversion settling time, programmable output rates, and the ability to handle negative input signals make these single supply products ideal solutions for isolated and non-isolated applications.



Overview

The CS5525 and CS5526 are 16 and 20-bit A/D converters respectively, employing the Delta-Sigma topology. They are highly integrated with an on-chip chopper stabilized instrumentation amplifier, programmable gain amplifier, charge pump drive circuitry and negative bias voltage input all operating from a single +5 V supply. A simple programming structure and 3-wire SPI™ and Microwire™ compatible interface enables selectable output word rates, system/self-calibration with read/write registers and the ability to control external portions of the application circuit via the on-chip 4-bit output latch.

FAQs

1) Do you have a four channel part?

A: Not at this time, but we have plans to do a multi-channel product Q4 '97. We also have 4 digital output lines which can be used to control either switches or a multiplexer through the ADC's serial port, thus eliminating the use of an extra port on the system mC and additional opto-isolators in isolated applications.

2) How does the 4-bit digital latch on a DS ADC allow me to change channels?

A: The CS5525 and CS5526 as well as the CS5504 family of ADC's are designed to settle in one conversion cycle. This means a mux can be switched from channel-to-channel with every conversion while maintaining resolution and accuracy.

3) What determines the input span of the converter?

A: Performing a full scale gain calibration, or modifying the reference voltage. For example, if the reference voltage is reduced by 50% the default input ranges scale by one half. Example: $V_{ref} = 2.5 \text{ V}$, $V_{in} = 25 \text{ mV}$ to 5 V and $V_{ref} = 1.25 \text{ V}$, $V_{in} = 12.5 \text{ mV}$ to 2.5 V .

4) How does the output word rate affect the ADC's bandwidth?

A: The input bandwidth is limited to 1/2 the selected output word rate due to the Nyquist theory of sampling. Example: With the default 15 Hz output word rate the available signal bandwidth of the ADC is 7.5 Hz.

5) What is recommended if I need more or less bandwidth than is provided by the on-chip digital filter?

A: Use an external clock between 30 KHz and 100 KHz to scale the digital filters corner frequency accordingly. Example: Using a 3x clock = $3 \times 32.768 \text{ kHz} = 3 \times \text{the word rate} = 3 \times 3.76 \text{ Hz to } 3 \times 202 \text{ Hz} = 11.47 \text{ Hz to } 616 \text{ Hz}$.

6) How fast can the converter shift data from its serial port?

A: Up to 2 Mhz.

7) How does the instrumentation amplifier's chopping frequency affect the converter's input impedance and input current?

A: The input impedance of the converter is a dynamic impedance and depends on whether the instrumentation amplifier is engaged or not. For the lower ranges (25 mV, 55 mV, 100 mV), the instrumentation amplifier is engaged setting the input impedance to $1/fC$ (where C is 2 pF, and f is the chopping frequency, either 256 or 32,768). A typical input impedance for the lower ranges is 1900 MW (with $f = 256$, and $C = 2 \text{ pF}$). For the higher ranges (1 V, 2.5 V, and 5 V), the amplifier is bypassed leaving an equivalent input impedance of $1/fC$ where C is 32 pF and f is either 256 or 32,768. A typical input impedance for the higher ranges is 120 MW (with $f = 256$ and $C = 2 \text{ pF}$).

The input current is a dynamic current and also depends on whether the instrumentation amplifier is engaged or not. For the lower ranges (25 mV, 55 mV, 100 mV), the input current is $fV_{os}C$ (where V_{os} is the offset of the instrumentation amplifier, typically less than 40 mV, f is the chopping frequency, either 256 or 32,768, and C is 2 pF). A typical input current for the lower ranges is 100 pA. For the higher ranges (1 V, 2.5 V, and 5 V), the input current is $[(V_{AIN+}) - (V_{AIN-})]fC$ where $(V_{AIN+}) -$

(VAIN-) is the voltage between AIN+ and AIN-, f is either 256 or 32,768, and C is 32 pF. A typical input current for the higher ranges is 1.2 $\mu\text{A/V}$.

8) When reading the conversion data I get all zeroes no matter what the analog signal is. Please explain why.

A: Check the voltage between pins 19 and 20 (VREF+ and VREF-). If it is zero, the converter will compute all zeros because the digital output word represents the ratio of the input signal to the voltage reference.

9) Is calibration required to use the converter?

A: When the CS5525/26 is reset, the registers are set to known values. If the signal to be measured by the converter is within the nominal range, the converter can perform conversions without the need for calibrations. Errors in the system remain present when calibration is not performed, however, this may be acceptable if the errors are insignificant to the measurement or if the errors are removed by some other means, such as software and registers in the microcontroller.

10) How often do I need to recalibrate?

A: To answer this question one must ask: 1) What accuracy is required from the A/D converter? 2) What effects will temperature changes have upon the entire circuit, including components outside the A/D? To obtain optimum calibration accuracy, a calibration should be performed approximately one minute after power is applied to allow the chip to reach thermal equilibrium.

A higher accuracy measurement requirement will generally require calibrations more often, because, after the initial calibration has been performed, the converter is subject to some drift if the operating temperature changes. Typical offset drift and gain drift are given in the data sheet tables. The observed drift in the application circuit may be considerably greater due to parasitic thermocouple effects and gain drift caused by the limited tempco tracking of the external resistors. Once an estimate of drift is determined for the entire application circuit (drift will usually be dominated by error sources external to the converter), an assessment of

how it affects measurement accuracy as temperature changes can be made. Once the amount of drift is known, you can determine if a new calibration is required. A good rule of thumb is to recalibrate the converter (or system) with every ten degrees of ambient temperature change.

11) What do the numbers in the calibration registers actually mean?

A: There are two internal read/write calibration registers in the CS5525/26 (offset, and gain). One LSB in the offset register is 2^{-24} proportion of the input span (bipolar span is 2 times the unipolar span). The MSB in the offset register determines if the offset that is to be trimmed is either positive or negative. The converter can typically trim $\pm 50\%$ of the input span. The gain register spans from 0 to $(2 - 2^{-23})$. The decimal equivalent meaning of the gain register is:

$$D = b_0 2^0 + b_1 2^{-1} + b_2 2^{-2} + b_3 2^{-3} + \dots + b_N 2^{-N}$$

where the binary numbers have a value of either zero or one. After a gain calibration has been performed, the numeric value in the gain register should not exceed the range of 0.5 to 2.0 (decimal) [400000(Hex) to FFFFFFF(Hex)].

12) How can the gain be calibrated if a full-scale signal is not available?

A: The CS5525/26 can be gain calibrated with some input signal other than full scale. For example, when the converter is reset, the gain register's calibration word is 1.0 (decimal). If a signal representing ten percent of full scale reads three percent less than it should, the value in the gain register can be scaled up by three percent. Gain accuracy can be improved if output words are averaged while using this technique. Use caution when a calibration signal less than full scale is being used. If the transfer function of the transducer being used to generate the ten percent signal happens to have a major nonlinearity at the point at which calibration is being performed, it will cause the rest of the transfer function to be incorrect.

13) Why does the offset move when the CS5525/26 with a 2.5 V reference, is calibrated several times? What can be done to prevent this?

- A: The CS5526 is a 20-bit ADC with inherent Gaussian thermal and quantization noise associated with each conversion. Therefore, every time the converter is calibrated, a different offset calibration output has a chance of occurring. By averaging conversions, the peak-to-peak noise can be reduced by a factor of $1/\sqrt{n}$ (where n is the number of samples taken). The offset register can be accessed after calibration, and the offset uncertainty of a converter can almost be eliminated (to 1 code) by averaging. The CS5525 (16-bits) always has 1 count of variability, even if averaged, because the noise and calibration can occur at a boundary between two codes. If the calibration code is on the boundary the random noise could toggle the offset between the two codes.
- 14) Is a different calibration required for each gain setting?
- A: For maximum accuracy, calibrations should be performed for offset and gain for each gain setting. If a factory calibration is performed using a system calibration, the offset and gain register contents can be read by the system microcontroller and stored in EEPROM. These same calibration words can then be uploaded into the offset and gain registers of the converter when power is re-applied to the system, or when the gain range is changed.
- 15) What is the advantage of performing calibrations at lower output word rates?
- A: Calibrations are performed at the output word rate selected by the WR2-WR0 bits of the configuration register. Since higher word rates result in conversion words with more peak-to-peak noise, it is better to calibrate at lower output word rates. To minimize the digital noise near the device, the user should wait for each calibration step to be completed before reading or writing to the serial port.
- 16) How can I get the best noise performance from the CS5525/26?
- A: Use the bipolar mode or increase the reference voltage, since each of these increase the size of the LSB.



CS5525 CS5526 Ordering Information

17) If the charge pump is engaged, how do I ensure that the converter and its external components are intrinsically safe?

A: Intrinsic safety prohibits the use of electrolytic (or bipolar) capacitors thus limiting the use of certain size capacitors. Although a 10 μF cap. is recommended for the charge pump, two 0.47 μF ceramic caps in parallel can be used.

18) What benefit does an evaluation board offer?

A: The CDB5525/26 evaluation board saves time and money over prototyping. The preassembled board comes equipped with an 80C51 microcontroller and a 9-pin cable to link the evaluation board to a PC-compatible computer. The evaluation system also includes software which provides easy access to the internal registers of the converter and displays the converter's time domain, frequency domain and noise histogram performance.

Ordering Information

CS5525-AP	-40°C to +85°C	20-pin PDIP
CS5526-BP	-40°C to +85°C	20-pin PDIP
CS5525-AS	-40°C to +85°C	20-pin SSOP
CS5526-BS	-40°C to +85°C	20-pin SSOP

For further information on Crystal products, please visit our website "www.crystal.com" or call our literature department (800) 888-5016 ext. 3594 or (512) 912-3594 for data sheets and application notes.

Schematic & Layout Review Service

Confirm Optimum
Schematic & Layout
Before Building Your Board.

For Our Free Review Service
Call Applications Engineering.

Call : (5 1 2) 4 4 5 - 7 2 2 2



Application Note

Interfacing the CS5525/6/9 to the 80C51

By Keith Coffey

INTRODUCTION

This application note details the interface of Crystal Semiconductor's CS5525/6/9 Analog-to-Digital Converter (ADC) to an 80C51 microcontroller. This note takes the reader through a simple example describing how to communicate with the ADC. All algorithms discussed are included in the Appendix at the end of this note.

ADC DIGITAL INTERFACE

The CS5525/6/9 interfaces to the 80C51 through either a three-wire or a four-wire interface. Figure 1 depicts the interface between the two devices. Though this software was written to interface to Port 1 (P1) on the 80C51 with a four-wire interface, the algorithms can be easily modified to work with the three-wire format.

The ADC's serial port consists of four control lines: \overline{CS} , SCLK, SDI, and SDO.

\overline{CS} , Chip Select, is the control line which enables access to the serial port.

SCLK, Serial Clock, is the bit-clock which controls the shifting of data to or from the ADC's serial port.

SDI, Serial Data In, is the data signal used to transfer data from the 80C51 to the ADC.

SDO, Serial Data Out, is the data signal used to transfer output data from the ADC to the 80C51.

SOFTWARE DESCRIPTION

This note presents algorithms to initialize the 80C51 and the CS5525/6/9, perform self-offset calibration, modify the CS5525/6/9's gain register, and acquire a conversion. Figure 2 depicts a block

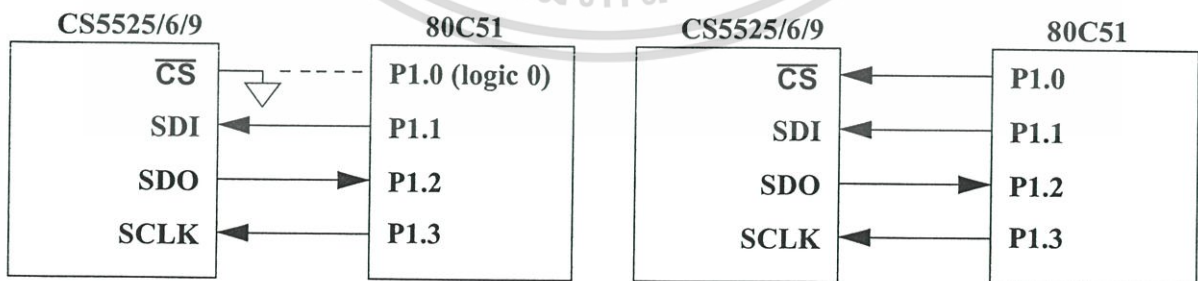


Figure 1. 3-Wire and 4-Wire Interfaces

diagram. While reading this application note, please refer to the **Appendix** for the code listing.

Initialize

Initialize is a subroutine that configures P1 (Port 1) on the 80C51 and places the CS5525/6/9 into the command-state. First, P1's data direction is configured as depicted in Figure 1 (for more information on configuring ports refer to 80C51 Data Sheet). After configuring the port, the controller enters a delay state to allow time for the CS5525/6/9's power-on-reset and oscillator to start-up (oscillator start-up time is typically 500ms). The last step is to reinitialize the serial port on the ADC (reinitializing the serial port is unnecessary here, the code was added for demonstration purposes only). This is implemented by sending the converter sixteen bytes of logic 1's followed by one final byte, with its LSB at logic 0. Once sent, the sequence places the serial port of the ADC into the command-state, where it awaits a valid command.

After retuning to *main*, the software demonstrates how to calibrate the converter's offset.

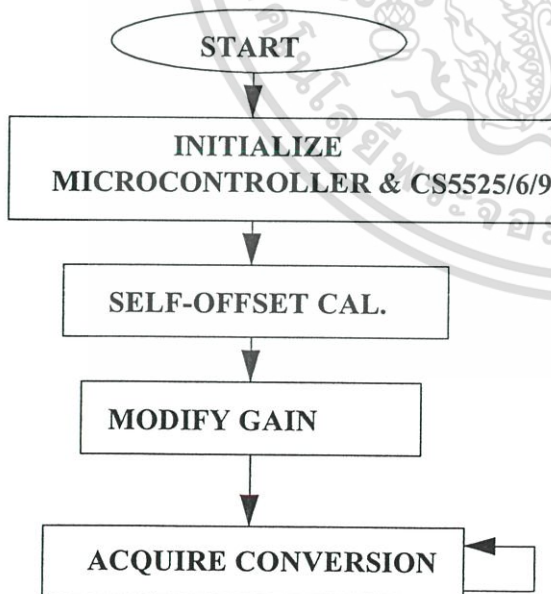


Figure 2. CS5525/6/9 Software Flowchart

Self-Offset Calibration

Calibrate is a subroutine that calibrates the converter's offset. *Calibrate* first sends 0x000001 (Hex) to the configuration register. This instructs the converter to perform a self-offset calibration. Then the Done Flag (DF) bit in the configuration register is polled until set. Once DF is set, it indicates that a valid calibration was performed. To minimize digital noise (while performing a calibration or a conversion), many system designers may find it advantageous to add a software delay equivalent to a conversion or calibration cycle before polling the DF bit.

Read/Write Gain Register

To modify the gain register the command-byte and data-byte variables are first initialized. Then the subroutine *write_to_register* uses these variables to set the contents of the gain register in the CS5525/6/9 to 0x800000 (HEX). To do this, *write_to_register* calls *transfer_byte* four times (once for the command byte and three additional times for the 24 bits of data). *Transfer_byte* is a subroutine used to 'bit-bang' a byte of information from the 80C51 to the CS5525/6/9. A byte is transferred one bit at a time, MSB (most significant bit) first, by placing a bit of information on P1.1 (SDI) and then pulsing P1.3 (SCLK). The byte is transferred by repeating this process eight times. Figure 3 depicts the timing diagram for the write-cycle in the CS5525/6/9's serial port. This algorithm demonstrates how to write to the gain register. It does not perform a gain calibration. To perform a gain calibration, follow the procedures outlined in the data sheet.

To verify that 0x800000(HEX) was written to the gain register, *read_register* is called. It duplicates the read-cycle timing diagram depicted in Figure 4. *Read_register* first asserts \overline{CS} . Then it calls *transfer_byte* once to transfer the command-byte to the CS5525/6/9. This places the converter into the

data-state where it waits until data is read from its serial port. *Read_register* then calls *receive_byte* three times and transfers three bytes of information from the CS5525/6/9 to the 80C51. Similar to *transfer_byte*, *receive_byte* acquires a byte one bit at a time MSB first. When the transfer is complete, the variables *high_byte*, *mid_byte*, and *low_byte* contain the CS5525/6/9's 24-bit gain register.

Acquire Conversion

To acquire a conversion the subroutine *acquire_conversion* is called. To prevent from corrupting the configuration register *acquire_conversion* first instructs the 80C51 to save the contents of configuration register. This information is stored in the variable *high_byte*,

mid_byte and *low_byte*. Then, PF (Port Flag, the fifth bit in the configuration register which is now represented as bit five in the variable *low_byte*) is masked to logic 1. When PF is set to logic 1, SDO's function is modified to fall to logic 0 signaling when a conversion is complete and ready to acquire (refer to Figure 5). After the PF is set, *acquire_conversion* sends the command-byte 0xC0 to the converter instructing it to perform a single conversion. From there, *acquire_conversion* calls the subroutine *toggle_sdo*. *Toggle_sdo* is routine that polls P1.2 (SDO) until its logic level drops to logic 0. After SDO falls, *toggle_sdo* pulses P1.3 (SCLK) eight times to clear the SDO signal flag. After the SDO flag is cleared, the 80C51 reads the conversion data word. Figure 6 depicts how 16-bit and 20-bit conversion words are stored.

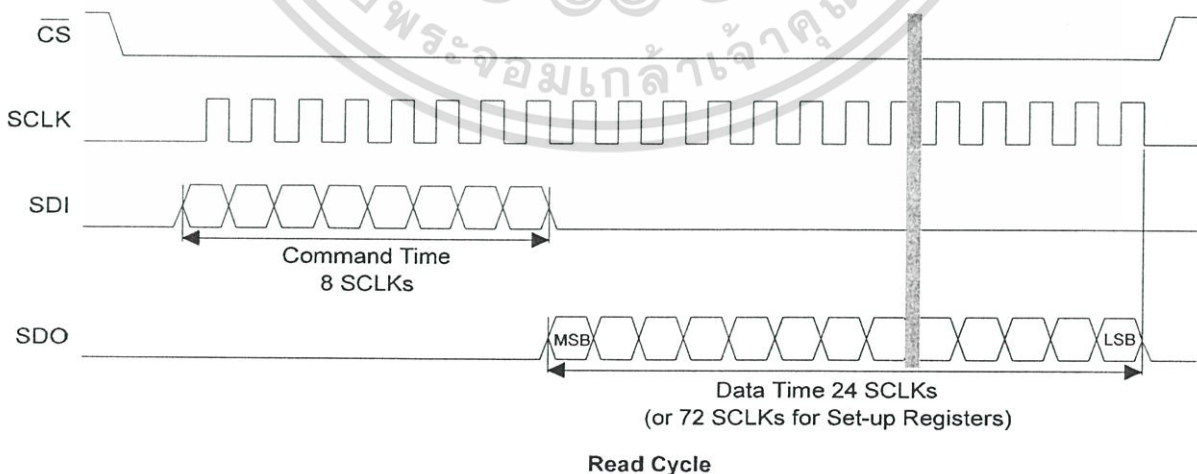
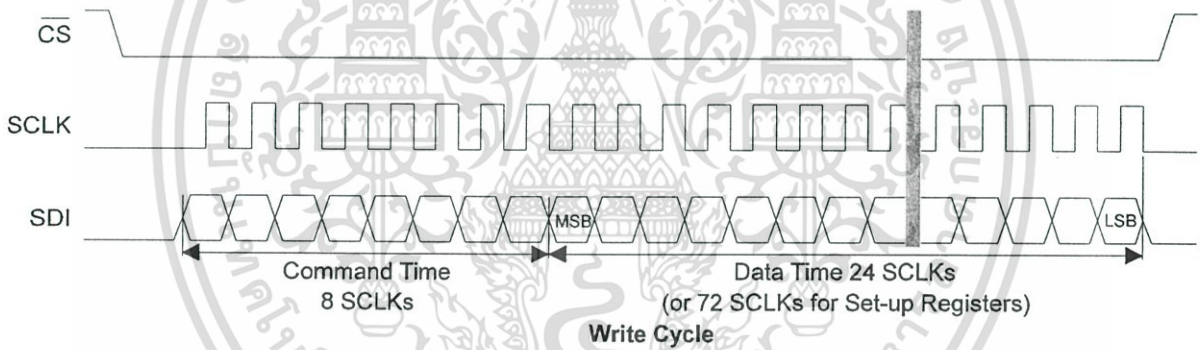
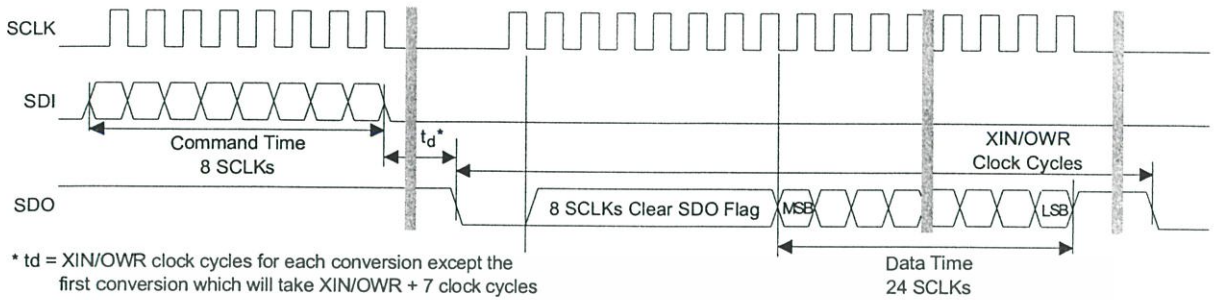


Figure 4. Read-Cycle Timing



Data SDO Continuous Conversion Read (PF bit = 1)

Figure 5. Conversion/Acquisition Cycle with PF Bit Asserted

An alternative method can be used to acquire a conversion. By clearing the Port Flag bit, the serial port's function isn't modified. The Done Flag bit (bit three in the configuration register) can be polled as it indicates when a conversion is complete and ready to acquire. The conversion is acquired by reading the conversion data register.

MAXIMUM SCLK RATE

A machine cycle in the 80C51 consists 12 oscillator periods or 1µs if the microcontroller's oscillator frequency is 12 MHz. Since the CS5525/6/9's maximum SCLK rate is 2MHz, additional no operation (NOP) delays may be necessary to reduce the transfer rate if the microcontroller system requires higher rate oscillators.

DEVELOPMENT TOOL DESCRIPTION

The code in the application note was developed using a software development package from Franklin Software, Inc. The code consists of intermixed C and assembler algorithms which are subsets of the algorithms used by the CDB5525/6/9, a customer

MSB								High-Byte												
D19	D18	D17	D16	D15	D14	D13	D12	D16	D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8	D7	D6	D5	D4
								Mid-Byte												
								Low-Byte												
D3	D2	D1	D0	0	0	OD	OF													

A) 20-Bit Conversion Data Word

MSB								High-Byte											
D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8	D11	D10	D9	D8	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
								Mid-Byte											
								Low-Byte											
1	1	1	1	0	0	OD	OF												

B) 16-Bit Conversion Data Word

0- always zero, 1- always one,

OD - Oscillation Detect, OF - Overflow

Figure 6. Bit Representation/Storage in PIC16F84

evaluation board from Crystal Semiconductor. Moreover, Franklin's A51 Assembler, C51 Compiler, and L51 Linker development software were used to generate the run-time software for the microcontroller on the CDB5526.

CONCLUSION

This application note presents an example of how to interface the CS5525/6/9 to the 80C51. It is divided into two main sections: hardware and software. The hardware interface illustrates both a three-wire and a four-wire interface. The three-wire is *SPITM* and *MICROWIRETM* compatible. The software, developed with development tools from Franklin Software, Inc., illustrates how to write to the ADC's internal register, read from the ADC's internal registers, and acquire a conversion. The software is modularized and illustrates the im-

portant subroutines, e.g. *write_byte*, *read_byte*, and *toggle_sdo*, each of which were written in assembly language. This allows both assembly and C programmers access to these modules.

The software described in the note is included in the **Appendix** at the end of this document.

SPITM is a trademark of Motorola.

MICROWIRETM is a trademark of National Semiconductor.





APPENDIX

80C51 Microcode to Interface to the CS5525/6/9

```

/*****
* File:      55268051.asm
* Date:      November 1, 1996
* Programmer: Keith Coffey
* Revision:   0
* Processor: 80C51
* Program entry point at routine "main".
*****/

* This program is designed as an example of interfacing a 80C51 to a CS5525/6/9
* Analog-to-Digital Converter. The program interfaces via Port 1 which controls the
* serial communications, calibration, and conversion signals.
*****/

/**** Function Prototypes ****/
void    initialize(void);
void    reset_converter(void);
void    toggle_sdo(void);
char    receive_byte(void);
void    transfer_byte(char);
void    write_to_register(char command,char low,char mid, char high);
void    read_register(char command);
void    acquire_conversion(char command);

/**** Byte Memory Map Equates ****/
sfr     P1      =      0x90;    /*Port One*/
sfr     ACC     =      0xE0;    /*Accumulator Register Equate*/

/**** Bit Memory Map Equates ****/
sbit    CS      =      0x90;    /* Chip Select, only used in four-wire mode*/
sbit    SDI     =      0x91;    /* Serial Data In*/
sbit    SDO     =      0x92;    /*Serial Data Out*/
sbit    SCLK    =      0x93;    /*Serial Clock*/

/**** Global Variable ****/
char    command,          /*Memory Storage Variable for Command Byte */
        high_byte,       /*Memory Storage Variable for Most Significant Byte*/
        mid_byte,        /* Memory Storage Variable for Most Significant Byte*/
        low_byte,        /* Memory Storage Variable for Most Significant Byte*/
        temp,            /*General Purpose Temporary Variable*/
        mode;           /*Variable Stores Mode of Operation 0 = three wire, 1 = 4 wire*/

```



```

/*****
*   Program Code
*****/
* Routine - Main
* Input   - none
* Output  - none
* This is the entry point to the program
*****/
main() {
    mode      = 1;          /*Make Communication be Four-Wire Mode*/
    initialize();          /*Call Routine to Initialize 80C51 and CS5525/6/9*/
    while(1){
        command      = 0x82;    /*Prepare to Write to Gain Register*/
        high_byte     = 0x80;    /*Make High_byte 80 (HEX)*/
        mid_byte      = 0x00;    /*Make Mid_byte all Zero's*/
        low_byte       = 0x00;   /*Make low_byte all Zero's*/
        write_to_register(command,low_byte,mid_byte,high_byte);/*Write to gain Register*/
        read_register(0x92);     /*Read Contents of Gain Register*/
        while(1){
            acquire_conversion(0xC0); /*Acquire a Single Conversion*/
        }/*End inner while loop*/
    }/*End While Loop*/
}/*end main*/

/*****Subroutines*****/
/*****
* Routine - initialize
* Input   - none
* Output  - none
* This subroutine initializes Port 1 for interfacing to the CS5525/6/9 ADC.
* It provides a time delay for oscillator start-up/wake-up period.
* A typical start-up time for a 32768 Hz crystal, due to high Q, is 500 ms.
* Also 1003 XIN clock cycles are allotted for the ADC's power on reset.
*****/
void initialize()
/***/ Local Variables ***/
    data int counter;
/***/ Body of Subroutine ***/
    /***/ Initialize 80C51's Port 1 ***/
    P1      =      0xF4;      /*SCLK - Output */
                                /*SDI  - Output */
                                /*SDO  - Input  */
                                /*CS   - Output */

    /*Initialize CS5525/6/9*/
    /*Delay 2048 SCLK Cycles, to allow time for Oscillator start-up and power on reset*/
    for(counter=0;counter<2047;counter++){
        SCLK      =      0x01;    /*Assert SCLK*/
        SCLK      =      0x00;    /*Deassert*/
    }

```



```

/*Reset Serial Port on CS5525/6/9*/
SDI    =    0x01;          /* Assert SDI*/
for(counter=0;counter<255;counter++) {
    SCLK = 0x01;          /* Assert SCLK*/
    SCLK = 0x00;          /* Deassert SCLK*/
}
SDI    =    0x00;          /* Deassert SDI PIN*/
SCLK   =    0x01;          /* Assert SCLK*/
SCLK   =    0x00;          /* Deassert SCLK*/
}
/*****
* Routine - calibrate
* Input   - none
* Output  - none
* This subroutine instructs the CS5525/6/9 to perform self-offset calibration.
*****/
void    calibrate()
{
    write_to_register(0x84,0x01,0x00,0x00); /* Assert RS bit*/

    /*Read Configuration Register Until DF Bit is Asserted*/
    do {
        read_register(0x94); /*Read Configuration Register*/
        temp    = low_byte&0x08; /*Mask DF bit to 1*/
    } while (temp != 0x08);
    read_register(0x92); /*Deasserts DF Bit*/
}/*End calibrate */

/*****
* Routine - write_to_register
* Input   - command, lowbyte, midbyte, highbyte
* Output  - none
* This subroutine instructs the CS5525/6/9 to write to an internal register.
*****/
void    write_to_register(char command,char low,char mid,char high){
    if(mode == 1) P1 = 0xF4; /*Assert CS if necessary*/
    transfer_byte(command); /*Transfer Command Byte to CS5525/6/9*/
    transfer_byte(high); /*Transfer High Byte to CS5525/6/9*/
    transfer_byte(mid); /*Transfer Middle Byte to CS5525/6/9*/
    transfer_byte(low); /*Transfer Low Byte to CS5525/6/9*/
    if(mode == 1) P1 = 0xF5; /*Deassert CS if necessary*/
}

```



```

/*****
* Routine - read_register
* Input   - command
* Output  - low_byte, mid_byte, high_byte
*
* This subroutine reads an internal register of the ADC
*****/
void read_register(char command){
    if(mode == 1) P1 = 0xF4;          /*Assert CS if necessary */
    transfer_byte(command);          /*Transfer Command Byte to CS5525/6/9*/
    high_byte = receive_byte();      /*Receive Command Byte from CS5525/6/9*/
    mid_byte  = receive_byte();      /*Receive Command Byte from CS5525/6/9*/
    low_byte  = receive_byte();      /*Receive Command Byte from CS5525/6/9*/
    if(mode == 1) P1 = 0xF5;          /*Deassert CS if necessary */
}

/*****
* Routine - acquire_conversion
* Input   - command
* Output  - Conversion results in memory locations HIGHBYTE, MIDBYTE and
*          LOWBYTE. This algorithm performs only single conversions. If
*          continuous conversions are needed the routine needs to be
*          modified. Port flag is zero.
*
*          HIGHBYTE   MIDBYTE   LOWBYTE
*          7 6 5 4 3 2 1 0 7 6 5 4 3 2 1 0 7 6 5 4 3 2 1 0
*
* 16-bit results MSB                               LSB 1 1 1 1 0 0 OD OF
* 20-bit results MSB                               LSB 0 0 OD OF
* This subroutine initiates a single conversion.
*****/
void acquire_conversion(char command){
    /*** Read Configuration Register to Prevent Previously Set Bits from being Altered ***/
    read_register(0x94);              /*Read Configuration Register*/
    low_byte = low_byte|0x20;         /*Assert Port Flag Bit*/
    write_to_register(0x84,low_byte, mid_byte, high_byte);/*Actually Send Commands*/

    /*Acquire a Conversion*/
    if(mode == 1) P1 = 0xF4;          /*Assert CS if necessary*/
    transfer_byte(0xC0);              /*Transfer Command to CS5525/6/9*/
    toggle_sdo();                    /*Clear SDO*/
    high_byte = receive_byte();      /*Receive Command Byte from CS5525/6/9*/
    mid_byte  = receive_byte();      /*Receive Command Byte from CS5525/6/9*/
    low_byte  = receive_byte();      /*Receive Command Byte from CS5525/6/9*/
    if(mode == 1) P1 = 0xF5;          /*Deassert CS if necessary*/
}

```



```

*****
;* Routine - RECEIVE_BYTE
;* Input   - none
;* Output  - Byte received is placed in R7
;* Description - This routine moves 1 byte from the CS5525/6/9 to the 80C51.
;            It transfers the byte by acquiring the logic level on PORT1 BIT 2
;            It then pulses SCLK high and then back low again
;            to advance the A/D's serial output shift register to the next bit.
;            It does this eight times to acquire one complete byte.
;            This function's prototype in C is: char receive_byte(void);
;Note:      This routine can be used three time consecutively to transfer all 24 bits
;            from the internal registers of the CS5525/6/9.
*****
$DEBUG
USING 0                ; Use register bank 0
TCOD SEGMENT CODE     ; Define ROU7 as a segment of code
PUBLIC RECEIVE_BYTE   ; Make subroutine global
RSEG TCOD              ; Make code relocatable
RECEIVE_BYTE:
    MOV     R1,#08      ; Set count to 8 to receive byte

LOOP:
    MOV     C,P1.2      ; Receive the byte
    RLC     A           ; Move bit to carry
    SETB   P1.3        ; Rotate A in preparation for next bit
    CLR    P1.3        ; Set SCLK
    CLR    P1.3        ; Clear SCLK
    DJNZ   R1,LOOP     ; Decrement byte, repeat loop if not zero
    MOV    R7,A        ; Byte to be return is placed in R7
    RET              ; Exit subroutine
END

```



```

;*****
;* Routine - TRANSFER_BYTE
;* Input   - byte to be transferred
;* Output  - None
;* Description - This subroutine transfers 1 byte to the CS5525/6/9
;               It transfers the byte by first placing a bit in PORT1 BIT 1.
;               It then pulses the SCLK to advance the A/D's serial
;               output shift register to the next bit.
;               It does this eight times to transmit one complete byte.
;               The function prototype is: void TRANSFER_BYTE(char);
;Note:      This routine can be used three time consecutively to transfer all 24 bits
;           from the 80C51 to the internal registers of the CS5525/6/9.
;*****
$DEBUG
USING 0
TCOD SEGMENT CODE ; Use register bank 0
TDAT SEGMENT DATA ; Make TCOD a segment of code
PUBLIC TRANSFER_BYTE ; Make subroutine global
PUBLIC ?TRANSFER_BYTE?BYTE ; Make subroutine global
RSEG TDAT ; Make code relocatable
?TRANSFER_BYTE?BYTE:
VAR: DS 1 ; Define a storage location
RSEG TCOD ; Make code relocatable
TRANSFER_BYTE:
    MOV A,VAR ; Move byte to be transmitted to ACC
    MOV R1,#08 ; Set count to 8 to transmit byte
    CLR P1.3 ; Clear SCLK

loop: ; Send Byte
    RLC A ; Rotate Accumulator, send MSB 1st
    MOV P1.1,C ; Transmit MSB first through C bit
    SETB P1.3 ; Set SCLK
    CLR P1.3 ; Clear SCLK
    DJNZ R1,loop ; Decrement byte, repeat loop if not zero
    CLR P1.1 ; Reset SDI to zero when not transmitting
    RET ; Exit subroutine
END

```

```

*****
;* Routine - TOGGLE_SDO
;* Input   - none
;* Output  - none
;* Description - This routine reset the DRDY pin by toggling
;*             SCLK 8 times after SDO falls.
;*             This routine polls SDO, waits for it to be asserted, then clears SDO
;*             for next conversion by pulsing SCLK eight times after SDO falls
;*             This functions prototype in C is: void toggle_sdo(void);
*****
$DEBUG
USING 0                ; Use register bank 0
TCOD SEGMENT CODE     ; Define Rout as a segment of code
PUBLIC TOGGLE_SDO     ; Make subroutine public
RSEG TCOD              ; Make code relocatable
TOGGLE_SDO:
    MOV R1,#08         ; Setup counter
    CLR P1.1           ; Clear SDI
    JB P1.2,$          ; Poll SDO

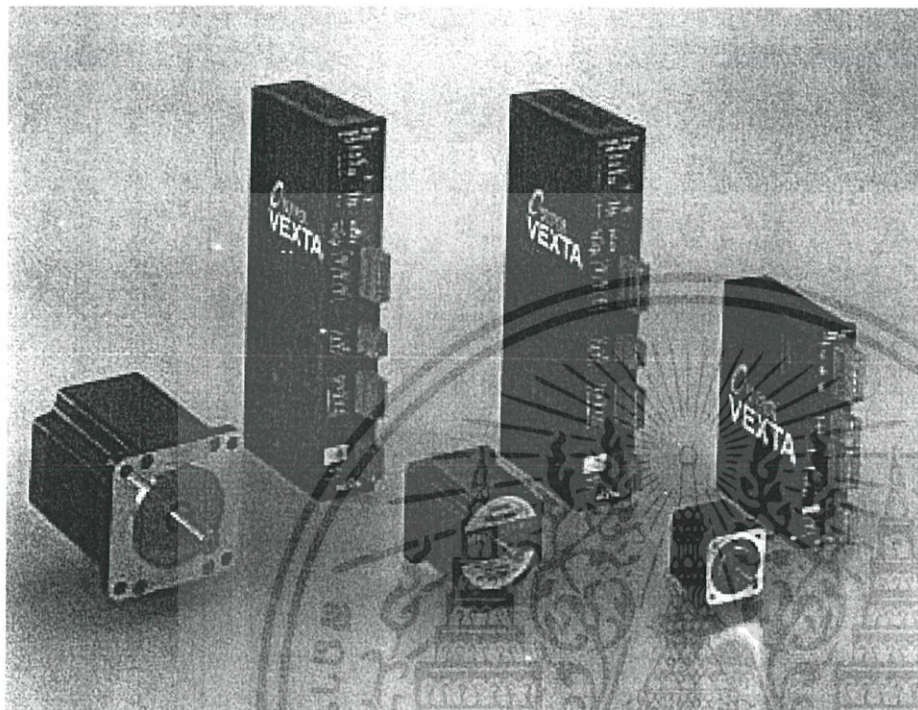
loop:
    SETB P1.3          ; Set SCLK
    CLR P1.3           ; Clear SCLK
    DJNZ R1,loop       ; Decrement byte, repeat loop if not zero
    RET                ; Exit Subroutine
END

```

ORIENTAL MOTOR GENERAL CATALOG

B

STEPPING MOTORS



5-PHASE HIGH-TORQUE STEPPING MOTOR AND DRIVER PACKAGE

UPK Series

Standard and High-Speed Types.....B-108
 List of Motor and Driver CombinationsB-117
 Wiring Diagram.....B-118
 Description of Input/Output Signals.....B-119

5-STEP

UPK•W

UPK

UPK•W

PMU

RFK

CSK

PMC

UMK

CSK

Controllers

2φ Stepping Motors

Low-Speed Synchronous Motors

Accessories

5φ with AC Driver

5φ with DC Driver

2φ with Driver

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

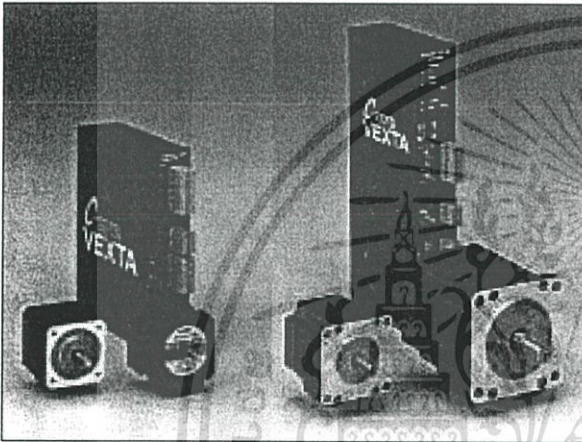
UPK Standard Type

UPK High-Speed Type



The **UPK** series consists of a high-torque step motor and a high performance driver with vibration control circuitry to minimize mid-frequency resonance.

The **UPK** series can satisfy the requirement of any applications requiring compact, smooth and quiet operation.



■ FEATURES

● Standard Type

The **UPK** standard type is available in three mounting sizes.
Motor size: 1.65in. (42mm) sq. 2.36in. (60mm) sq.
3.35in. (85mm) sq.

Holding Torque: 18 oz-in (0.13N·m) — 874 oz-in (6.3N·m)

● High-Speed Type

High-speed type is suitable for applications requiring higher speed operation.

■ ACCESSORIES (Sold separately)

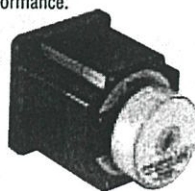


● Motor Mounting Brackets
Page B-298



● Clean Dampers
Page B-300

Effective at suppressing motor vibration and improving performance.



● Flexible Couplings
Page B-301

MC Motor Couplings



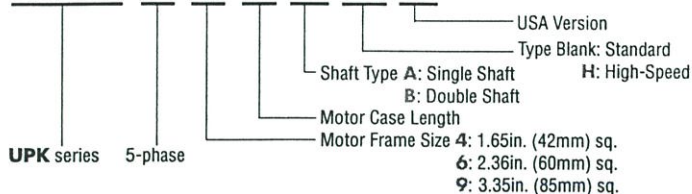
● Extension Cables
Page B-306

16.4 feet (5m), 32.8 feet (10m),
65.6 feet (20m) long



■ PRODUCT NUMBER CODE

UPK 5 6 9 A □ A



■ SPECIFICATIONS STANDARD TYPE

Package Model	Single Shaft	UPK543AA	UPK544AA	UPK545AA	UPK564AA	UPK566AA	UPK569AA
	Double Shaft	UPK543BA	UPK544BA	UPK545BA	UPK564BA	UPK566BA	UPK569BA
Maximum Holding Torque	oz-in	18	24.9	33.3	58.3	115	230
	N · m	0.13	0.18	0.24	0.42	0.83	1.66
Rotor Inertia	oz-in ²	0.192	0.296	0.372	0.96	1.53	3.07
	kg · m ²	35×10 ⁻⁷	54×10 ⁻⁷	68×10 ⁻⁷	175×10 ⁻⁷	280×10 ⁻⁷	560×10 ⁻⁷
Rated Current	A/phase	0.75			1.4		
Basic Step Angle	0.72°						
Insulation Class	Class B [266°F (130°C)]						
Power Source	100V/115V±15% AC		50/60Hz	1.1A maximum	100V/115V±15% AC	50/60Hz	4.8A maximum
Output Current	A/phase	0.75			1.4		
Excitation Mode	<ul style="list-style-type: none"> • Full Step (4 phase excitation): 0.72°/step • Half Step (4-5 phase excitation): 0.36°/step 						
Input Signals	Input Signal Circuit	Photocoupler input, Input resistance 220Ω, Input current 20mA maximum Signal voltage Photocoupler ON: +4~+5V, Photocoupler OFF: 0~+0.5V					
	• Pulse Signal (CW Pulse Signal)	Step command pulse signal (CW step command signal at 2-pulse input mode) Pulse width: 5μs minimum, Pulse rise/fall: 2μs maximum Motor moves when the photocoupler state changes from ON to OFF.					
	• Rotation Direction Signal (CCW Pulse Signal)	Rotation direction signal, Photocoupler ON: CW, Photocoupler OFF: CCW (CCW step command signal at 2-pulse input mode, Pulse width: 5μs minimum, Pulse rise/fall: 2μs maximum Motor moves when the photocoupler state changes from ON to OFF.)					
• All Windings Off Signal	When in the "photocoupler ON" state, the current to the motor is cut off and the motor shaft can be rotated manually. When in the "photocoupler OFF" state, the current level set by the RUN switch is supplied to the motor.						
Output Signals	Output Signal Circuit	Photocoupler: open collector output (emitter common) External use condition DC24V maximum, 10mA minimum					
	• Excitation Timing Signal	The signal is output every time the excitation sequence returns to the initial stage "0". (Photocoupler: ON) Full step: signal output every 10 pulses, Half step: signal output every 20 pulses					
	• Overheat Signal	The signal is output when the internal temperature of the driver rises above approximately 176°F (80°C). (Photocoupler: ON) The motor stops automatically if the "Automatic Current Off" function is ON.					
Functions	Automatic current down, All windings off, Self-test, Pulse input method switch, Step angle switch, Overheat output logic switch.						
Indicators (LED)	Power source input, Pulse input, CW/CCW input, All windings off input, Excitation timing output, Overheat output						
Driver Cooling Method	Natural Ventilation						
Weight (Mass)	Motor lb. (kg)	0.56 (0.25)	0.67 (0.3)	0.89 (0.4)	1.33 (0.6)	1.77 (0.8)	2.87 (1.3)
	Driver lb. (kg)	1 (0.45)			1.99 (0.9)		
Insulation Resistance	Motor	100MΩ minimum under normal temperature and humidity, when measured by a DC500V megger between the motor coils and the motor casing.					
	Driver	100MΩ minimum under normal temperature and humidity, when measured by a DC500V megger between the case and power input terminal, case and signal input/output terminal, power input terminal and signal input/output terminal.					
Dielectric Strength	Motor	Sufficient to withstand 1.0kV (0.5kV for UPK54□ type), 60Hz applied between the motor coils and casing for one minute, under normal temperature and humidity.					
	Driver	Sufficient to withstand 1.0kV, 60Hz applied between the case and power input terminal, case and signal input/output terminal power input terminal, and signal input/output terminal for one minute, under normal temperature and humidity.					
Ambient Temperature Range	Motor	+14°F~+122°F (-10°C~+50°C)					
	Driver	+32°F~+122°F (0°C~+50°C)					

•Maximum holding torque refers to the holding torque at motor standstill when the rated current is supplied to the motor (5 phase excitation). Use this value to compare motor torque performance. When using the motor with the included driver, the driver's "Automatic Current Cutback" function at motor standstill reduces maximum holding torque by approximately 50%.

•The power source input current value represents the maximum current. (The input current varies according to the pulse frequency.)

Note: Do not measure insulation resistance or perform the dielectric strength test while the motor and driver are connected for UPK54□ type.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

■ SPECIFICATIONS STANDARD TYPE

Package Model	Single Shaft	UPK596AA	UPK599AA	UPK5913AA
	Double Shaft	UPK596BA	UPK599BA	UPK5913BA
Maximum Holding Torque	oz-in	291	569	874
	N · m	2.1	4.1	6.3
Rotor Inertia	oz-in ²	7.66	14.8	21.9
	kg · m ²	1400×10 ⁻⁷	2700×10 ⁻⁷	4000×10 ⁻⁷
Rated Current	A/phase	1.4		
Basic Step Angle	0.72°			
Insulation Class	Class B [(266°F (130°C))]			
Power Source	100V/115V±15% AC 50/60Hz 4.8A maximum			
Output Current	A/phase	1.4		
Excitation Mode	<ul style="list-style-type: none"> • Full Step (4 phase excitation): 0.72°/step • Half Step (4-5 phase excitation): 0.36°/step 			
Input Signals	Input Signal Circuit	Photocoupler input, Input resistance 220Ω, Input current 20mA maximum Signal voltage Photocoupler ON: +4~+5V, Photocoupler OFF: 0~+0.5V		
	• Pulse Signal (CW Pulse Signal)	Step command pulse signal (CW step command signal at 2-pulse input mode) Pulse width: 5μs minimum, Pulse rise/fall: 2μs maximum Motor moves when the photocoupler state changes from ON to OFF.		
	• Rotation Direction Signal (CCW Pulse Signal)	Rotation direction signal, Photocoupler ON: CW, Photocoupler OFF: CCW (CCW step command signal at 2-pulse input mode, Pulse width: 5μs minimum, Pulse rise/fall: 2μs maximum Motor moves when the photocoupler state changes from ON to OFF.)		
	• All Windings Off Signal	When in the 'photocoupler ON' state, the current to the motor is cut off and the motor shaft can be rotated manually. When in the 'photocoupler OFF' state, the current level set by the RUN switch is supplied to the motor.		
Output Signals	Output Signal Circuit	Photocoupler- open collector output (emitter common) External use condition DC24V maximum, 10mA minimum		
	• Excitation Timing Signal	The signal is output every time the excitation sequence returns to the initial stage '0'. (Photocoupler: ON) Full step: signal output every 10 pulses, Half step: signal output every 20 pulses		
	• Overheat Signal	The signal is output when the internal temperature of the driver rises above approximately 176°F (80°C). (Photocoupler: ON) The motor stops automatically if the 'Automatic Current Off' function is ON.		
Functions	Automatic current down, All windings off, Self-test, Pulse input method switch, Step angle switch, Overheat output logic switch.			
Indicators (LED)	Power source input, Pulse input, CW/CCW input, All windings off input, Excitation timing Output, overheat output			
Driver Cooling Method	Natural Ventilation			
Weight (Mass)	Motor lb. (kg)	3.75 (1.7)	6.18 (2.8)	8.38 (3.8)
	Driver lb. (kg)	1.99 (0.9)		
Insulation Resistance	Motor	100MΩ minimum under normal temperature and humidity, when measured by a DC500V megger between the motor coils and the motor casing.		
	Driver	100MΩ minimum under normal temperature and humidity, when measured by a DC500V megger between the case and power input terminal, case and signal input/output terminal, power input terminal and signal input/output terminal.		
Dielectric Strength	Motor	Sufficient to withstand 1.0kV, 60Hz applied between the motor coils and casing for one minute, under normal temperature and humidity.		
	Driver	Sufficient to withstand 1.0kV, 60Hz applied between the case and power input terminal, case and signal input/output terminal power input terminal, and signal input/output terminal for one minute, under normal temperature and humidity.		
Ambient Temperature Range	Motor	+14°F~+122°F (-10°C~+50°C)		
	Driver	+32°F~+122°F (0°C~+50°C)		

■Maximum holding torque refers to the holding torque at motor standstill when the rated current is supplied to the motor (5 phase excitation). Use this value to compare motor torque performance. When using the motor with the included driver, the driver's 'Automatic Current Cutback' function at motor standstill reduces holding torque by approximately 50%.

■The power source input current value represents the maximum current. (The input current varies according to the pulse frequency.)

HIGH-SPEED TYPE

Package Model	Single Shaft	UPK569AHA	UPK596AHA	UPK599AHA	UPK5913AHA
	Double Shaft	UPK569BHA	UPK596BHA	UPK599BHA	UPK5913BHA
Maximum Holding Torque	oz-in	230	291	569	874
	N · m	1.66	2.1	4.1	6.3
Rotor Inertia	oz-in ²	3.07	7.66	14.8	21.9
	kg · m ²	560×10 ⁻⁷	1400×10 ⁻⁷	2700×10 ⁻⁷	4000×10 ⁻⁷
Rated Current	A/phase	2.8			
Basic Step Angle	0.72°				
Insulation Class	Class B [(266°F (130°C))]				
Power Source	100V/115V±15% AC 50/60Hz 7.5A maximum				
Output Current	A/phase	2.8			
Excitation Mode	<ul style="list-style-type: none"> • Full Step (4 phase excitation): 0.72°/step • Half Step (4-5 phase excitation): 0.36°/step 				
Input Signals	Input Signal Circuit	Photocoupler input, Input resistance 220Ω, Input current 20mA maximum Signal voltage Photocoupler ON: +4~+5V, Photocoupler OFF: 0~+0.5V			
	• Pulse Signal (CW Pulse Signal)	Step command pulse signal (CW step command signal at 2-pulse input mode) Pulse width: 5μs minimum, Pulse rise/fall: 2μs maximum Motor moves when the photocoupler state changes from ON to OFF.			
	• Rotation Direction Signal (CCW Pulse Signal)	Rotation direction signal, Photocoupler ON: CW, Photocoupler OFF: CCW (CCW step command signal at 2-pulse input mode, Pulse width: 5μs minimum, Pulse rise/fall: 2μs maximum Motor moves when the photocoupler state changes from ON to OFF.)			
	• All Windings Off Signal	When in the "photocoupler ON" state, the current to the motor is cut off and the motor shaft can be rotated manually. When in the "photocoupler OFF" state, the current level set by the RUN switch is supplied to the motor.			
Output Signals	Output Signal Circuit	Photocoupler- open collector output (emitter common) External use condition DC24V maximum, 10mA minimum			
	• Excitation Timing Signal	The signal is output every time the excitation sequence returns to the initial stage "0". (Photocoupler: ON) Full step: signal output every 10 pulses, Half step: signal output every 20 pulses			
	• Overheat Signal	The signal is output when the internal temperature of the driver rises above approximately 176°F (80°C). (Photocoupler: ON) The motor stops automatically if the "Automatic Current Off" function is ON.			
Functions	Automatic current down, All windings off, Self-test, Pulse input method switch, Step angle switch, Overheat output logic switch.				
Indicators (LED)	Power source input, Pulse input, CW/CCW input, All windings off input, Excitation timing output, Overheat output				
Driver Cooling Method	Internal Fan				
Weight (Mass)	Motor lb. (kg)	2.87 (1.3)	3.75 (1.7)	6.18 (2.8)	8.38 (3.8)
	Driver lb. (kg)	2.65 (1.2)			
Insulation Resistance	Motor	100MΩ minimum under normal temperature and humidity, when measured by a DC500V megger between the motor coils and the motor casing.			
	Driver	100MΩ minimum under normal temperature and humidity, when measured by a DC500V megger between the case and power input terminal, case and signal input/output terminal, power input terminal and signal input/output terminal.			
Dielectric Strength	Motor	Sufficient to withstand 1.0kV, 60Hz applied between the motor coils and casing for one minute, under normal temperature and humidity.			
	Driver	Sufficient to withstand 1.0kV, 60Hz applied between the case and power input terminal, case and signal input/output terminal power input terminal, and signal input/output terminal for one minute, under normal temperature and humidity.			
Ambient Temperature Range	Motor	+14°F~+122°F (-10°C~+50°C)			
	Driver	+32°F~+122°F (0°C~+50°C)			

•Maximum holding torque refers to the holding torque at motor standstill when the rated current is supplied to the motor (5 phase excitation). Use this value to compare motor torque performance. When using the motor with the included driver, the driver's "Automatic Current Cutback" function at motor standstill reduces maximum holding torque by approximately 50%.

•The power source input current value represents the maximum current. (The input current varies according to the pulse frequency.)

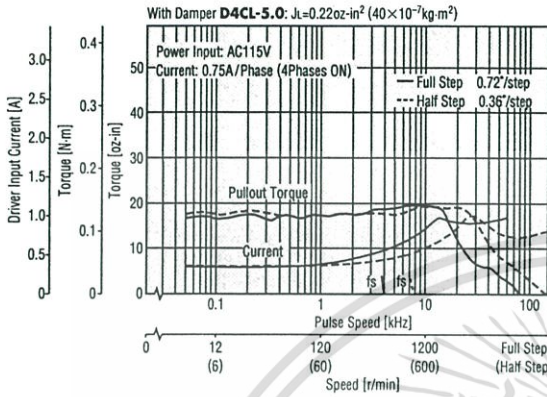
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

SPEED vs. TORQUE CHARACTERISTICS

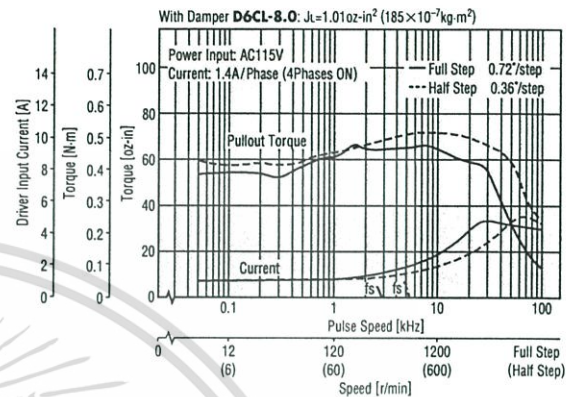
fs: Maximum Starting Pulse Rate

● **Standard Type**

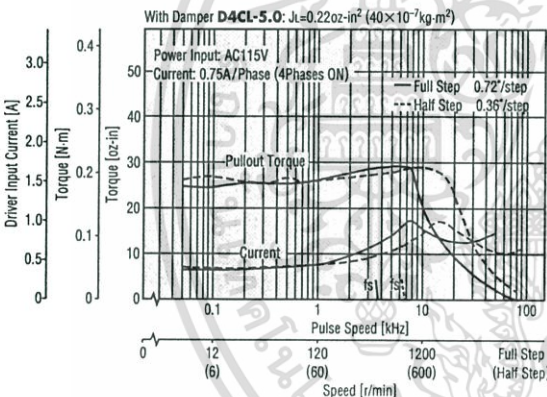
UPK543BA



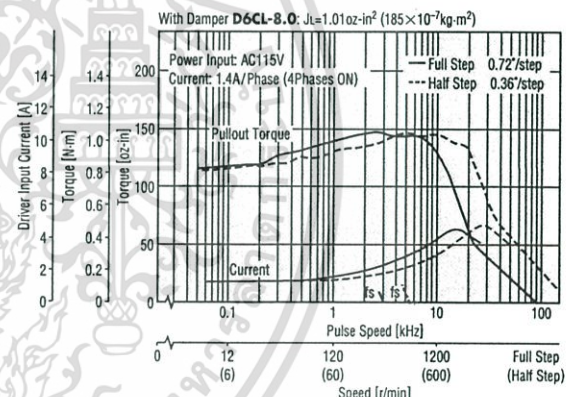
UPK564BA



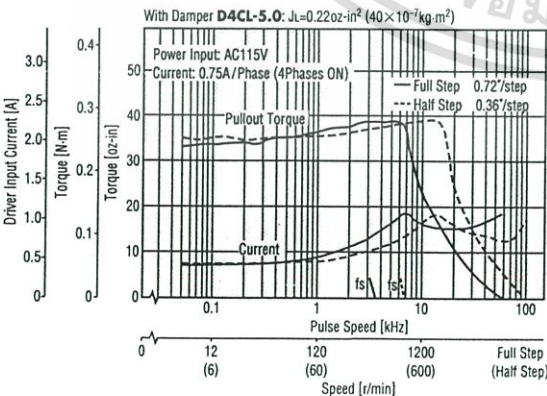
UPK544BA



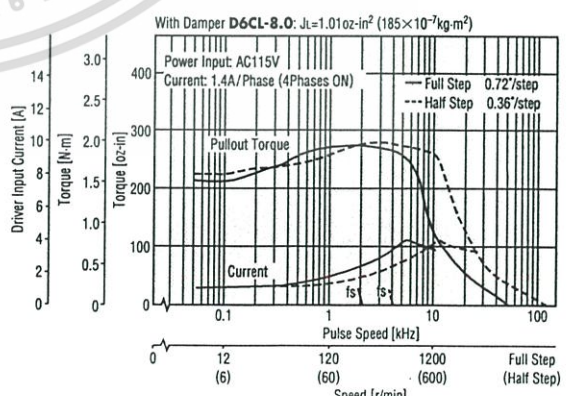
UPK566BA



UPK545BA



UPK569BA



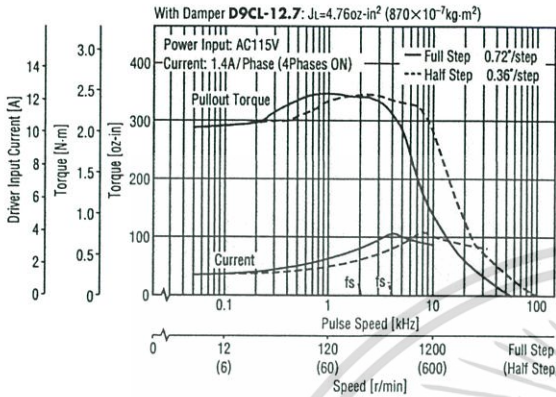
Note:

- Pay attention to heat dissipation from the motor and driver. The motor will produce a considerable amount of heat under certain conditions. Be sure to keep the temperature of the motor case under 212°F (100°C).
- When using the motor with the dedicated driver, the driver's "Automatic Current Cutback" function at motor standstill reduces maximum holding torque by approximately 50%.

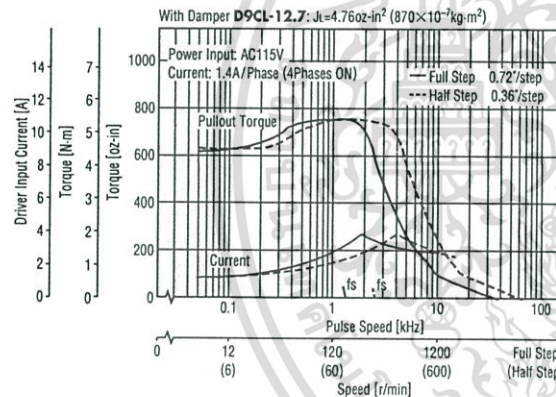
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

●Standard Type

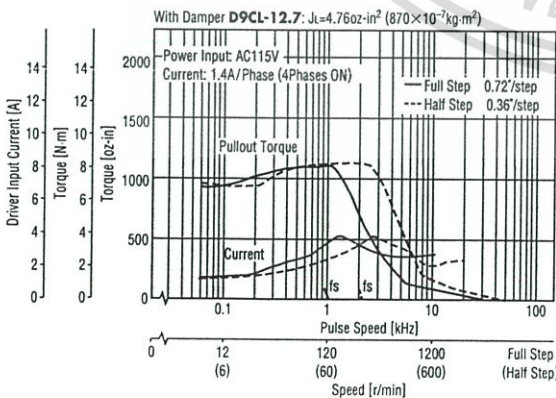
UPK596BA



UPK599BA

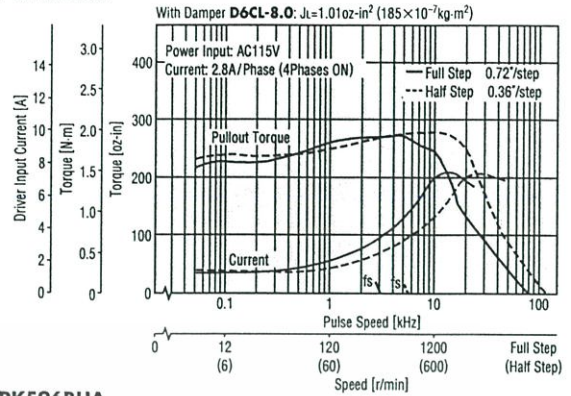


UPK5913BA

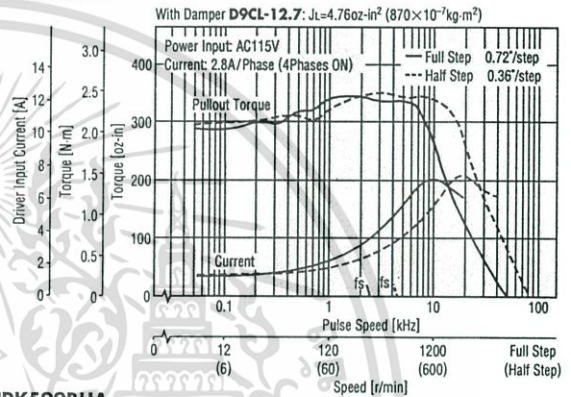


●High-Speed Type

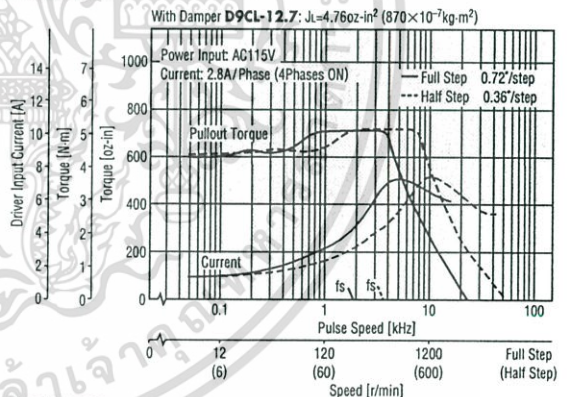
UPK569BHA



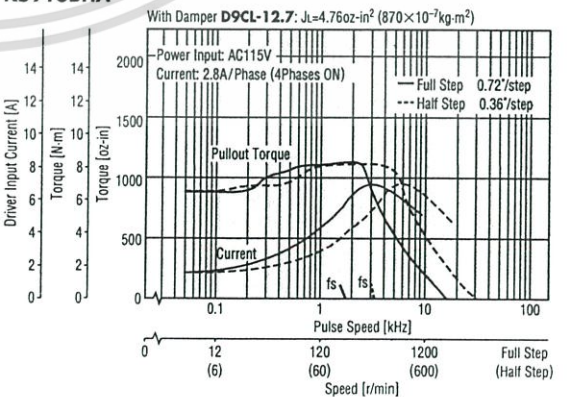
UPK596BHA



UPK599BHA



UPK5913BHA



Note:

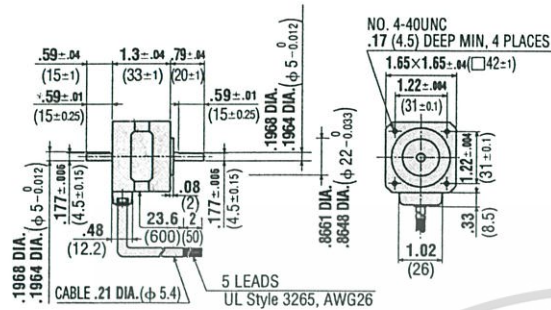
- Pay attention to heat dissipation from the motor and driver. The motor will produce a considerable amount of heat under certain conditions. Be sure to keep the temperature of the motor case under 212°F (100°C).
- When using the motor with the dedicated driver, the driver's "Automatic Current Cutback" function at motor standstill reduces maximum holding torque by approximately 50%.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 2000-2001 ORIENTAL MOTOR GENERAL CATALOG B-113

■ DIMENSIONS scale 1/4, unit = inch (mm)

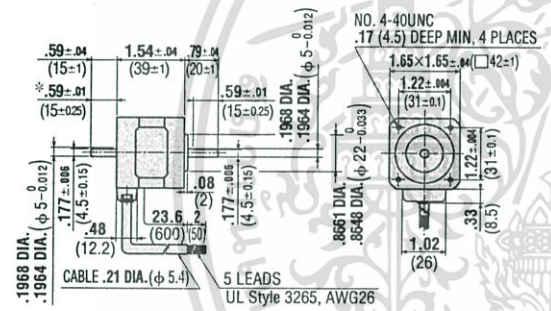
● Motor (Standard and High-Speed Type)

UPK543AA (Single shaft)
 Motor Model: PK543AUA Weight 0.56 lb. (Mass 0.25kg)
UPK543BA (Double shaft)
 Motor Model: PK543BUA Weight 0.56 lb. (Mass 0.25kg)



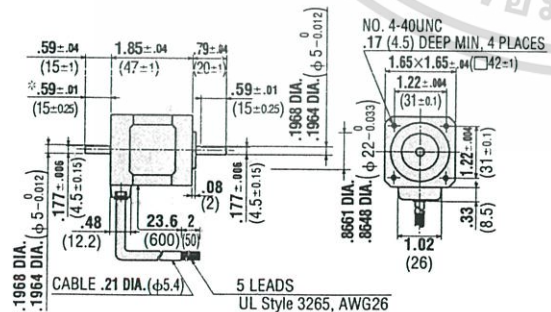
* .59±.01(15±0.25) indicates the length of milling on motor shaft.

UPK544AA (Single shaft)
 Motor Model: PK544AUA Weight 0.67 lb. (Mass 0.3kg)
UPK544BA (Double shaft)
 Motor Model: PK544BUA Weight 0.67 lb. (Mass 0.3kg)



* .59±.01(15±0.25) indicates the length of milling on motor shaft.

UPK545AA (Single shaft)
 Motor Model: PK545AUA Weight 0.89 lb. (Mass 0.4kg)
UPK545BA (Double shaft)
 Motor Model: PK545BUA Weight 0.89 lb. (Mass 0.4kg)

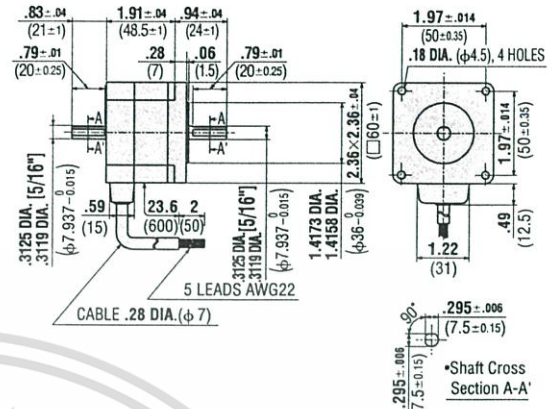


* .59±.01(15±0.25) indicates the length of milling on motor shaft.

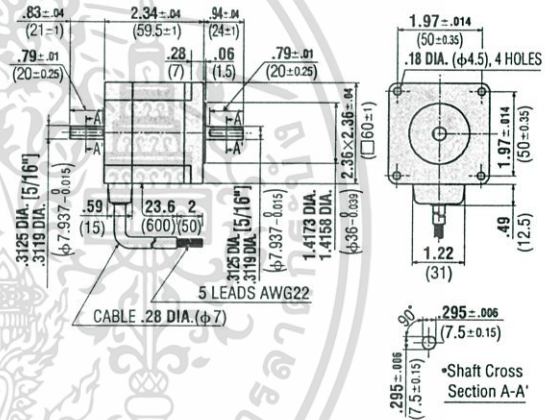
● These external appearance drawings are for double shaft models. For a single shaft, ignore the colored areas.

See page B-36 for information on motor installation.

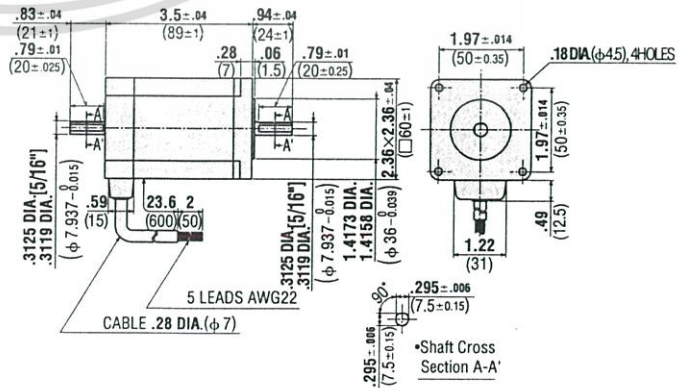
UPK564AA (Single shaft)
 Motor Model: PK564AUA Weight 1.33 lb. (Mass 0.6kg)
UPK564BA (Double shaft)
 Motor Model: PK564BUA Weight 1.33 lb. (Mass 0.6kg)



UPK566AA (Single shaft)
 Motor Model: PK566AUA Weight 1.77 lb. (Mass 0.8kg)
UPK566BA (Double shaft)
 Motor Model: PK566BUA Weight 1.77 lb. (Mass 0.8kg)

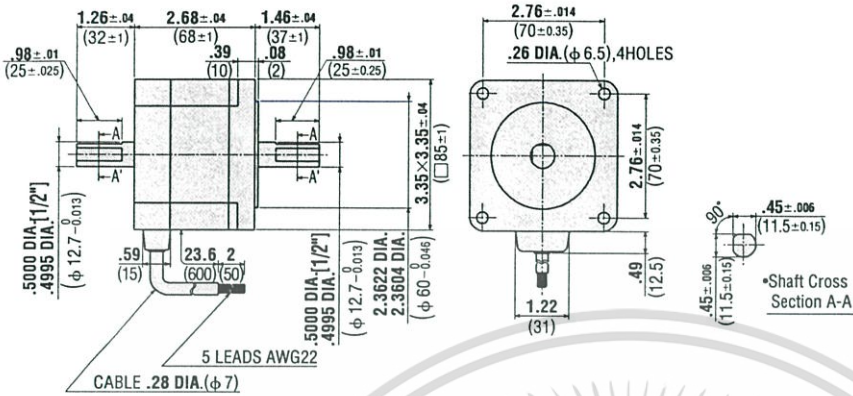


UPK569AA (Single shaft)
 Motor Model: PK569AUA Weight 2.87 lb. (Mass 1.3kg)
UPK569BA (Double shaft)
 Motor Model: PK569BUA Weight 2.87 lb. (Mass 1.3kg)
UPK569AHA (Single shaft)
 Motor Model: PK569AUHA Weight 2.87 lb. (Mass 1.3kg)
UPK569BHA (Double shaft)
 Motor Model: PK569BUHA Weight 2.87 lb. (Mass 1.3kg)



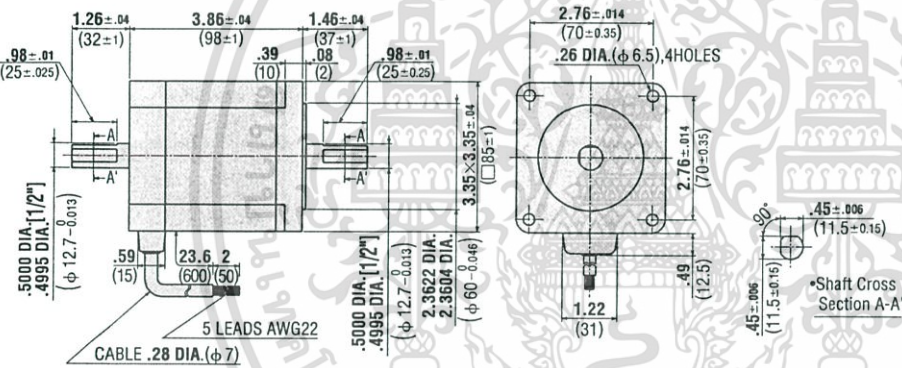
UPK596AA (Single shaft)
 Motor Model: PK596AUA Weight 3.75 lb. (Mass 1.7kg)
UPK596BA (Double shaft)
 Motor Model: PK596BUA Weight 3.75 lb. (Mass 1.7kg)

UPK596AHA (Single shaft)
 Motor Model: PK596AUHA Weight 3.75 lb. (Mass 1.7kg)
UPK596BHA (Double shaft)
 Motor Model: PK596BUHA Weight 3.75 lb. (Mass 1.7kg)



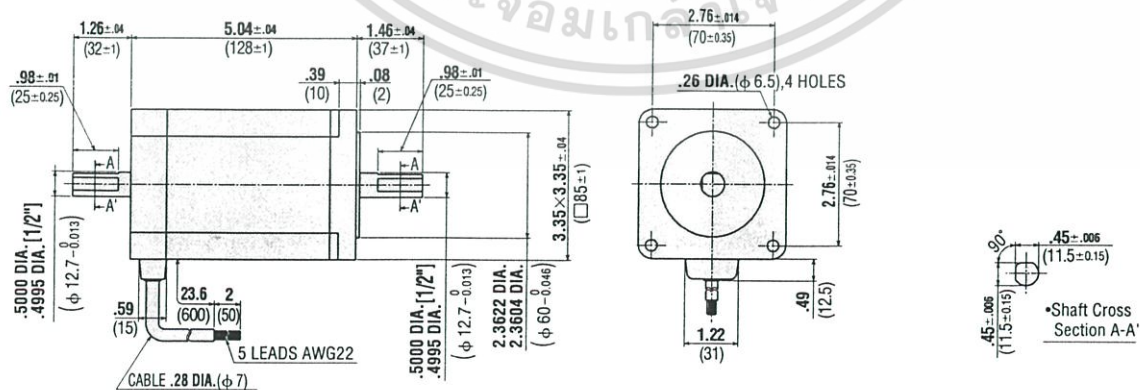
UPK599AA (Single shaft)
 Motor Model: PK599AUA Weight 6.18 lb. (Mass 2.8kg)
UPK599BA (Double shaft)
 Motor Model: PK599BUA Weight 6.18 lb. (Mass 2.8kg)

UPK599AHA (Single shaft)
 Motor Model: PK599AUHA Weight 6.18 lb. (Mass 2.8kg)
UPK599BHA (Double shaft)
 Motor Model: PK599BUHA Weight 6.18 lb. (Mass 2.8kg)



UPK5913AA (Single shaft)
 Motor Model: PK5913AUA Weight 8.38 lb. (Mass 3.8kg)
UPK5913BA (Double shaft)
 Motor Model: PK5913BUA Weight 8.38 lb. (Mass 3.8kg)

UPK5913AHA (Single shaft)
 Motor Model: PK5913AUHA Weight 8.38 lb. (Mass 3.8kg)
UPK5913BHA (Double shaft)
 Motor Model: PK5913BUHA Weight 8.38 lb. (Mass 3.8kg)



*These external appearance drawings are of double shaft models. For a single shaft, ignore the colored areas.

See page B-36 for information on motor installation.

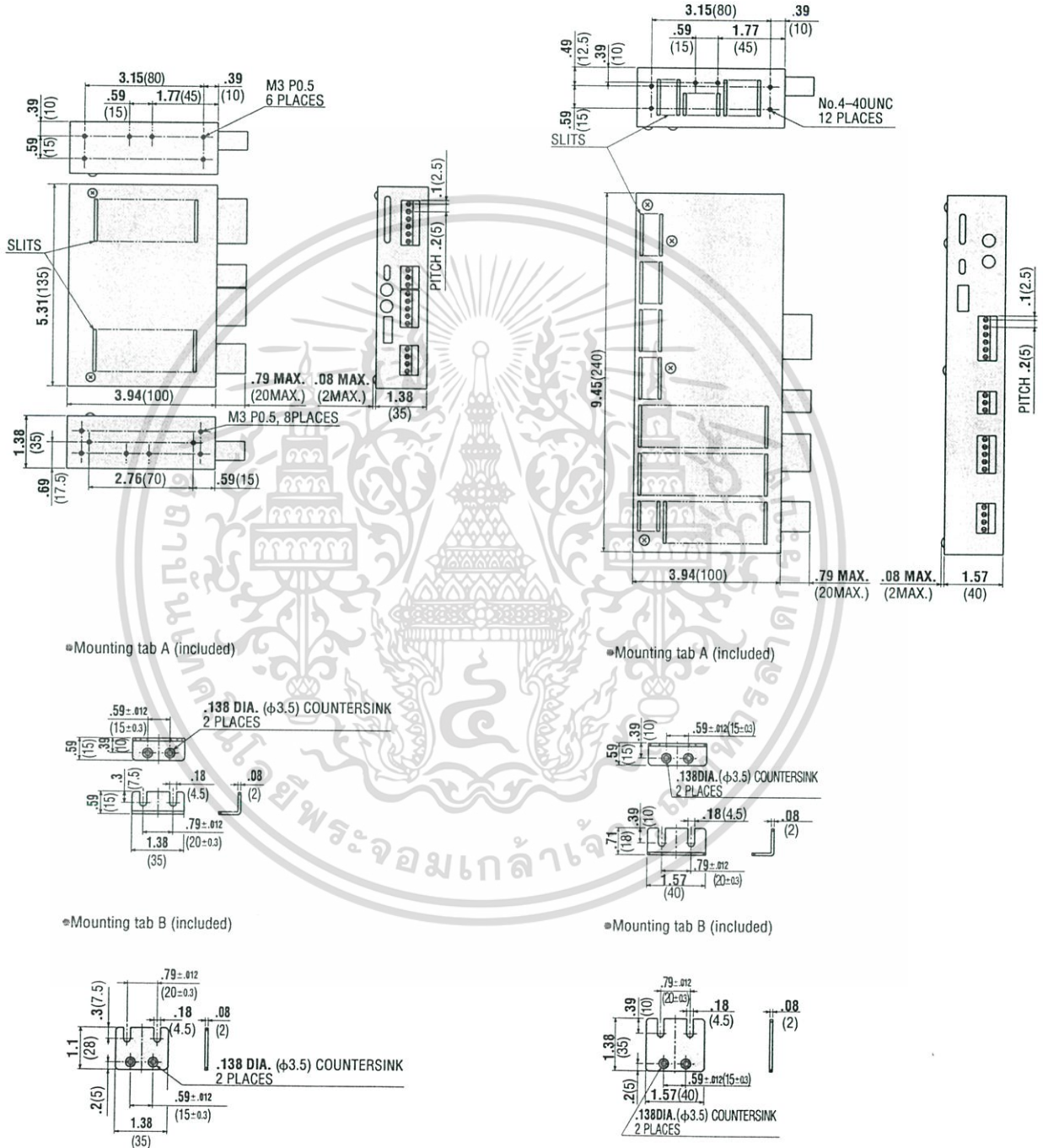
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

●Driver

Standard Type

For **UPK543□A, UPK544□A, UPK545□A**
 Driver: UDK5107NA Weight 1 lb. (Mass 0.45kg)

For **UPK564□A, UPK566□A, UPK569□A, UPK596□A, UPK599□A, UPK5913□A**
 Driver: UDK5114NA Weight 1.99 lb. (Mass 0.9kg)

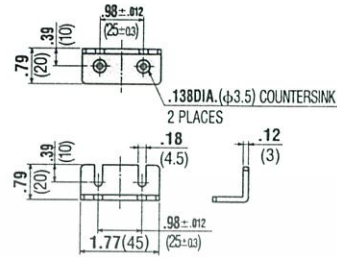
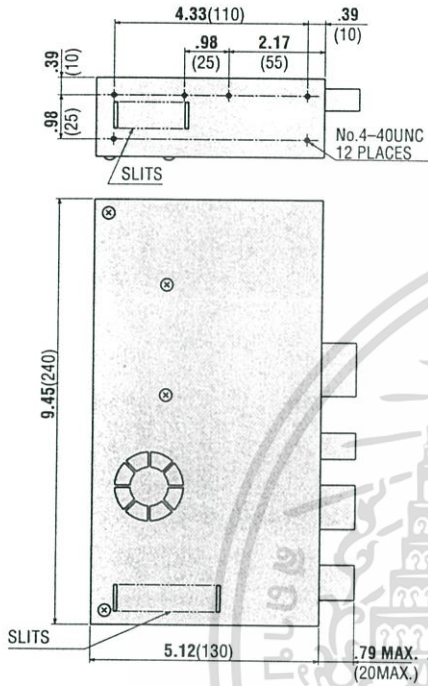


See page B-38 for information on driver installation.

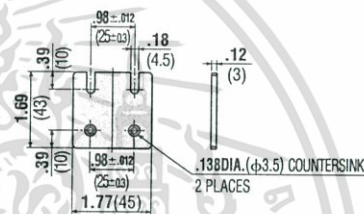
High-Speed Type

For **UPK569□HA, UPK596□HA,**
UPK599□HA, UPK5913□HA
 Driver: UDK5128NA Weight 2.65 lb. (Mass 1.2kg)

●Mounting tab A (included)



●Mounting tab B (included)



See page B-38 for information on driver installation.

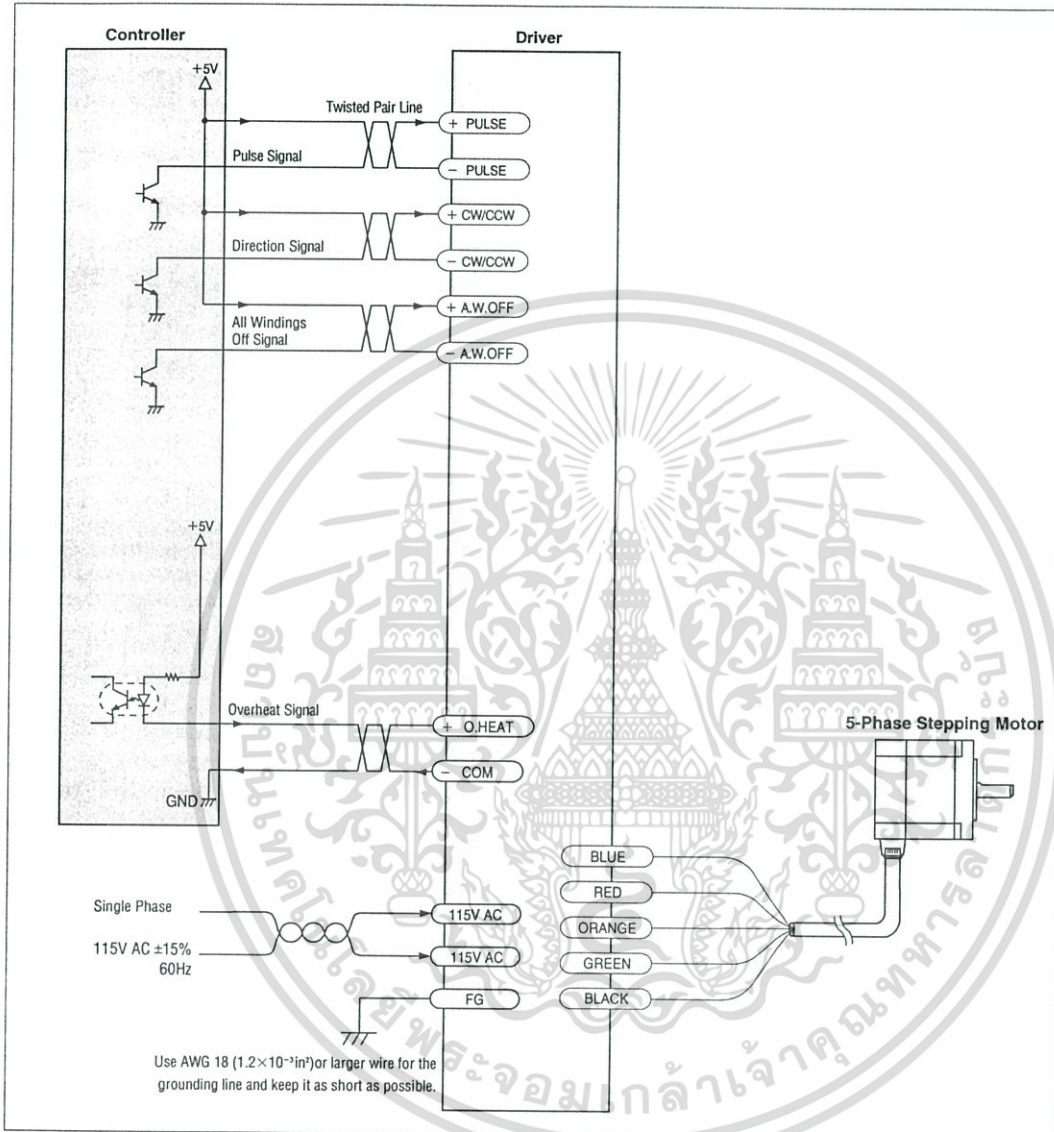
List of Motor and Driver Combinations

Type	Package model	Stepping motor		Driver
		Model	Current A/phase	Model
STANDARD	UPK543□A UPK544□A UPK545□A	PK543□UA PK544□UA PK545□UA	0.75	UDK5107NA
	UPK564□A UPK566□A UPK569□A UPK596□A UPK599□A UPK5913□A	PK564□UA PK566□UA PK569□UA PK596□UA PK599□UA PK5913□UA	1.4	UDK5114NA
HIGH-SPEED	UPK569□HA UPK596□HA UPK599□HA UPK5913□HA	PK569□UHA PK596□UHA PK599□UHA PK5913□UHA	2.8	UDK5128NA

Enter **A** (single shaft) or **B** (double shaft) in the □ within the model numbers.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

■ WIRING DIAGRAM



■ Power Supply

Use a power supply that can supply sufficient input current. When power supply capacity is insufficient, a decrease in motor output can cause the following malfunctions:

- Motor does not rotate properly at high-speed (insufficient torque)
- Motor startup and stopping is slow.

Note:

- Use twisted-pair wire of $3.1 \times 10^{-4} \text{ in}^2$ (0.2 mm^2) or thicker and 6.6 feet (2m) or less in length for the signal line.
- Use wire $7.8 \times 10^{-4} \text{ in}^2$ (0.5 mm^2) or thicker for motor lines (when extended) and power supply lines, and use $1.2 \times 10^{-3} \text{ in}^2$ (0.75 mm^2) or thicker for the wire for the grounding line.
- Use spot grounding for the grounding of the driver and external controller.
- Signal lines should be kept at least 3.94 inch (10cm) away from power lines (power supply lines and motor lines). Do not bind the signal line and power line together.

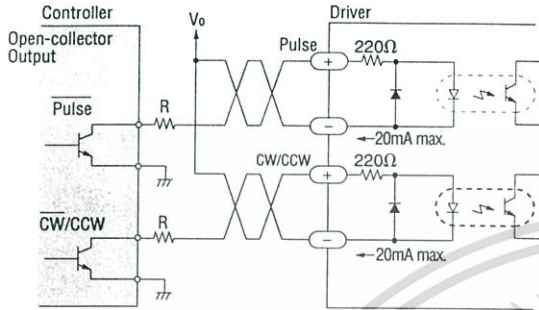
Do not turn on the power or operate the motor until confirming that the auto-diagnosis switch is set to NORM. If it is set to TEST, there is a danger that the motor will start rotating as soon as the power to the driver is turned on.

Use open collector transistors (sink type) for the signal output sections of the controller.

DESCRIPTION OF INPUT/OUTPUT SIGNALS

1. Pulse Input

Input circuit and sample connection



Keep the voltage between DC 5V and DC 24V. When voltage is equal to DC 5V, external resistance (R) is not necessary. When voltage is above DC 5V, connect external resistance (R) and keep the input current below 20mA.

1. 1-Pulse Input Mode

Pulse Signal

"Pulse" signal is input to the pulse signal terminal. When the photocoupler state changes from "ON" to "OFF", the motor rotates one step. The direction of rotation is determined by the following rotation direction signal.

Rotation Direction Signal

The "Rotation Direction" signal is input to the rotation direction signal input terminal. A "photocoupler ON" signal input commands a clockwise direction rotation. A "photocoupler OFF" signal input commands a counterclockwise direction rotation.

2. 2-Pulse Input Mode

CW Pulse Signal

When the photocoupler state changes from "ON" to "OFF", the motor rotates one step in the clockwise direction.

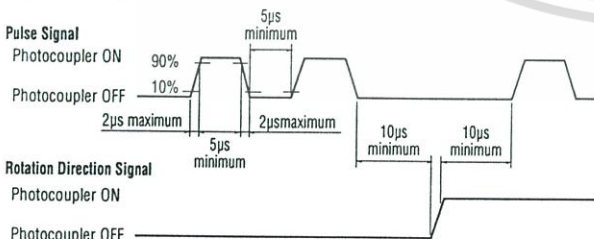
CCW Pulse Signal

When the photocoupler state changes from "ON" to "OFF", the motor rotates one step in the counterclockwise direction.

CW and CCW refer to clockwise and counterclockwise direction respectively, from a reference point of facing the motor output shaft.

Pulse Waveform Characteristics

(Photocoupler state corresponding the input pulse)



The shaded area indicates when the photocoupler diode is ON. The motor moves when the photocoupler state changes from ON to OFF as indicated by the arrow.

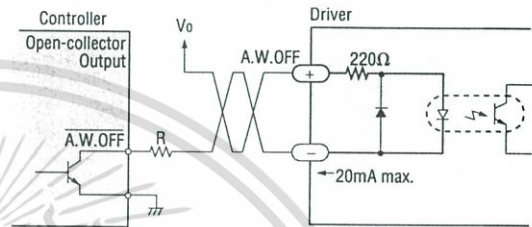
Pulse Signal Characteristics

- The pulse voltage is 4-5V in the "photocoupler ON" state, and 0-0.5V in the "photocoupler OFF" state.
- Input pulse signals should have a pulse width over 5μs, pulse rise/fall below 2μs, and a pulse duty below 50%.
- Keep the pulse signal at "photocoupler OFF" when no pulse is being input.

- The minimum interval time when changing rotation direction is 10μs. This value varies greatly depending on the motor type, pulse frequency and load inertia. It may be necessary to increase this time interval.
- In 1-pulse input mode, leave the pulse signal at rest ("photocoupler OFF") when changing rotation directions.

2. A.W.OFF (All Windings Off) Input

Input circuit and sample connection



Keep the voltage between DC 5V and DC 24V. When voltage is equal to DC 5V, external resistance (R) is not necessary. When voltage is above DC 5V, connect external resistance (R) and keep the input current below 20mA.

When the "All Windings Off" signal is in the "photocoupler ON" state, the current to the motor is cut off and motor torque is reduced to zero. The motor output shaft can then be rotated freely by hand.

When the "All Windings Off" signal is in the "photocoupler OFF" state, the motor holding torque is proportional to the current set by the current adjustment rotary switches. During motor operation be sure to keep the signal in the "photocoupler OFF" state.

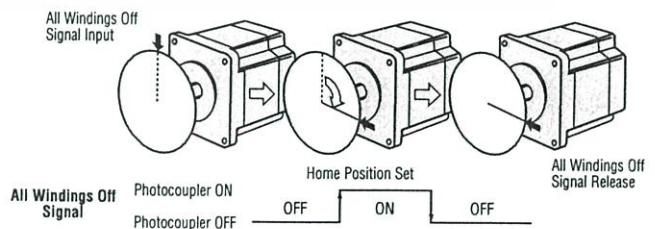
This signal is used when moving the motor by external force or manual home position is desired. If this function is not needed, it is not necessary to connect this terminal.

Switching the "All Windings Off" signal from "photocoupler ON" to "photocoupler OFF" does not alter the excitation sequence.

When the motor shaft is manually adjusted with the "All Windings Off" signal input, the shaft will shift up to ±3.6° from the position set after the "All Windings Off" signal is released.

Manual Setting of the Home Position

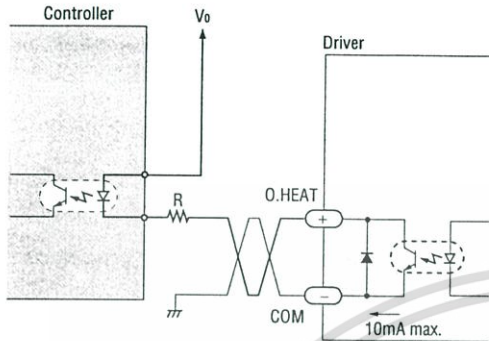
Input the "All Windings Off" signal, set the motor to the desired position, then release the "All Windings Off" signal.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

3. O.HEAT (Overheat) Output

■ Output circuit and sample connection



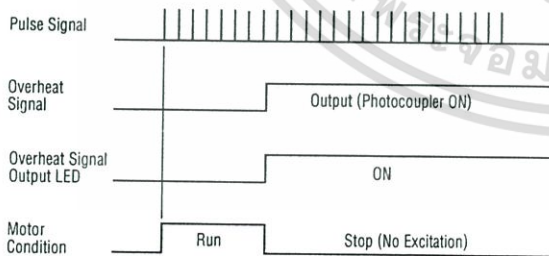
Keep the voltage between DC 5V and DC 24V.
Keep the current below 10mA. If the current exceeds 10mA, connect external resistance (R).

The "Overheat" signal is output to protect the driver from heat damage if the internal temperature of the driver rises above 176°F (80°C).
When connected as shown in the example connection, the signal will be "photocopler OFF" during normal conditions, and "photocopler ON" when the temperature exceeds above 176°F (80°C).
When the "Overheat" signal is output, turn the driver power OFF, then adjust the operating conditions (ambient temperature, driver/controller settings, etc.), or use a fan to cool the driver. After taking appropriate measures, turn the power ON. Turning the power ON will reset the "Overheat" signal and release the "Automatic Current Off" condition.

■ Relation to the "Automatic Current Off" function switch

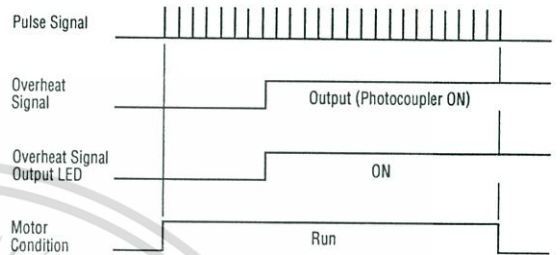
1. When set to ACD

- The "Overheat" signal is output when the internal temperature of the driver exceeds 176°F (80°C) during operation.
- Regardless of any pulse signals input, motor excitation will cause the shaft to be free and the motor will come to a natural stop.



2. When set to OFF

- The "Overheat" signal is output when the internal temperature of the driver exceeds 176°F (80°C) during operation.
- The motor will continue to run regardless of the "Overheat" signal output.



ประวัติผู้เขียน

นายสุรศักดิ์ พิพัฒน์ศาสตร์ เกิดเมื่อวันที่ 22 ตุลาคม พ.ศ. 2517 ที่จังหวัดพิษณุโลก สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2540 เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทวิทยาศาสตร์ มหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2542



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้