

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาและสร้างระบบเลเซอร์วีดิระยะทาง



โครงการพิเศษเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 58701

วันที่ 31 มี.ค. 2549

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของหอสมุดกลางเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง

1140805x
i.....

A study and construction of LASER range finder



Arucha Trakarnsudlert
Jiradetch Thavong
Chalach Chadchavalpiroj

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of
Bachelor of Science

Department of Applied Physics

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การศึกษาและสร้างระบบเลขอริวัตรระยะทาง

นักศึกษา นายอรุษา ตระการสุดเลิศ
นายจิระเดช ธาวงศ์
นายชลัษ ัชชวาลไพโรจน์
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา อ.อัศวิน เรณูสวัสดิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อ.สุรชาติ กมลดีลก

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ		ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	ผศ.สาหร่าย คุณิพงษ์	
กรรมการ	อ.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี	
กรรมการ	อ.หุติยภรณ์ ทิววงศ์	
กรรมการที่ปรึกษา	อ.อัศวิน เรณูสวัสดิ์	
กรรมการที่ปรึกษาร่วม	อ.สุรชาติ กมลดีลก	

.....
(รองศาสตราจารย์วิชาญ เตชิตธีระ)
หัวหน้าภาควิชา

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การศึกษาและสร้างระบบเลเซอร์วัดระยะทาง

นักศึกษา นายอรุชา ตระการสุดเลิศ
 นายจิระเดช ธาวงศ์
 นายชลัท ัชชวาลไพโรจน์

ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

ปีการศึกษา 2547

อาจารย์ที่ปรึกษา อ.อัศวิน เรณูสวัสดิ์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อ.สุรชาติ กมลดีลก

บทคัดย่อ

ระบบวัดระยะทางด้วยแสงเลเซอร์ เป็นระบบวัดระยะทางที่ใช้ไนโอดีเมียมแยกเลเซอร์แบบพัลส์ยิงไปยังเป้าหมายและสะท้อนกลับมา โดยมีตัวรับสัญญาณชนิดซิลิกอน PIN ไดโอด เป็นตัวรับสัญญาณเริ่มต้นคอยรับสัญญาณที่เริ่มส่งไป และตัวรับสัญญาณสิ้นสุดคอยรับสัญญาณที่สะท้อนกลับมา และนำสัญญาณที่ได้ทั้งสองเข้าสู่ออสซิลโลสโคป จะสามารถวัดหาระยะเวลาที่ต่างกันของสัญญาณทั้งสอง นำมาคำนวณหาเป็นระยะทางที่แสงใช้ในการเดินทางไปถึงเป้าหมาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายฝ่าย ดังนี้

บิดาและมารดา ที่คอยให้กำลังใจในการศึกษาตลอดมา

อ. อัครวิน เรณูสวัสดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ผู้ให้คำปรึกษาต่างๆ เกี่ยวกับเลเซอร์และระบบวัดระยะทาง

อ. สุรชาติ กมลดิถก อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่คอยสอบถามถึงความก้าวหน้าของโครงการมาโดยตลอด

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ได้ขอเพื่อสถานที่ทำการทดลอง ที่ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่คอยให้คำแนะนำในการทำการทดลอง และให้ยืมอุปกรณ์

เพื่อนๆ น้องๆ ทุกคน ที่คอยให้กำลังใจและถามไถ่ถึงโครงการอยู่เสมอ และขอขอบคุณทุกๆ ท่าน ที่ได้กล่าวนามและไม่ได้กล่าวนามมาด้วยความจริงใจ

นายอรุชา ตระการสุดเลิศ

นายจิระเดช ธารวงศ์

นายชัชช ชัชวาลไพโรจน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 เครื่องวัดระยะทางด้วยแสงเลเซอร์	3
2.2 ทฤษฎีเลเซอร์	3
2.2.1 การดูดกลืน	5
2.2.2 การปลดปล่อยโดยธรรมชาติ	5
2.2.3 การปลดปล่อยโดยการกระตุ้น	6
2.2.4 การเกิดประชากรผั้กลับ	7
2.2.5 เรโซเนเตอร์ทางแสง	9
2.3 ลักษณะของนีโอดีเมียมแยกเลเซอร์	13
2.4 พลังงานในการกระตุ้นนีโอดีเมียมแยกเลเซอร์	15
2.4.1 แหล่งจ่ายพลังงานแบบหลอดไฟฟเลซ	17
2.4.2 แหล่งจ่ายพลังงานแบบหลอดไฟอาร์ค	18
2.4.3 เลเซอร์ไดโอด	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

2.5 แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง	20
2.6 ตัวรับสัญญาณ	20
2.6.1 Silicon photodiode	20
2.6.2 Avalanche photodiode	20
2.7 ระบบประมวลผลสัญญาณ	21
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	22
3.1 ส่วนประกอบต่างๆ ที่ใช้ในระบบเลเซอร์	22
3.1.1 Laser chamber	22
3.1.1.1 แท่งผลึกนีโอดีเมียมแฉีก	22
3.1.1.2 หลอดไฟแฟลช	23
3.1.2 แหล่งจ่ายกำลัง	24
3.2 การวัดประสิทธิภาพของเลเซอร์	26
3.3 ระบบวัดสัญญาณ	26
3.3.1 ตัวรับสัญญาณ	26
3.3.2 การจัดอุปกรณ์การทดลอง	28
3.4 การประมวลผลสัญญาณ	29
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	30
4.1 ผลการทดลองจากการจัดอุปกรณ์	30
4.1.1 ทดลองเพิ่ม C-bank ให้แก่ Nd:YAG LASER และทำการวัดคุณสมบัติ	30
4.1.2 วัดหาค่าความผิดพลาดเมื่อนำตัวรับสัญญาณ 2 ตัว	31
มาวางอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกัน	
4.1.3 วัดหาค่าความผิดพลาดเมื่อนำตัวรับสัญญาณ 2 ตัว มาวางอยู่ที่ตำแหน่ง	33
เดียวกัน โดยมีการเพิ่มกระดาษเจาะรูวางไว้หน้าตัวรับเพื่อลดสัญญาณรบกวน	
4.2 ผลการทดลองจากการวัดระยะทาง	35
4.2.1 ทดลองวัดโดยการเปลี่ยนตัวสะท้อน	35
4.2.2 ทำการทดลองโดยใช้จุดที่วัดต่างกันเป็น V_{max} , $90\%V_{max}$ และ $80\%V_{max}$	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

4.2.3	ทำการวัดที่ระยะต่างๆ ที่ V_{max} และ $90\%V_{max}$	41
4.2.4	ทำการวัดที่ระยะต่างๆ	51
4.2.5	ทำการวัดที่ระยะต่างๆ ภายนอกอาคาร	61
บทที่ 5	สรุปและข้อเสนอแนะ	62
5.1	สรุปผลการทดลอง	62
5.2	ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ	63
เอกสารอ้างอิง		65
ภาคผนวก		66



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของผลึกนีโอดีเมียมแยก	13
ตารางที่ 2.2 แหล่งพลังงานแสงที่ใช้กระตุ้นนีโอดีเมียมแยกเลเซอร์	16
ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติของผลึกนีโอดีเมียมแยกที่ใช้ในการทดลอง	23
ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติของ Nd:YAG LASER เมื่อทำการเพิ่ม C-bank	31
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความผิดพลาดเมื่อนำตัวรับสัญญาณ 2 ตัว มาวางอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกัน	32
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความผิดพลาดโดยมีการเพิ่มกระดาศเจาะรู	34
ตารางที่ 4.4 แสดงสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนของวัตถุต่างชนิดกัน	35
ตารางที่ 4.5 แสดงการวัดที่ใช้จุดวัดที่ต่างกัน	40
ตารางที่ 4.6 แสดงการวัดระยะทาง ที่ระยะ 1-10 เมตร	41
ตารางที่ 4.7 แสดงการวัดระยะทางโดยใช้การประมาณกึ่งกลาง ที่ระยะ 1-10 เมตร	51

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงรูปแบบขององค์ประกอบทั่วไปของเลเซอร์	4
รูปที่ 2.2 แสดงการเปลี่ยนจำนวนอะตอมของชั้นระดับพลังงาน	4
รูปที่ 2.3 แสดงรูปแบบของกระบวนการดูดกลืน, กระบวนการปลดปล่อยโดยธรรมชาติ และกระบวนการปลดปล่อยโดยการกระตุ้น	7
รูปที่ 2.4 ก. แสดงจำนวนประชากรที่ระดับพลังงาน E_1 และ E_2 ที่เกิดแบบปกติ ข. แสดงจำนวนประชากรที่ระดับพลังงาน E_1 และ E_2 ที่เกิดแบบประชากรผ่นกลับ	8
รูปที่ 2.5 แสดงระบบการป้อนกลับทางแสงที่ประกอบด้วยกระจกหน้าและกระจกหลัง	10
รูปที่ 2.6 แสดงขอบเขตของค่า g parameter ที่มีเสถียรภาพและไม่มีเสถียรภาพ	11
รูปที่ 2.7 แสดงการเลือกใช้กระจกที่มีรัศมีความโค้งต่างกันและเสถียรภาพแตกต่างกันไป	12
รูปที่ 2.8 แสดงพล็อตออสซิลเลชันสเปกตรัมของผลึกนีโอดีเมียมแย็ก	14
รูปที่ 2.9 แสดงระดับพลังงานของนีโอดีเมียมแย็ก	14
รูปที่ 2.10 แสดงผลการดูดกลืนแสงของผลึกนีโอดีเมียมแย็กเลเซอร์	16
รูปที่ 2.11 เส้นสเปกตรัมที่หลอดไฟแฟลชที่เปล่งแสงออกมา	17
รูปที่ 2.12 แสดงเส้นสเปกตรัมของหลอดไฟอาร์คที่เปล่งแสงออกมา	18
รูปที่ 2.13 แสดงเส้นสเปกตรัมที่เลเซอร์ไดโอดเปล่งออกมา	19
รูปที่ 3.1 แสดงองค์ประกอบภายใน Pump Chamber	22
รูปที่ 3.2 หลอด Nd:YAG LASER และหลอดไฟแฟลช	24
รูปที่ 3.3 แหล่งจ่ายกำลังให้หลอดแฟลช	25
รูปที่ 3.4 วงจรแหล่งจ่ายกำลัง	25
รูปที่ 3.5 ตัวรับสัญญาณเริ่มต้น	26
รูปที่ 3.6 ตัวรับสัญญาณสิ้นสุด	26
รูปที่ 3.7 Spectral responsivity curve ของตัวรับสัญญาณ	27
รูปที่ 3.8 แผนภาพการจัดชุดทดลองที่ใช้	28
รูปที่ 3.9 ออสซิลโลสโคป Tektronix TDS420A	29
รูปที่ 4.1 C-bank 1 ชุดที่ทำการเพิ่มเข้าไป	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ 4.2 ขณะทำการวัดค่าความผิดพลาดเมื่อนำตัวรับสัญญาณ 2 ตัว มาวางอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน	33
รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ระยะทางต่างๆ	63



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

การวัดระยะทางเป็นสิ่งจำเป็นในการทำงานหลายด้าน ไม่ว่าจะเป็น ทางด้านวิศวกรรมโยธาที่ต้องมีการวัดสำรวจพื้นที่ขนาดใหญ่เพื่อก่อสร้างอาคาร ด้านการทหารที่ใช้ในการวัดระยะทางของฐานที่ตั้งของศัตรู ด้านวิศวกรรมหุ่นยนต์ที่ใช้วัดระยะทางล่วงหน้าเพื่อกำหนดทิศทางที่จะเดินไป และในด้านอื่นๆ อีกมากมาย ดังนั้นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดระยะทางที่มีความถูกต้องแม่นยำ และรวดเร็วจึงเป็นสิ่งจำเป็น

อุปกรณ์ในการวัดโดยทั่วๆ ไปที่ใช้กันอยู่ เช่น ไม้บรรทัด ตลับเมตร ฯลฯ เป็นการหาระยะทางสั้นๆ ที่สามารถเดินทางจากจุดเริ่มต้นที่วัด ไปยังจุดปลายทางได้ แต่หากเป็นการวัดระยะทางไกลๆ ที่เราไม่สามารถเดินทางไปยังจุดปลายได้ หรือเดินทางไปได้ลำบาก เช่น การวัดระยะทางระหว่างตึก 2 ตึกที่อยู่ห่างกัน เป็นต้น ทำให้เครื่องมือวัดดังกล่าวไม่สามารถทำได้

ปัจจุบันได้มีการสร้างเครื่องมือวัดที่ขจัดปัญหาดังกล่าวขึ้น โดยใช้อาศัยคุณสมบัติ เช่น การสะท้อน และความเร็วในการเคลื่อนที่ในตัวกลางหนึ่งๆ คงที่ ของคลื่นแสง หรือคลื่นเสียง มาสร้างเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดระยะทาง เช่น SONAR เป็นต้น

เครื่องวัดระยะทางด้วยแสงเลเซอร์ (Laser Range Finder) เป็นเครื่องมือวัดระยะทางที่ใช้คุณสมบัติของแสงเลเซอร์ที่เดินทางเป็นเส้นตรง และความเร็วที่แน่นอน มาสร้างเป็นเครื่องวัดระยะทางที่มีความถูกต้องแม่นยำสูง และสามารถวัดระยะทางได้ไกล

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาหลักการการทำงานของ Nd:YAG Laser ชนิด Pulse
2. เพื่อศึกษาลักษณะการทำงานและสร้างระบบจ่ายกำลังให้แก่ Nd:YAG Laser
3. เพื่อศึกษาเทคนิคการวัดระยะทางโดยใช้ระบบ Laser rectifier
4. เพื่อศึกษาระบบการประมวลผลทางสัญญาณ (Signal processing)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ทำการศึกษาคุณลักษณะและส่วนประกอบต่างๆ ของระบบเลเซอร์และศึกษาระบบการวัดระยะทางเบื้องต้น ของระบบ Laser Range Finder

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

1. ทำการสร้างระบบจ่ายกำลังแรงดันสูงให้แก่เลเซอร์
2. ทำการวัดคุณสมบัติของเลเซอร์ที่ได้
3. ศึกษาเทคนิคการวัดของระบบวัดระยะทางด้วยแสงเลเซอร์
4. ศึกษาการทำงานของระบบวัดระยะทาง
5. ทำการทดลองวัดระยะทางจากระบบที่สร้างขึ้น
6. ทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง และหาข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับความรู้ในการสร้างระบบจ่ายกำลังให้แก่เลเซอร์
2. ได้รับความรู้เกี่ยวกับระบบและคุณสมบัติของ Nd:YAG Laser
3. ได้รับความรู้เกี่ยวกับวงจรจ่ายกำลังแรงดันสูงให้แก่เลเซอร์
4. ได้รับความรู้เกี่ยวกับการวัดระยะทางด้วยแสงเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 เครื่องวัดระยะทางด้วยแสงเลเซอร์ (Laser Range Finder)

Laser Range Finder เป็นเครื่องมือวัดระยะทางที่ใช้คุณสมบัติของแสงเลเซอร์ ประกอบด้วย ส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ

- เลเซอร์และระบบจ่ายกำลัง
- ระบบวัดระยะทางและประมวลผลสัญญาณ

2.2 ทฤษฎีเลเซอร์

เลเซอร์ (LASER) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเกิดจากกระบวนการที่เรียกว่า Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation กระบวนการเกิดเลเซอร์นั้นมีพื้นฐานมาจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอะตอม, ไอออน หรือ โมเลกุล เนื่องมาจากการดูดกลืนและการปลดปล่อยพลังงานของโฟตอน ซึ่งจะเป็นไปตามกฎของบอร์ คือ

$$E_2 - E_1 = h\nu = \Delta E_{21} \quad (2.1)$$

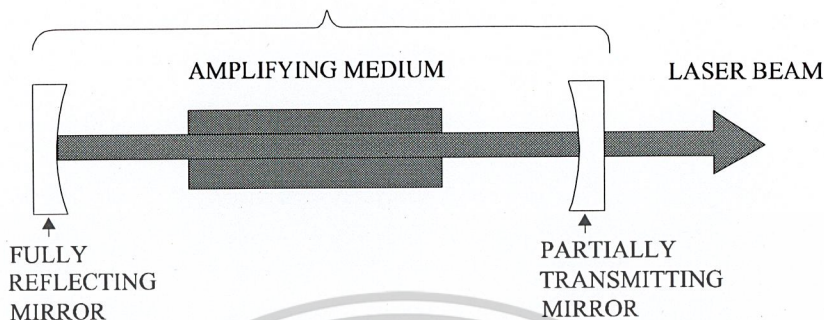
เมื่อ E_1 และ E_2 คือ ระดับพลังงานที่สถานะพื้นและสถานะถูกกระตุ้นตามลำดับ, ν คือ ความถี่ของโฟตอน และ h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant)

ในกระบวนการเกิดเลเซอร์นั้นจำเป็นต้องมีภาวะสมดุลของพลังงานในสารเลเซอร์ที่สะสมอยู่ในอะตอม, ไอออน หรือ โมเลกุล โดยการให้พลังงานจากภายนอกในการกระตุ้นให้อะตอม, ไอออน หรือโมเลกุลเหล่านั้นเปลี่ยนระดับพลังงานจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้น แล้วจะต้องมีกระบวนการที่สำคัญ คือ (1) กระบวนการปลดปล่อยโดยการกระตุ้น (stimulated emission) (2) กระบวนการป้อนกลับทางแสง (optical resonator) ซึ่งมีส่วนสำคัญมากในการทำให้เกิดการขยายทางแสง ปกติจะใช้กระจกเลเซอร์เป็นตัวป้อนกลับทางแสง (3) การเกิดประชากรผกกลับ (population inversion) รูปแบบทั่วไปของส่วนประกอบเลเซอร์แสดงในรูปที่ 2.1 คือประกอบด้วย การขยายทางแสงของสารเลเซอร์ (laser medium) เพื่อให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานโดยการกระตุ้นและกระจกเลเซอร์สำหรับสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือแสงเลเซอร์ที่ได้ โดยกระจกหลังนั้นส่วนใหญ่จะเคลือบให้สะท้อนกลับหมดที่ความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่อยู่ใน คาวิตี (cavity) และกระจกหน้าจะเคลือบให้เลเซอร์ออกมาบางส่วนและส่วนที่เหลือจะสะท้อนกลับไปในคาวิตี แต่ในระบบเลเซอร์โดยทั่วไป จะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไขอีกมากที่จะนำมาคำนวณเพื่อเลือกคุณลักษณะของอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้เหมาะที่จะประกอบเป็นระบบเลเซอร์เพื่อให้เกิดการขยายทางแสงอย่างต่อเนื่อง และเกิดการปล่อยแสงเลเซอร์ได้

OPTICAL RESONATOR OR LASER CAVITY



รูปที่ 2.1 แสดงรูปแบบขององค์ประกอบทั่วไปของเลเซอร์

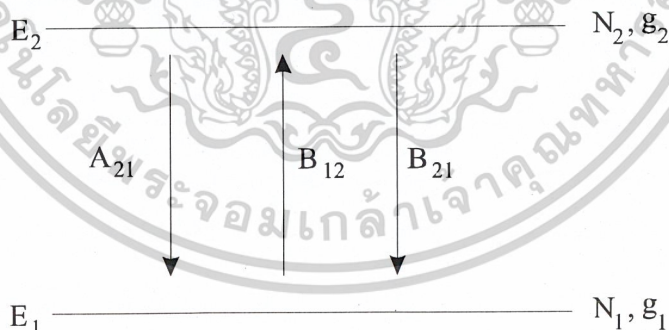
โดยปกติจะพิจารณาถึงจำนวนอะตอมที่ระดับพลังงานสถานะพื้น (E_1) ซึ่งมีระดับพลังงานต่ำกว่า และระดับพลังงานสถานะกระตุ้น (E_2) ซึ่งมีระดับพลังงานสูงกว่า ที่สภาวะสมดุลทางอุณหภูมิตั้ง (T) จำนวนประชากรที่ระดับพลังงานทั้ง 2 ระดับพลังงานนั้นจะเป็นไปตามกฎการกระจายของโบลต์ซมันน์ คือ

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2}{g_1} \exp\left(\frac{-(E_2 - E_1)}{kT}\right) \quad (2.2)$$

เมื่อ N_1 และ N_2 คือ จำนวนอะตอมที่ระดับพลังงาน E_1 และ E_2 ตามลำดับ,

g_1 และ g_2 คือ สถานะซ้อนทับของระดับพลังงาน E_1 และ E_2 ตามลำดับ,

โดยการเปลี่ยนจำนวนอะตอมของระดับพลังงานแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงการเปลี่ยนจำนวนอะตอมของชั้นระดับพลังงาน

โดยที่อุณหภูมิตั้งที่สมดุลนั้น กฎการกระจายของโบลต์ซมันน์จะทำนายได้ว่าจะมีอะตอมทั้งหมดอยู่ที่สถานะพื้น แต่ที่สภาวะสมดุลทางอุณหภูมิตั้งนั้นจะเห็นได้ว่าในระดับพลังงานสถานะพื้นจะมีความหนาแน่นของประชากรมากกว่าที่ระดับพลังงานสถานะกระตุ้น ดังนั้นจำนวนประชากรที่ระดับ E_2 จะมี

น้อยกว่าจำนวนประชากรที่ระดับพลังงาน E_1 ซึ่งก็หมายถึงในสภาวะปกติจะไม่เกิดการขยายทางแสง ดังนั้นในการทำให้เกิดเลเซอร์จะต้องพยายามทำให้ $N_2 > N_1$ เพื่อให้เกิดกระบวนการประชากรผกผัน ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป การเกิดเลเซอร์จะเกี่ยวข้องกับกระบวนการที่สำคัญ ดังนี้

2.2.1 การดูดกลืน (Absorption) [1]

เมื่อมีพลังงานที่เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ ν ไปกระตุ้นสารเลเซอร์ แล้วสารเลเซอร์ดูดกลืนพลังงาน ทำให้อะตอมเกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้น ดังนั้นจำนวนประชากรที่สถานะพื้นจะลดลง โดยอัตราการลดลงของประชากรที่สถานะพื้นนั้น จะเป็นไปตามสมการ

$$\left. \frac{dN_1}{dt} \right|_{abs.} = -B_{12}\rho(\nu_{21})N_1 \quad (2.3)$$

เมื่อ B_{12} คือ สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนของไอน์สไตน์ มีหน่วยเป็น $cm^3 / s^2 \cdot J$ และ $\rho(\nu)$ คือ ความหนาแน่นของพลังงานในการแผ่รังสี มีหน่วยเป็น $J \cdot s / cm^3$

2.2.2 การปลดปล่อยโดยธรรมชาติ (Spontaneous emission) [1]

การปลดปล่อยโดยธรรมชาตินี้จะเกิดขึ้นหลังจากที่สารเลเซอร์ได้เกิดการดูดกลืนพลังงานทำให้อะตอมเปลี่ยนขึ้นระดับพลังงานจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้น หลังจากนั้นจำนวนประชากรที่สถานะกระตุ้นจะสลายหรือลดทอนจำนวนลงโดยการปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามธรรมชาติมายังสถานะพื้น โดยอัตราการลดลงของจำนวนประชากรที่สถานะกระตุ้นจะเป็นไปตามสมการ

$$\left. \frac{dN_2}{dt} \right|_{spont.} = -A_{21}N_2 \quad (2.4)$$

เมื่อ A_{21} คือ สัมประสิทธิ์ของการปลดปล่อยโดยธรรมชาติของไอน์สไตน์ มีหน่วยเป็น s^{-1} โดยการอินทิเกรตสมการ (2-4) สามารถหาจำนวนประชากรที่สถานะกระตุ้น เมื่อเวลา t ใด ๆ ดังสมการ

$$N_2(t) = N_2(0) \exp\left(\frac{-t}{\tau_{21}}\right) \quad (2.5)$$

เมื่อ τ_{21} คือ อายุเฉลี่ยสำหรับการปลดปล่อยรังสีของพลังงานในสถานะกระตุ้นมายังสถานะพื้น โดยอายุเฉลี่ยของการปล่อยรังสีนั้นจะมีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ของไอน์สไตน์ คือ

$$\tau_{21} = \frac{1}{A_{21}} \quad (2.6)$$

2.2.3 การปลดปล่อยโดยการกระตุ้น (stimulated emission) [1]

การปลดปล่อยโดยการกระตุ้นนี้เป็นกระบวนการที่เกิดจากการที่สารเลเซอร์ได้รับพลังงานโดยการดูดกลืน แล้วจะตอมเกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้น หลังจากนั้นจำนวนประชากรที่สถานะกระตุ้นจะสลายหรือลดทอนลงโดยการกระตุ้นจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้เกิดการปล่อยพลังงานออกมา โดยอัตราการลดลงของจำนวนประชากรที่สถานะกระตุ้นจะเป็นไปตามสมการ

$$\left. \frac{dN_2}{dt} \right|_{sti.} = -B_{21}\rho(\nu)N_2 \quad (2.7)$$

เมื่อ B_{21} คือ สัมประสิทธิ์ของการปลดปล่อยโดยการกระตุ้นของไอน์สไตน์ มีหน่วยเป็น $cm^3/s^2 \cdot J$

ถ้ารวมการดูดกลืน, การปลดปล่อยโดยธรรมชาติ และการปลดปล่อยโดยการกระตุ้น สามารถเขียนในรูปของการเปลี่ยนระดับพลังงานจากสถานะกระตุ้นและสถานะพื้นของจำนวนอะตอมใน 2 สถานะนี้ได้ โดยรูปแบบของกระบวนการทั้ง 3 ชนิด สามารถดูได้จากรูปที่ 2.3 ซึ่งจะทำให้เราได้สมการดังนี้คือ

$$\frac{dN_1}{dt} = B_{21}\rho(\nu)N_2 - B_{12}\rho(\nu)N_1 + A_{21}N_2 \quad (2.8)$$

ในสภาวะสมดุลทางอุณหภูมิจึงมี

$$\frac{dN_1}{dt} = 0 \quad (2.9)$$

ดังนั้นสมการ (2.8) สามารถเขียนได้เป็น

$$N_2 A_{21} + N_2 \rho(\nu) B_{21} = N_1 \rho(\nu) B_{12} \quad (2.10)$$

เมื่อเรานำสมการการกระจายของโบลต์มานน์ที่แสดงอัตราส่วนของ N_2/N_1 มาใช้ประกอบกับ สมการ (2.10) สามารถเขียนได้เป็น

$$\rho(\nu) = \frac{(A_{21}/B_{21})}{(g_1/g_2)(B_{12}/B_{21}) \exp(h\nu/kT) - 1} \quad (2.11)$$

เมื่อเปรียบเทียบกับกฎการแผ่รังสีของวัตต์ดัมป์ ซึ่งมีสมการคือ

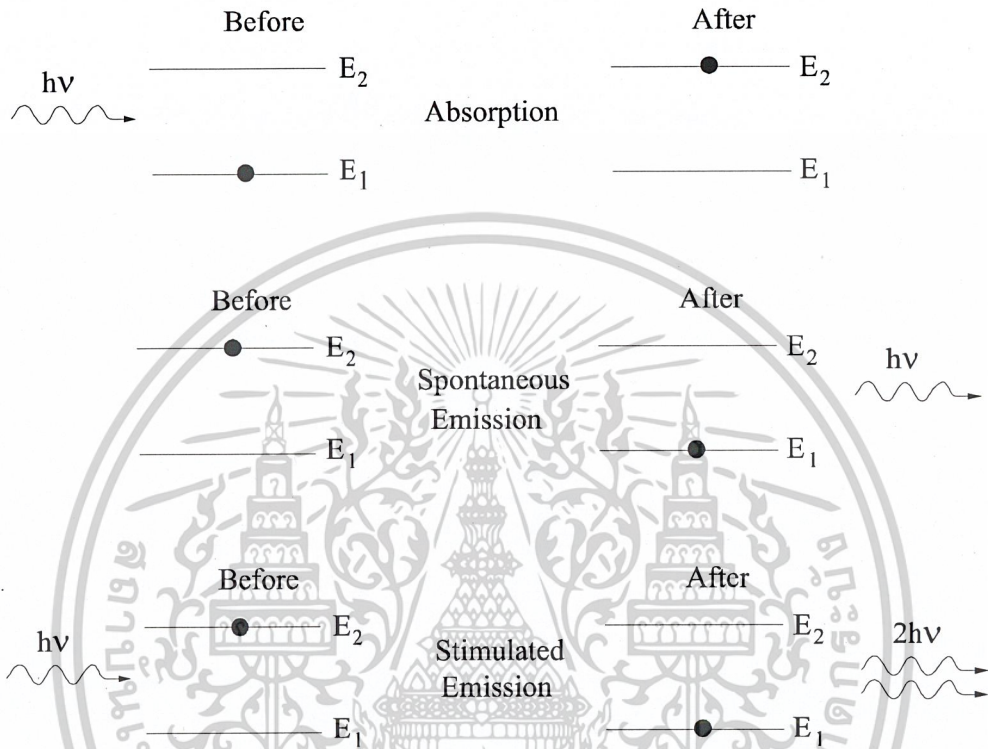
$$\rho(\nu)d\nu = \frac{8\pi\nu^2 d\nu}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (2.12)$$

จะได้

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi\nu^2 h\nu}{c^3} \quad \text{และ} \quad B_{21} = \frac{g_1 B_{12}}{g_2} \quad (2.13)$$

เมื่อ c คือ ความเร็วของแสงในสารเลเซอร์

สำหรับระบบที่ไม่มีการซ้อนทับของระดับพลังงาน ซึ่งจะทำให้ $g_1 = g_2$ ดังนั้นเราจะได้ว่า $B_{12} = B_{21}$ ซึ่งจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของอินสไตน์ของการปลดปล่อยโดยการกระตุ้นเท่ากับการดูดกลืน



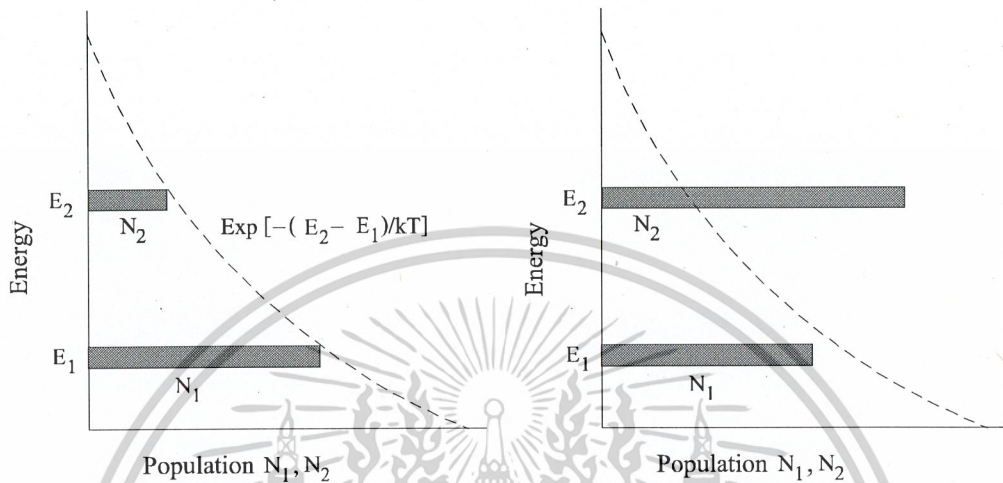
รูปที่ 2.3 แสดงรูปแบบของกระบวนการดูดกลืน, กระบวนการปลดปล่อยโดยธรรมชาติ และกระบวนการปลดปล่อยโดยการกระตุ้น

2.2.4 การเกิดประชากรผกผัน (Population inversion)

จากสมการกระจายของโบลต์ซมันน์ (สมการที่ 2-2) ในสภาวะสมดุลทางอุณหภูมินั้นจะมีอะตอมที่อยู่ที่ระดับพลังงานสถานะกระตุ้น (E_2) น้อยกว่าระดับพลังงานสถานะพื้น (E_1) มาก ทำให้จำนวนของประชากรของอะตอมที่ต่างกันของ 2 ระดับพลังงานนั้น คือ $N_1 - N_2$ ซึ่งปกติจะมีค่าเป็นบวก และเมื่อเริ่มเกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานของอะตอมของ 2 ระดับพลังงาน ความต่างของจำนวนอะตอมจะค่อยๆ เป็นลบ ถ้าเป็นการปลดปล่อยโดยธรรมชาติของอะตอมหลังจากได้รับพลังงานนั้นก็จะเกิดการปลดปล่อยอย่างช้าๆ จำนวนอะตอมที่อยู่ในระดับพลังงานสถานะกระตุ้นจะ

ค่อยๆ ตกกลับมายังระดับพลังงานสถานะพื้น ดังรูปที่ 2.4 ก ซึ่งในขบวนการเปลี่ยนระดับพลังงานของอะตอมรูปแบบนี้จะขึ้นกับสัมประสิทธิ์การดูดกลืน $\alpha(\nu)$ ซึ่งมีค่าเป็นบวกตามสมการ

$$\alpha(\nu) = \left(\frac{g_2}{g_1} N_1 - N_2 \right) \quad (2.14)$$



รูปที่ 2.4 ก. แสดงจำนวนประชากรที่ระดับพลังงาน E_1 และ E_2 ที่เกิดแบบปกติ

ข. แสดงจำนวนประชากรที่ระดับพลังงาน E_1 และ E_2 ที่เกิดแบบประชากรผกกลับ
จากรูปที่ 2.4 ข. จะเห็นได้ว่าจำนวนอะตอมจะอยู่ในระดับพลังงานสถานะกระตุ้นมากกว่า ในระดับพลังงานสถานะพื้น ดังนั้นความต่างของจำนวนอะตอมที่ 2 ระดับพลังงานนั้น คือ $N_1 - N_2$ จะมีค่าเป็นลบ แต่ในกระบวนการที่จะทำให้เกิดการขยายทางแสงในการเกิดเลเซอร์จะต้องมีเงื่อนไขที่สำคัญคือ

$$N_2 > N_1 \quad \text{ถ้า} \quad E_2 > E_1 \quad (2.15)$$

โดยเงื่อนไขในการเกิดการขยายแสงนั้นสามารถเขียนในเทอมของ $N_2 - (g_2/g_1)N_1$ จะเรียกกว่าการเกิดประชากรผกกลับหรือเขียนได้เป็น

$$N_2 - (g_2/g_1)N_1 = \Delta N_{21} \quad (2.16)$$

ในการเกิดเลเซอร์นั้นจะต้องเกิดกระบวนการเกิดประชากรผกกลับคือ

$$\Delta N_{21} > 0 \quad \text{หรือ} \quad \frac{g_1 N_2}{g_2 N_1} > 1 \quad (2.17)$$

ทั้งนี้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้นี้จะเคลื่อนที่ผ่านอะตอมของสารโดยมีความเข้มแสง (I) หลังจากการปลดปล่อยพลังงานโดยสารเลเซอร์คือ

$$I = I_0 e^{\sigma(N_2 - g_2/g_1 N_1)L} = I_0 e^{\sigma \Delta N_{21} L} \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ σ คือ ภาคตัดขวางของการปลดปล่อยโดยการกระตุ้นที่ 2 ระดับพลังงานนั้น (Stimulated emission cross section) มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2) ซึ่งมีค่าตามสมการ

$$\sigma = \frac{\lambda^2 A_{21}}{8\pi\Delta\nu} \quad (2.19)$$

เมื่อ $\Delta\nu$ คือ ความกว้างของความถี่ (linewidth)

L คือ ความหนาของสารเลเซอร์ที่ลำแสงเคลื่อนที่ผ่านมีหน่วยเป็นเมตร

ดังนั้นถ้าค่า ΔN_{21} สมการที่ 2.17 นั้นมีค่ามากจะทำให้ค่า I ในสมการที่ 2.18 มีค่ามากขึ้นด้วย โดยในสมการที่ 2.18 นั้น เรียกว่าอัตราขยาย (gain หรือ amplification) และแฟคเตอร์ $\sigma\Delta N_{21}$ เรียกว่าสัมประสิทธิ์ของการขยาย (gain coefficient) จะใช้สัญลักษณ์ γ_{21} ดังนั้นสามารถเขียนสมการที่ 2.19 เขียนใหม่ได้เป็น

$$I = I_0 e^{\gamma_{21}L} \quad (2.20)$$

ถ้าในกรณีที่มีกระจกเลเซอร์อยู่ในระบบนั้น ในการคิดอัตราขยายของเลเซอร์ต้องคำนึงถึงเปอร์เซ็นต์การสะท้อนของกระจกเลเซอร์ทั้งทางด้านหน้าและหลังด้วย ซึ่งเกิดการสะท้อนไป-มา ทำให้เราได้ค่า Gain ภายในระบบคือ

$$G_{gen.} = R_1 R_2 e^{\gamma_{21}2L} \quad (2.21)$$

แต่ระบบเลเซอร์ทั่วไปจะมีการสูญเสียภายในระบบ ดังนั้นค่า Gain ของสารเลเซอร์ที่แท้จริงคือ

$$G_{net} = R_1 R_2 e^{(\gamma_{21} - \alpha)2L} \quad (2.22)$$

เมื่อ R_1 คือ เปอร์เซ็นต์การสะท้อนของกระจกหน้า

R_2 คือ เปอร์เซ็นต์การสะท้อนของกระจกหลัง

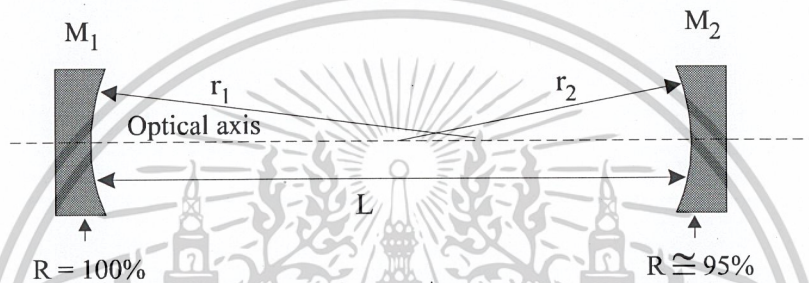
α คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานภายในสารเลเซอร์

และเงื่อนไขการเริ่มเกิดเลเซอร์คือ $G_{net} > 1$

2.2.5 เรโซเนเตอร์ทางแสง (Optical Resonator)

กระบวนการในการปลดปล่อยแสงของเลเซอร์นั้นจะต้องมีการกระตุ้นอะตอมอยู่ที่ระดับสถานะกระตุ้นหรือ กึ่งเสถียร (metastable state) ก่อน ในการกระตุ้นนั้นเกิดจากพลังงานของอะตอมที่มีระดับพลังงานของความยาวคลื่น ($h\nu$) ที่เท่ากับระดับพลังงานเหล่านั้นไปกระตุ้น โดยอะตอมที่จะไปกระตุ้นนั้นเกิดจากกระบวนการปลดปล่อยโดยธรรมชาติของระดับพลังงานกึ่งเสถียรของอะตอมที่ปลดปล่อยพลังงานโฟตอนมาก่อนแล้วและโฟตอนเหล่านั้นเกิดการสะท้อนภายในควาวิตี ของเลเซอร์ โดยสะท้อนจากกระจกหน้าและหลัง โดยโฟตอนที่สะท้อนเหล่านั้นจะไปกระตุ้นโฟตอนบางส่วนที่ยังอยู่ในสถานะกึ่งเสถียรให้ตกลงมา และได้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือ โฟตอน ซึ่งระบบเรโซเนเตอร์

ทางแสงจะประกอบด้วยกระจกเลเซอร์ 2 อัน คือ ส่วนที่เป็นกระจกหน้า M_1 และกระจกหลัง M_2 ปิดหัวและท้ายของระบบเลเซอร์ ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งกระจกเลเซอร์มีส่วนสำคัญมากโดยจะมีผลกับค่าประสิทธิภาพของระบบเลเซอร์ต่ำลงเพราะตำแหน่งและการจัดระนาบของกระจกมีผลต่อการเกิดการสูญเสียพลังงานในระบบของเลเซอร์ ดังนั้นทั้งนี้ในการเลือกกระจกโดยทั่วไปจะพิจารณาอยู่ 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ เปอร์เซ็นต์การสะท้อนและรัศมีความโค้งของกระจก ซึ่งโดยเปอร์เซ็นต์การสะท้อนของกระจกนั้นส่วนใหญ่จะถูกกำหนดได้โดยการเคลือบสารไดอิเล็กตริกลงบนผิวหน้าของกระจก ซึ่งสารไดอิเล็กตริกแต่ละชนิดที่ใช้เคลือบกระจกเลเซอร์นั้นจะต้องมีการคำนวณเพื่อให้เกิดเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นที่เราต้องการและเหมาะกับระบบเลเซอร์นั้นด้วย



รูปที่ 2.5 แสดงระบบการป้อนกลับทางแสงที่ประกอบด้วยกระจกหน้าและกระจกหลัง

เรโซเนเตอร์ทางแสงจะประกอบไปด้วยกระจกที่วางขนานกันสองแผ่น ซึ่งจะทำหน้าที่รวมลำแสง ให้สะท้อนกลับไปมาอยู่ในควาตี และสารเลเซอร์ เท่านั้น แต่เนื่องจากผลของการเกิดการสะท้อนของแสงทำให้ไม่สามารถที่จะรวบรวมลำแสงนี้ได้อย่างสมบูรณ์แบบได้ด้วยกระจกเรียบธรรมดาเพราะมีแสงบางส่วนกระจายออกตามขอบกระจกนั้น ส่งผลให้เลเซอร์ที่ได้มีเสถียรภาพต่ำ ดังนั้นในทางปฏิบัติเพื่อป้องกันการเกิดความสูญเสียเนื่องจากปรากฏการณ์ดังกล่าว จึงใช้กระจกเลเซอร์แบบกระจกโค้งเว้า เพื่อให้เหมาะสมกับการเกิดการขยายทางแสงของเลเซอร์

รูปที่ 2.5 แสดงระบบเรโซเนเตอร์ทางแสงที่ประกอบด้วยกระจกเว้า 2 บาน คือ M_1 และ M_2 ซึ่งมีจุดศูนย์กลางความโค้งอยู่บนแนวแกนแสง โดยกระจกทั้งสองนี้วางห่างกันระยะ L และมีรัศมีความโค้งเท่ากับ r_1 และ r_2 ตามลำดับ หากจะพิจารณาทิศทางที่แสงเดินทางและสะท้อนกลับไปมาแล้ว จะพบว่าเมื่อเกิดการสะท้อนหลายๆ ครั้ง ลำแสงจะเริ่มบานออก นั่นแสดงว่ามีความสูญเสียเกิดขึ้นในระบบเลเซอร์ ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบเลเซอร์ลดลงไปด้วย แต่ถ้าแสงสะท้อนกลับมาแล้วไม่บานออกก็แสดงว่าไม่มีความสูญเสียพลังงาน

นอกจากนี้ค่า g-parameter นี้จะยังมีผลต่อขนาดของลำแสง (beam waist หรือ spot size) ของเลเซอร์อีกด้วยซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$w_0^4 = \left(\frac{\lambda_0}{n\pi} \right) \frac{L(R_1 - L)(R_2 - L)(R_1 + R_2 - L)}{(R_1 + R_2 - 2L)^2} \tag{2.26}$$

และ beam waist ที่ R_1 และ R_2 หาได้จาก

$$w_1^4 = \left(\frac{\lambda_0 R_1}{n\pi} \right) \left(\frac{R_2 - L}{R_1 - L} \right) \left(\frac{L}{R_1 + R_2 - L} \right) \tag{2.27}$$

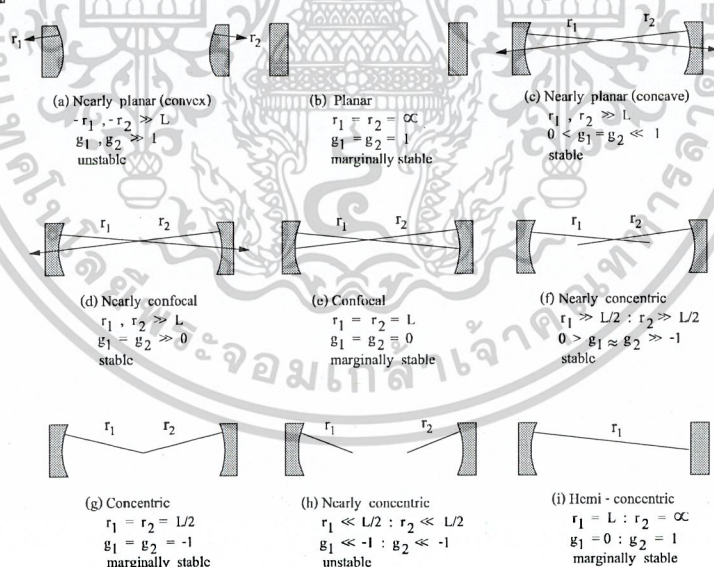
$$w_2^4 = \left(\frac{\lambda_0 R_2}{n\pi} \right) \left(\frac{R_1 - L}{R_2 - L} \right) \left(\frac{L}{R_1 + R_2 - L} \right) \tag{2.28}$$

และตำแหน่งของ z_1 และ z_2 หาได้จาก

$$z_1 = \frac{L(R_2 - L)}{(R_1 + R_2 - 2L)} \tag{2.29}$$

$$z_2 = \frac{L(R_1 - L)}{(R_1 + R_2 - 2L)} \tag{2.30}$$

เมื่อ w_0 , w_1 และ w_2 คือ ขนาดของลำแสง (beam waist) ของลำแสงเลเซอร์ที่เป็น Gaussian profile หรือ TEM_{00} ที่ด้านนอกกระจก, กระจกด้านหน้าและหลังตามลำดับ แต่โดยทั่วไปจะมีรูปแบบของระบบ คาวิตี จะมีหลายแบบด้วยกันดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงการเลือกใช้กระจกที่มีรัศมีความโค้งต่างกันและเสถียรภาพแตกต่างกันไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

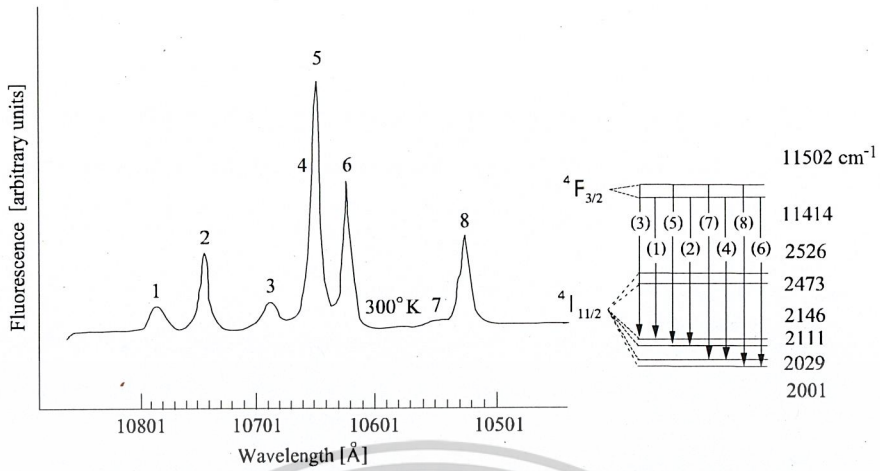
2.3 ลักษณะของนีโอดีเมียมแยกเลเซอร์ (Nd:YAG Laser)

นีโอดีเมียมแยกเป็นเลเซอร์ของแข็งชนิดหนึ่งที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน โดยผลึกนีโอดีเมียมแยกมีการปลูกผลึกโดยใช้วิธี Czochraski โดยปกติมีอัตราการปลูกผลึกอย่างช้าๆ ประมาณ 0.5 mm/h ส่วนขนาดถ้าเป็นแท่งก็จะประมาณ 10-15 cm ซึ่งจะใช้เวลาในการปลูกประมาณ 1 สัปดาห์ ส่วนความเข้มหรือปริมาณของ Nd^{3+} ต่อปริมาณของ YAG นั้นอาจจะมีตั้งแต่ 1 - 2% เท่านั้น เพราะถ้าในผลึกนีโอดีเมียมแยกมีปริมาณของ Nd^{3+} มากๆ จะทำให้ช่วงเวลาการฟลูออเรสเซนส์สั้นลง แถบความยาวคลื่นจะกว้างขึ้น และเป็นเหตุให้เกิดความเครียดในผลึกสูงไปด้วย โดยสรุปแล้วถ้าโดปปริมาณของ Nd^{3+} มากเกินไปจะทำให้ผลึกนีโอดีเมียมแยกนั้นมีความคุณภาพทางแสงที่ต่ำ และถ้าเราต้องการที่จะใช้ผลึกนีโอดีเมียมแยกเป็นเลเซอร์แบบต่อเนื่องนั้นยิ่งต้องโดปปริมาณของ Nd^{3+} ให้น้อยกว่าปกติ เพราะความเครียดของผลึกจะได้น้อยเพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและพลังงานที่ได้รับทัน ทั้งนี้ผลึกนีโอดีเมียมแยกมีคุณสมบัติเหมาะสมในการทำให้เกิดเลเซอร์ดูได้จากตารางที่ 2.1

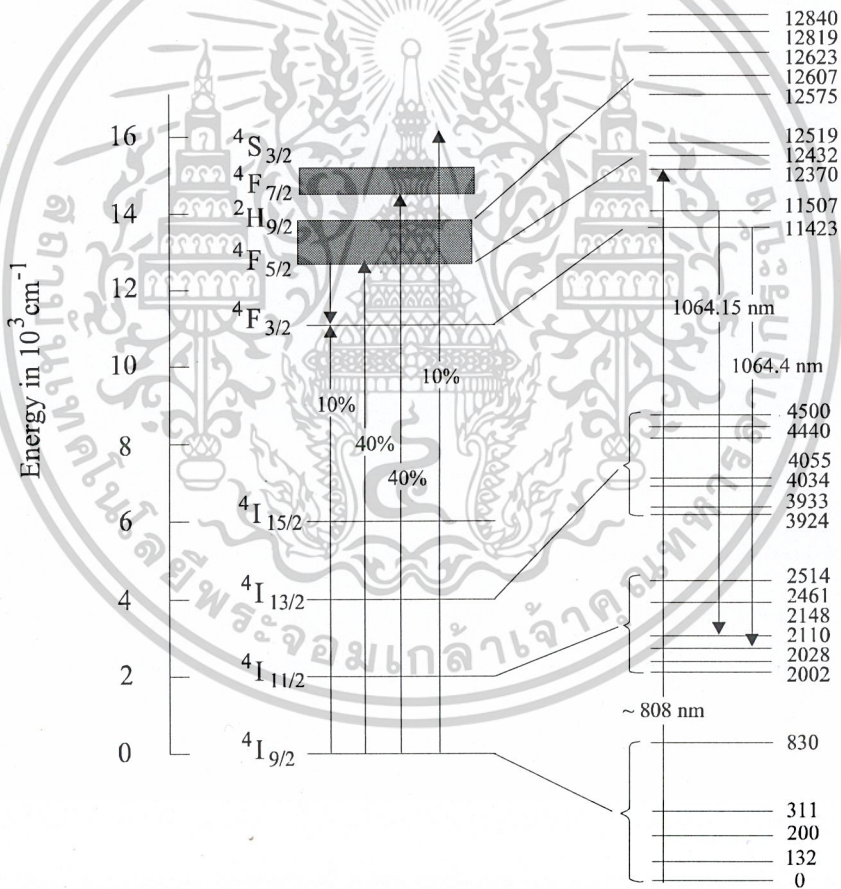
ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของผลึกนีโอดีเมียมแยก

Chemical formula	$\text{Nd} : \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$
Weight % Nd	0.725
Atomic % Nd	1.0
Nd atoms/cm ³	1.38×10^{20}
Density	4.56 g/cm^3
Line width	4.5 \AA
Spontaneous fluorescence lifetime	$230 \mu\text{s}$
Photon energy at $1.064 \mu\text{m}$	$h\nu = 1.86 \times 10^{-19} \text{ J}$
Index of refraction	1.82 (at $1.0 \mu\text{m}$)
Scatter losses	$\alpha_{sc} \approx 0.002 \text{ cm}^{-1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แสดงฟลูออเรสเซนซ์สเปกตรัมของผลึกนีโอดีเมียมแยก



รูปที่ 2.9 แสดงระดับพลังงานของนีโอดีเมียมแยกเลเซอร์

เมื่อพิจารณาถึงกระบวนการเกิดเลเซอร์ของนีโอดีเมียมแยก จะเห็นได้ว่าเป็นเลเซอร์แบบ 4 ระดับพลังงาน ดังรูปที่ 2.8 โดยเลเซอร์ที่ได้จะมีความยาวคลื่น 1064 nm จะเห็นได้ว่าจะเกิดการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดูดกลืนพลังงาน (absorption) จากสถานะพื้นคือ $^4I_{9/2}$ หลังจากอะตอมของนีโอดีเมียมแยก ได้รับพลังงานแล้วจะถูกกระตุ้นให้เปลี่ยนระดับพลังงานไปยังระดับพลังงานสถานะกระตุ้นคือ $^4F_{5/2}$, $^4F_{7/2}$, $^2H_{9/2}$ และระดับพลังงานที่มากกว่าจะเกิดการลดระดับพลังงานของอะตอมในผลึกนีโอดีเมียมแยก มาอยู่ที่ระดับพลังงานในกลุ่ม $^4F_{3/2}$ ซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้ไม่มีการปล่อยรังสีออกมา (radiationless transition) หลังจากทีอะตอมของนีโอดีเมียมแยกมาอยู่ที่ระดับพลังงานในกลุ่มนี้แล้ว จะเกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานอีกครั้งโดยจะเกิดการปลดปล่อยโดยการกระตุ้น โดยกระบวนการนี้จะมีอะตอมบางส่วนเกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานแบบการปลดปล่อยโดยธรรมชาติก่อน หลังจากโฟตอนที่เกิดขึ้นจะเกิดการสะท้อนกลับไปกลับมาในควาวิตีของระบบเลเซอร์ แล้วไปกระตุ้นอะตอมบางส่วนที่ยังอยู่ในระดับพลังงาน $^4F_{3/2}$ ให้เปลี่ยนระดับพลังงานมายังระดับพลังงานต่ำกว่าโดยการเปลี่ยนระดับพลังงานในรูปแบบนี้จะเกิดเลเซอร์ หลังจากนั้นอะตอมที่อยู่ในระดับพลังงาน $^4I_{11/2}$, $^4I_{13/2}$ และ $^4I_{15/2}$ ซึ่งยังไม่เป็นสถานะพื้น ดังนั้นอะตอมที่ระดับพลังงานเหล่านี้จะเกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานมายังสถานะพื้น ($^4I_{9/2}$) อีกครั้ง โดยการเปลี่ยนแปลงในระดับพลังงานเหล่านี้จะเกิดแบบการปลดปล่อยโดยธรรมชาติอีกครั้งซึ่งจะไม่มีมีการปล่อยรังสีออกมาเช่นเดิม โดยปรากฏการณ์การปลดปล่อยโดยการกระตุ้นที่เกิดขึ้นในนีโอดีเมียมแยกนี้ ทำให้เลเซอร์ที่เกิดขึ้นจะให้ความยาวคลื่นหลายค่าด้วยกันดังนี้ คือ

$$- ^4F_{3/2} \Rightarrow ^4I_{11/2} = 0.60, \quad \lambda = 1064 \text{ nm}$$

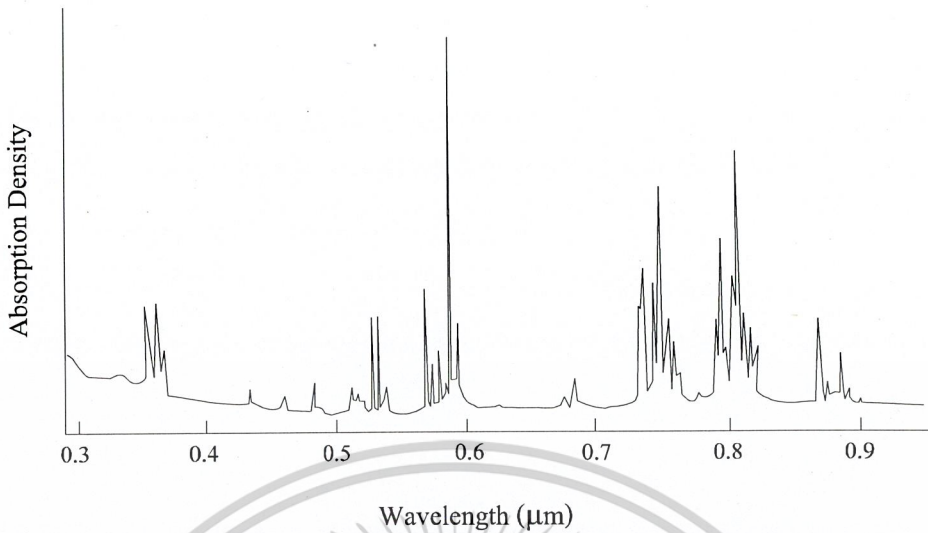
$$- ^4F_{3/2} \Rightarrow ^4I_{13/2} = 0.14, \quad \lambda = 1350 \text{ nm}$$

$$- ^4F_{3/2} \Rightarrow ^4I_{15/2} < 0.01, \quad \lambda = 1432 \text{ nm}$$

โดยว่าการเปลี่ยนระดับพลังงานที่เกิดจากกระบวนการการปลดปล่อยโดยการกระตุ้นนี้จะเกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานจาก $^4F_{3/2}$ มายังระดับพลังงาน $^4I_{11/2}$ มากที่สุด ประมาณ 60% ดังนั้นนีโอดีเมียมแยกเลเซอร์ที่ได้จึงมีความยาวคลื่น 1064 nm เป็นหลัก

2.4 พลังงานในการกระตุ้นนีโอดีเมียมแยกเลเซอร์

นีโอดีเมียมแยกเลเซอร์เป็นเลเซอร์ของแข็ง ที่ต้องใช้พลังงานแสงในการกระตุ้นเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนเพื่อให้เกิดกระบวนการทางเลเซอร์ โดยในการหาแหล่งพลังงานแสงที่เหมาะสมกับค่าระดับพลังงานที่ใช้กระตุ้นนั้นจะต้องดูจากค่าพลังงานในการดูดกลืนแสงของผลการดูดกลืนแสงของผลึกนีโอดีเมียมแยกเลเซอร์ ดังรูปที่ 2.10



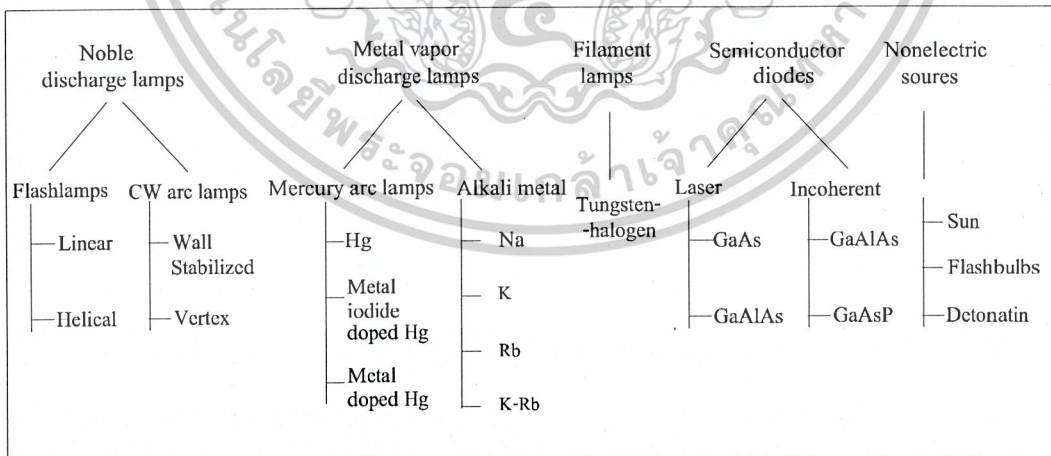
รูปที่ 2.10 แสดงผลการดูดกลืนแสงของผลึกนีโอดีเมียมแยกเลเซอร์

โดยพลังงานที่แสงที่ใช้กระตุ้นที่สำคัญๆ คือ จะใช้แสงในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 808 nm และ 750 nm ซึ่งทั้ง 2 ช่วงความยาวคลื่นนี้จะมีการดูดกลืนแสงที่เข้มมากของผลึกนีโอดีเมียมแยก โดยลักษณะของพลังงานที่ใช้กระตุ้นนั้นจะมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ คือ

1. พลังงานแสงที่ใช้กระตุ้นเป็นแบบต่อเนื่อง จะทำให้ลำแสงเลเซอร์ที่ได้เป็นแบบต่อเนื่อง
2. พลังงานแสงที่ใช้กระตุ้นเป็นแบบพัลส์ จะทำให้ลำแสงเลเซอร์ที่ได้เป็นแบบพัลส์

แหล่งจ่ายพลังงานที่ให้พลังงานแสงเพื่อใช้กระตุ้นนีโอดีเมียมแยกเลเซอร์นั้นดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 แหล่งพลังงานแสงที่ใช้กระตุ้นนีโอดีเมียมแยกเลเซอร์

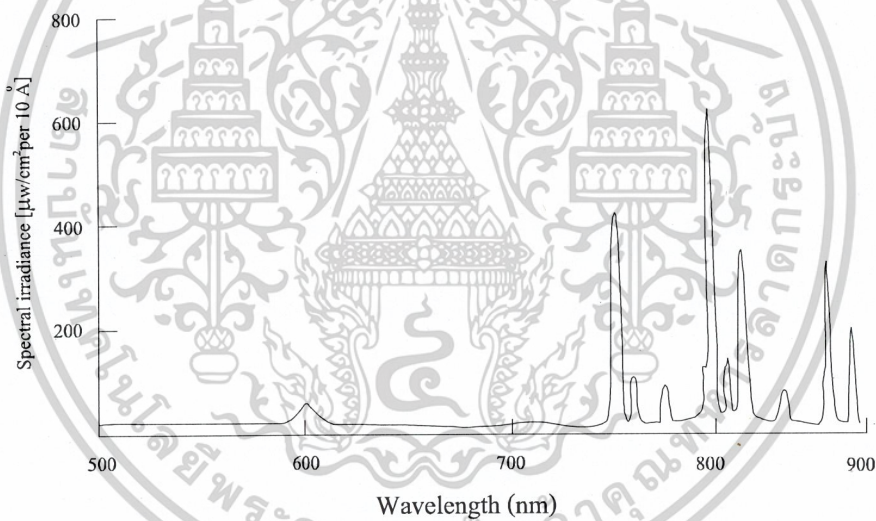


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่าเราสามารถที่จะใช้แหล่งพลังงานแสงที่กระตุ้นนีโอดีเมียม แยกนั้นหลายแบบด้วยกัน แต่ในปัจจุบันแหล่งพลังงานที่ใช้กระตุ้นและเป็นที่ยอมรับกันจะมีอยู่เพียงไม่กี่แบบเพราะมีการวิจัยและพัฒนาแล้วโดยจะคำนึงถึงประสิทธิภาพของแหล่งพลังงานแสงนั้นด้วย ซึ่งปกติจะใช้แหล่งพลังงานแสงที่ใช้กระตุ้นนีโอดีเมียมแยกมีอยู่ด้วยกัน 3 แบบใหญ่ๆ คือ

2.4.1. แหล่งจ่ายพลังงานแบบหลอดไฟแฟลช

เป็นแหล่งจ่ายพลังงานที่ให้แก่นีโอดีเมียมแยกเลเซอร์แบบลำแสงเป็นพัลส์ โดยหลอดไฟแฟลชที่ใช้จุดนั้นจะมีลักษณะของหลอดเป็นหลอดที่ประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรดและท่อควอตซ์ที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือแบบขดภายในจะบรรจุก๊าซซีนอน (Xe) ส่วนพลังงานที่จุดให้หลอดไฟแฟลชติดนั้นเราจะใช้พลังงานจากแหล่งจ่ายไฟ โดยเมื่อหลอดไฟแฟลชถูกจุดแต่ละครั้งหลอดไฟแฟลชจะเปล่งแสงออกมาและจะให้เส้นสเปกตรัมดังรูปที่ 2.12 ซึ่งเป็นข้อมูลจากบริษัท EG&G โดยความดันภายในหลอดเท่ากับ 1.7 atm ที่อุณหภูมิ 5200 °K และจ่ายกระแสไฟที่มีค่าต่ำๆ



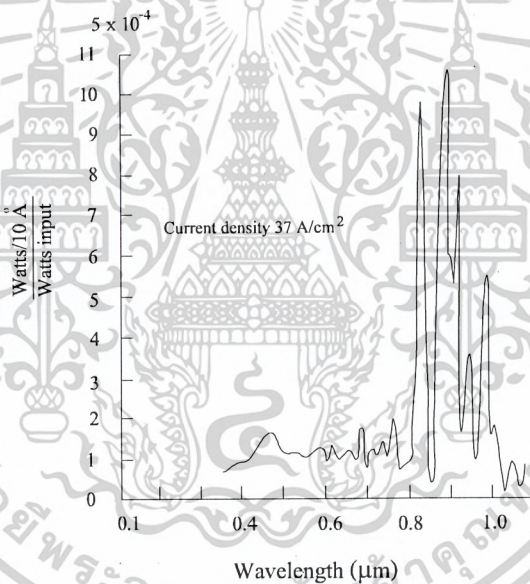
รูปที่ 2.11 เส้นสเปกตรัมที่หลอดไฟแฟลชที่เปล่งแสงออกมา

จากรูปที่ 2.11 จะเห็นได้ว่าหลอดไฟแฟลชแต่ละครั้งจะให้พลังงานสูงที่ความยาวคลื่นประมาณ 805 - 930 nm แต่ก็มีความยาวคลื่นอื่นปรากฏออกมาด้วย ซึ่งความยาวคลื่นอื่นๆ นี้จะไม่ได้ใช้ในการกระตุ้นนีโอดีเมียมแยกเลเซอร์ ดังนั้นค่าพลังงานความยาวคลื่นเหล่านี้จึงเป็นการสูญเสียพลังงานในระบบแบบเสียเปล่า ซึ่งความยาวคลื่นที่ได้จากหลอดไฟแฟลชจะสัมพันธ์กับความยาวคลื่นที่ใช้กระตุ้นนีโอดีเมียมแยกเลเซอร์

โดยทั่วไประบบการกระตุ้นนีโอดีเมียมแยกเลเซอร์ที่ใช้หลอดไฟฟเลซกระตุ้นนี้จะต้องมีระบบระบายความร้อนให้แก่หลอดไฟฟเลซ ซึ่งจะทำให้ระบบนีโอดีเมียมแยกเลเซอร์ที่ได้ มีขนาดใหญ่และยุ่งยาก แต่ว่าพลังงานของเลเซอร์ที่ได้จะมีกำลังงานสูงแบบพัลส์

2.4.2. แหล่งจ่ายพลังงานแบบหลอดไฟอาร์ค

ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายพลังงานที่ให้ลำแสงแบบต่อเนื่อง โดยลักษณะของหลอดไฟอาร์คนั้นจะมีลักษณะคล้ายกับหลอดไฟฟเลซแบบเส้นตรงแต่ก๊าซที่บรรจุที่นิยมใช้กัน คือ Krypton ที่ความดันสูง และพลังงานที่ใช้จุดหลอดไฟอาร์คนั้นจะใช้พลังงานจากแหล่งจ่ายไฟเช่นเดียวกับไฟฟเลซ และ เมื่อหลอดไฟอาร์คถูกจุด หลอดไฟอาร์คนั้นจะเปล่งแสงอย่างต่อเนื่องและจะให้เส้นสเปกตรัม ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งเป็นข้อมูลจากบริษัท ILC เมื่อขนาดของหลอดยาว 50 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร และความดันภายในหลอดเท่ากับ 4 atm และจ่ายกำลังให้เท่ากับ 1.3 kW



รูปที่ 2.12 แสดงเส้นสเปกตรัมของหลอดไฟอาร์คที่เปล่งแสงออกมา

โดยระบบการกระตุ้นของนีโอดีเมียมแยกเลเซอร์แบบใช้หลอดไฟอาร์คนั้นจะต้องมีระบบระบายความร้อนเหมือนกับหลอดไฟฟเลซเช่นเดียวกัน แต่พลังงานของเลเซอร์ที่ได้จะมีกำลังงานสูงแบบลำแสงต่อเนื่อง จากรูปที่ 2.12 จะเห็นได้ว่าหลอดไฟอาร์คที่ถูกจุดในแต่ละครั้งจะให้พลังงานสูงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 805-930 nm เช่นกันกับหลอดไฟฟเลซ แต่จะมีความยาวคลื่นอื่นปรากฏออกมาด้วย ซึ่งความยาวคลื่นอื่นๆ นี้จะไม่ได้ใช้ในการกระตุ้นนีโอดีเมียมแยกเลเซอร์ ดังนั้นค่าพลังงานความยาวคลื่นเหล่านี้จึงเป็นการสูญเสียพลังงานในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

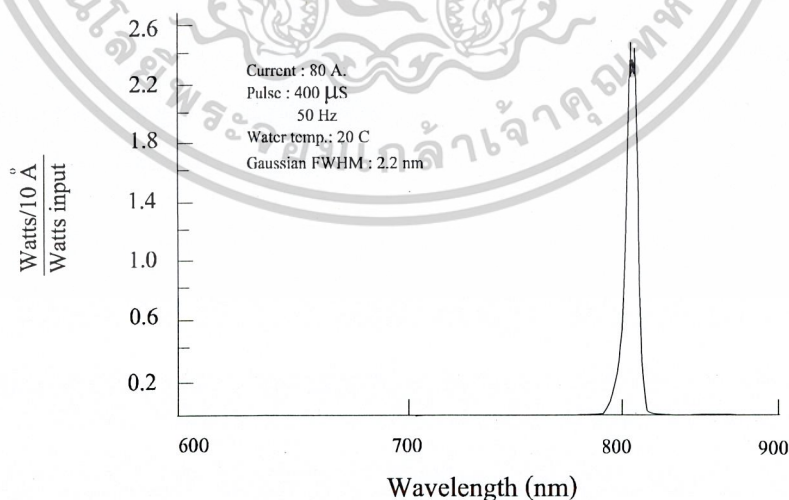
2.4.3. เลเซอร์ไดโอด

เลเซอร์ไดโอดเป็นแหล่งจ่ายกำลังงานให้แก่ไอดีเอ็มเอ็มแอลเลเซอร์รูปแบบใหม่และเป็นที่ยอมรับกันมาก ทำให้อิอดีเอ็มเอ็มแอลเลเซอร์ที่ได้เป็นแบบลำแสงต่อเนื่อง ในช่วงแรกจะใช้เลเซอร์ไดโอดเพียงตัวเดียวและต่อจากนั้นก็พัฒนาโดยการใช้เลเซอร์ไดโอดเป็นแถว (array) ซึ่งจะทำให้พลังงานที่กระตุ้นไอดีเอ็มเอ็มแอลเลเซอร์มากขึ้น ดังนั้นกำลังของไอดีเอ็มเอ็มแอลเลเซอร์ที่ได้ก็จะมีค่ามากขึ้นด้วย แต่ราคาของเลเซอร์ไดโอดจะสูงกว่าแหล่งจ่ายกำลังงานแบบทั้งหลอดไฟอาร์คและหลอดไฟแฟลช

สาเหตุที่นิยมใช้เลเซอร์ไดโอดในการกระตุ้นไอดีเอ็มเอ็มแอลเลเซอร์นั้นมีมาจากประสิทธิภาพของระบบซึ่งสูงกว่าระบบอื่น ๆ และอายุการใช้งานของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ และสภาวะทางอุณหภูมิก่อนไอดีเอ็มเอ็มแอลเลเซอร์ ซึ่งจะทำให้ลำแสงเลเซอร์ที่ได้มีคุณภาพดี รวมถึงไม่มีความยุ่งยากในเรื่องแหล่งจ่ายไฟให้แก่เลเซอร์ไดโอดเพราะใช้ความต่างศักย์ต่ำ และโดยภาพรวมระบบเลเซอร์นี้จะมีขนาดกระทัดรัดไม่ยุ่งยากเรื่องระบบระบายความร้อน

ประสิทธิภาพของเลเซอร์ไดโอดในการกระตุ้นไอดีเอ็มเอ็มแอลเลเซอร์ประมาณ 25-50% ซึ่งสูงกว่าหลอดไฟแฟลชและหลอดไฟอาร์คซึ่งมีประสิทธิภาพเพียง 1-5%

ส่วนอายุการใช้งานของเลเซอร์ไดโอดจะอยู่ในช่วงประมาณ 10,000 ชั่วโมง ในการใช้งานอย่างต่อเนื่อง ซึ่งถ้าเป็นหลอดไฟแฟลชอายุการใช้งานประมาณเพียง 200 ชั่วโมงเท่านั้น ส่วนเส้นสเปกตรัมปล่อยออกมาจากเลเซอร์ไดโอดสามารถดูได้จากรูปที่ 2.13 ซึ่งเป็นเลเซอร์ไดโอดแบบแถวของ Spectra Diode Laboratories



รูปที่ 2.13 แสดงเส้นสเปกตรัมที่เลเซอร์ไดโอดเปล่งออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (High Voltage Power Supply)

เป็นระบบจ่ายกำลังให้แก่หลอดแฟลช (Flash Lamp) ทำการแปลงไฟจาก $220V_{ac}$ เป็น $650V_{dc}$ ด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ แล้วผ่านไปยัง SCR ที่ต่ออยู่กับสวิตช์กัต เมื่อกดสวิตช์ก็จะจ่ายไฟไปยังหลอดแฟลช และกระตุ้นให้เกิดเลเซอร์ต่อไป

2.6 ตัวรับสัญญาณ (Detectors)

ในเลเซอร์วัดระยะจะมีค่าที่ต้องการสำคัญ ๆ 2 ตัวคือความไวและความเร็วในการตอบสนอง สิ่งที่ต้องพิจารณาอื่น ๆ คือ สัญญาณรบกวน, ขนาด, น้ำหนัก, ไฟเลี้ยงที่ต้องการ และ ค่าใช้จ่าย ประเภทของตัวรับสัญญาณโดยทั่วไปเราจะใช้ตัวรับสัญญาณระยะทางเป็น photomultipliers, silicon PIN photodiodes และในปัจจุบันจะมี silicon และ germanium avalanche diode เพิ่มขึ้นมา

2.6.1 Silicon photodiodes

ประโยชน์ที่สำคัญของ silicon photodiode คือ มีขนาดเล็ก, มีความทนทานและไม่สลับซับซ้อน เป็นตัวที่มีประสิทธิภาพทางควอนตัมสูงเมื่อเปรียบเทียบกับ photocathode ที่ 1.06 ไมโครเมตร สิ่งนั้นเหมาะสำหรับเลเซอร์วัดระยะที่ต้องการอัตรา carrier sweep-out สูง และความจุของ junction ต่ำที่ทำให้เหมาะสมกับคุณสมบัติ pulse ระดับนาโนของ Q-switched laser นอกเหนือจากนั้นแล้วเงื่อนไขนั้นคือมันไม่มีการขยายทางสัญญาณ

2.6.2 Avalanche photodiodes

ทั้ง Silicon และ germanium avalanche photodiode มีกระแสเหมาะที่ใช้ diode ทำงานเมื่อไบอัสกลับใกล้ขอบเขตของ avalanche และ อัตราการขยายผลในอุปกรณ์ที่สมบูรณ์โดยเกิดพาหะแบบทวีคูณ avalanche photodiode มีความไวในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเล็กๆ ในค่าโวลต์และอุณหภูมิใกล้ขอบเขต avalanche ดังนั้นเราควบคุมการเพิ่มอย่างอัตโนมัติอย่างระมัดระวังซึ่งไวต่อระดับสัญญาณรบกวนที่ต้องการสำหรับการทำงานเป็นกำลังขยายสูง

ชนิด	ประสิทธิภาพทางควอนตัมที่ 1.06 μm	กำลังขยายที่ 1.06 μm
Silicon diffused p-i-n	$\approx 65\%$	N / A
Silicon avalanche	$\approx 20\%$	>100
Germanium avalanche	$\approx 48\%$	≈ 50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ระบบประมวลผลสัญญาณ (Signal processor)

เมื่อเราได้รับสัญญาณจากตัวรับสัญญาณแล้ว เราจะนำสัญญาณที่ได้มาประมวลผลเพื่อหา ระยะทาง โดยนำสัญญาณที่ได้มาเข้าออสซิลโลสโคป ที่สามารถวัดความแตกต่างระหว่างสัญญาณ สองสัญญาณได้ในระดับนาโนวินาที เมื่อเราได้ระยะเวลาที่แสงเดินทางไปและกลับแล้วจะนำมา คำนวณหาเป็นระยะทางระหว่างเครื่องมือถึงเป้าหมาย โดยใช้สูตร

$$s = c \times \Delta t$$

เมื่อ s คือ ระยะทางระหว่างเครื่องวัดถึงเป้าหมาย

c คือ ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ 2.99792458×10^8 เมตรต่อวินาที

Δt คือ ระยะเวลาที่ต่างกันระหว่างสัญญาณเริ่มต้นและสิ้นสุดหารด้วย 2



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ส่วนประกอบต่างๆ ที่ใช้ในระบบเลเซอร์

3.1.1 Laser chamber

เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของระบบเลเซอร์ ซึ่งประกอบด้วยผิวสะท้อนแสงทรงรีหุ้มอยู่รอบแท่งผลึก Nd:YAG และหลอดไฟแฟลช โดยแท่งผลึก Nd:YAG และหลอดไฟแฟลชถูกจัดวางให้ขนานกันอยู่ที่จุดโฟกัสทั้งสองของวงรีตามแนวยาว



รูปที่ 3.1 แสดงองค์ประกอบภายใน Pump Chamber

ทั้งนี้สามารถจำแนกอุปกรณ์ที่สำคัญออกเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

3.1.1.1 แท่งผลึกนีโอดีเมียมแย็ก

แท่งผลึกนีโอดีเมียมแย็กที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะดังนี้

-ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 5 mm ยาว 65 mm

-ปริมาณการโดปของ Nd^{3+} ในผลึกเท่ากับ 1 %

-ทำการเคลือบป้องกันการสะท้อนที่ความยาวคลื่น 1064 nm และ 532 nm ที่ปลายทั้งสอง

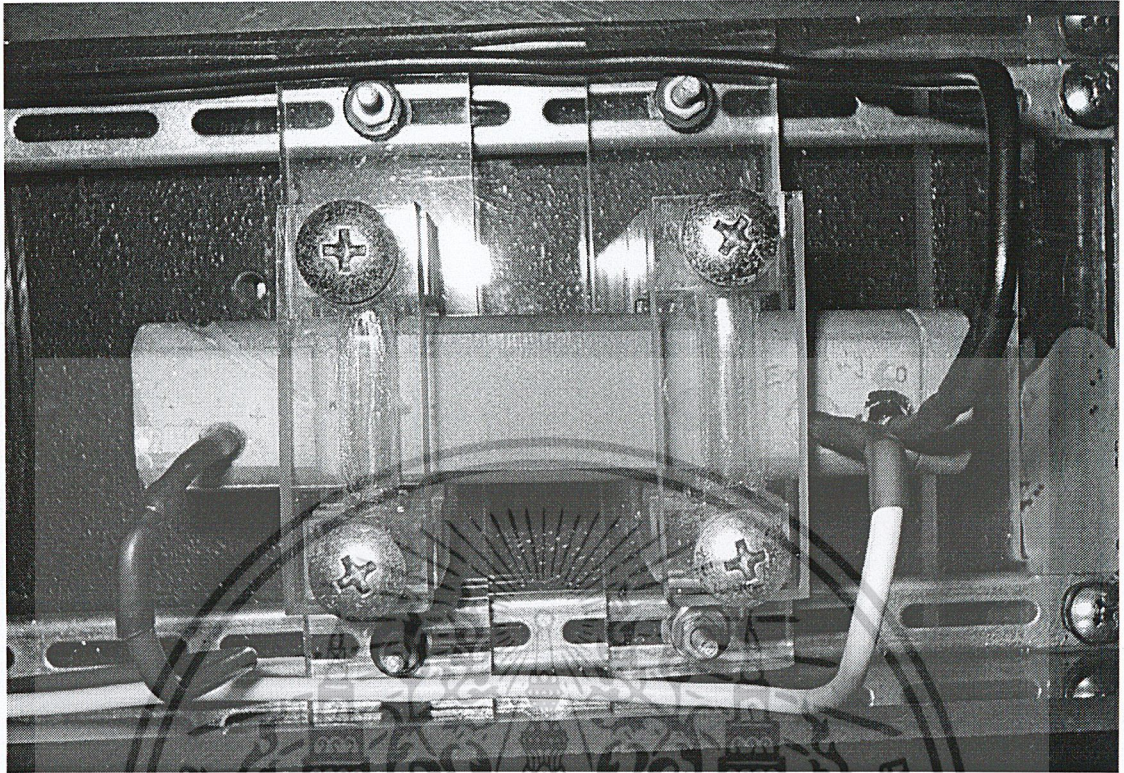
ข้างของแท่งผลึก

ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติของผลึกนีโอดีเมียมแอกไซด์ที่ใช้ในการทดลอง

Chemical formula	$\text{Nd} : \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$
Weight % Nd	0.725
Atomic % Nd	1.0
Nd atoms/cm ³	1.38×10^{20}
Density	4.56 g / cm^3
Line width	4.5 \AA
Spontaneous fluorescence lifetime	230 μs
Photon energy at 1.064 μm	$h\nu = 1.86 \times 10^{-19} \text{ J}$
Index of refraction	1.82 (at 1.0 μm)
Scatter losses	$\alpha_{sc} \approx 0.002 \text{ cm}^{-1}$

3.1.1.2 หลอดไฟแฟลช (Flash lamp)

ในการกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนระดับในระบบนีโอดีเมียมแอกไซด์เลเซอร์ โดยทั่วไปนิยมการใช้แหล่งกำเนิดแสงในกระตุ้น 2 แบบ คือ หลอดเปล่งแสงแบบใช้ก๊าซเฉื่อย โดยมากนิยมใช้ก๊าซ Xenon และก๊าซ Krypton บรรจุภายในหลอด ส่วนอีกแบบที่นิยมใช้คือเลเซอร์ไดโอด โดยทั่วไปการดิสชาร์จของก๊าซเฉื่อยจะเปรียบได้กับการเปล่งรังสีของ black body กับแถบเปล่งแสงโดยที่การปลดปล่อยรังสีของ black body เกิดจากการรวมกันของอิออนของก๊าซกับอิเล็กตรอน เพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสถานะของพันธะและจากการเปล่งรังสีแบบเบรมสตราลิ่ง (Bremstrahlung radiation) โดยที่ค่าต่าง ๆ เหล่านี้อาจพิจารณาได้จากการศึกษาปรากฏการณ์ของ effective temperature ซึ่งอุณหภูมิของการแผ่รังสีจากวัตถุจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 4,000 – 5,000 K



รูปที่ 3.2 หลอด Nd:YAG LASER และหลอดไฟแฟลช

3.1.2 แหล่งจ่ายกำลัง

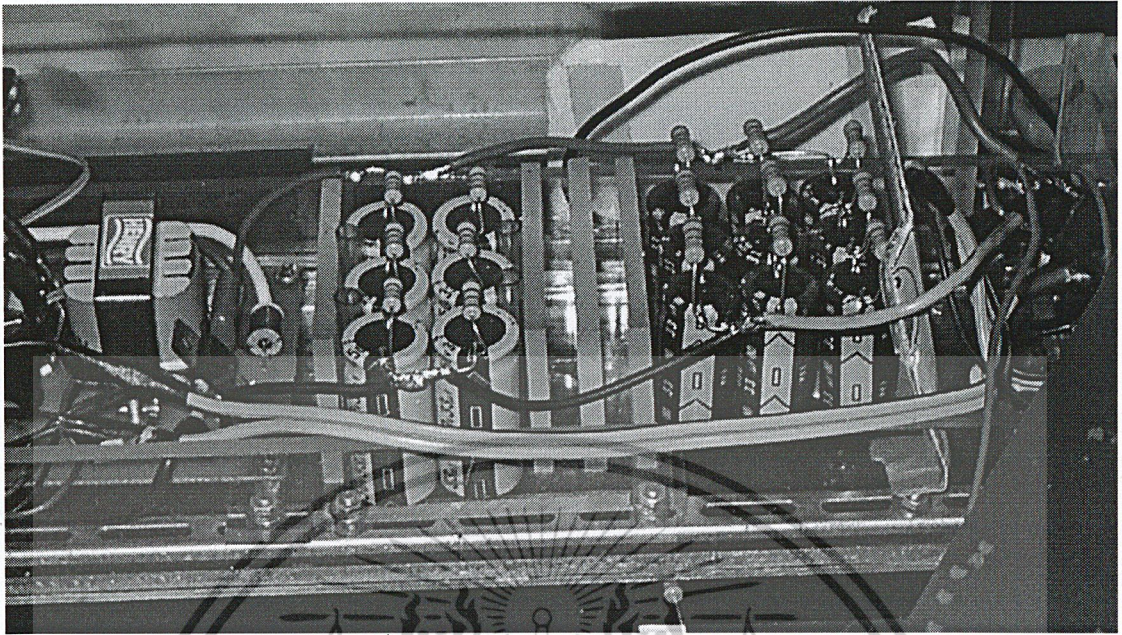
แหล่งจ่ายกำลังที่จ่ายให้แก่หลอดไฟแฟลชมีคุณสมบัติดังนี้คือ

- | | |
|---------------------------------------|------------------|
| 1. กำลังสูงสุดเท่ากับ | 45.5 W |
| 2. จ่ายกระแสเท่ากับ | 70 mA |
| 3. จ่ายแรงดันให้หลอดแฟลชเท่ากับ | 600 V (กระแสตรง) |
| 4. จ่ายแรงดันในการทริกหลอดแฟลชเท่ากับ | 600 V |

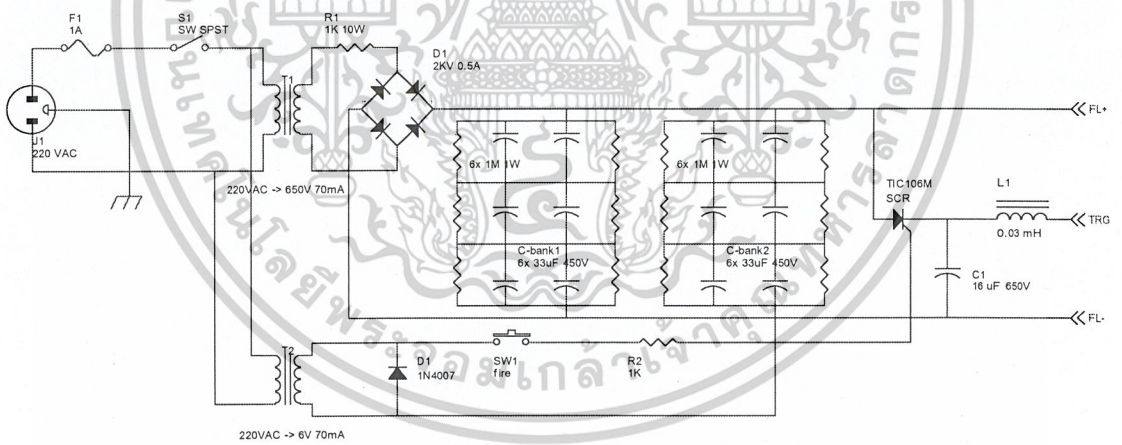
ในการออกแบบวงจรสำหรับแหล่งจ่ายกำลังนี้ เราได้เลือกใช้ SCR มาเป็นตัวควบคุมแรงดันที่ใช้ในการทริกให้หลอดแฟลชติด โดยตัว SCR มีคุณสมบัติดังนี้

- | | |
|--------------------|-------------|
| 1. แรงดันสถานะปิด | 600 V |
| 2. I_{GT} สูงสุด | 200 μ A |
| 3. V_{GT} | 1 V |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แหล่งจ่ายกำลังให้หลอดฟลูออโร



รูปที่ 3.4 วงจรแหล่งจ่ายกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

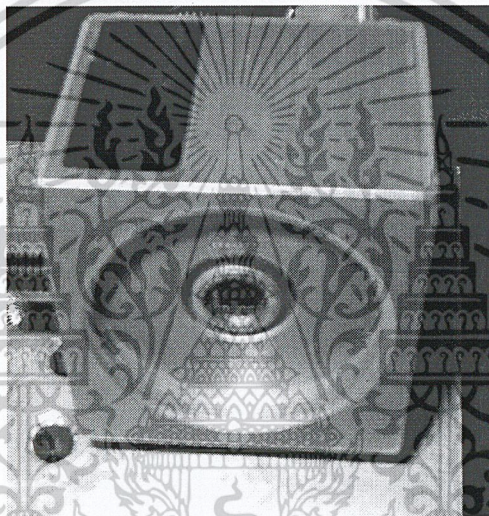
3.2 การวัดประสิทธิภาพของเลเซอร์

ในการวัดประสิทธิภาพของเลเซอร์ที่ได้ เพื่อที่จะหาข้อจำกัดของตัวเลเซอร์ เราได้ทำการวัดประสิทธิภาพของเลเซอร์ ดังนี้

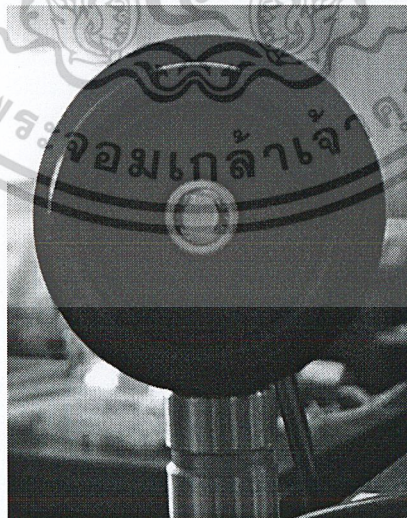
1. Pulse Energy
2. Pulse Width
3. Peak Power

3.3 ระบบวัดสัญญาณ

3.3.1 ตัวรับสัญญาณ (detector)



รูปที่ 3.5 ตัวรับสัญญาณเริ่มต้น



รูปที่ 3.6 ตัวรับสัญญาณสิ้นสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวรับสัญญาณที่ใช้เป็นชนิด Silicon PIN diode ที่สามารถรับแสงในช่วง Infrared ได้ ในการทดลองนี้ได้นำกระดาษเจาะรูมาวางไว้ด้านหน้าของตัวรับสัญญาณเพื่อลดสัญญาณรบกวนจากภายนอก

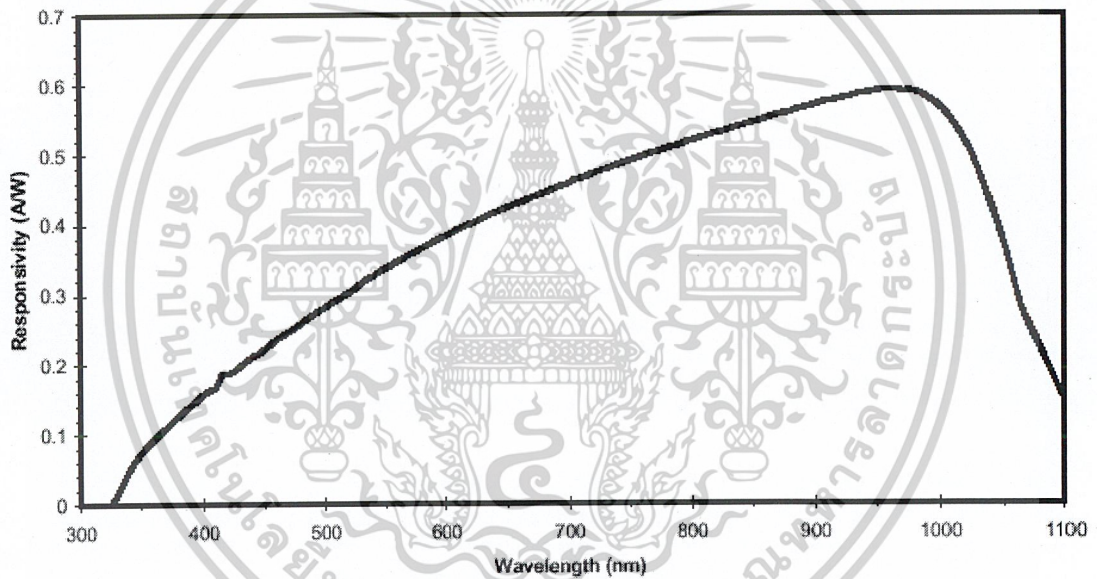
ตัวรับสัญญาณเริ่มต้นได้นำฟิลเตอร์มาวางไว้ด้านหน้าด้วย เพื่อลดขนาดของสัญญาณลงให้มีขนาดพอเหมาะกับตัวรับสัญญาณ เพื่อไม่ให้เกิดการขลิบที่ยอดของสัญญาณ

คุณสมบัติของตัวรับสัญญาณที่ใช้มีดังนี้

ชนิด : silicon PIN

Spectral response : 350-1100 nm (ดังรูปที่ 3.7)

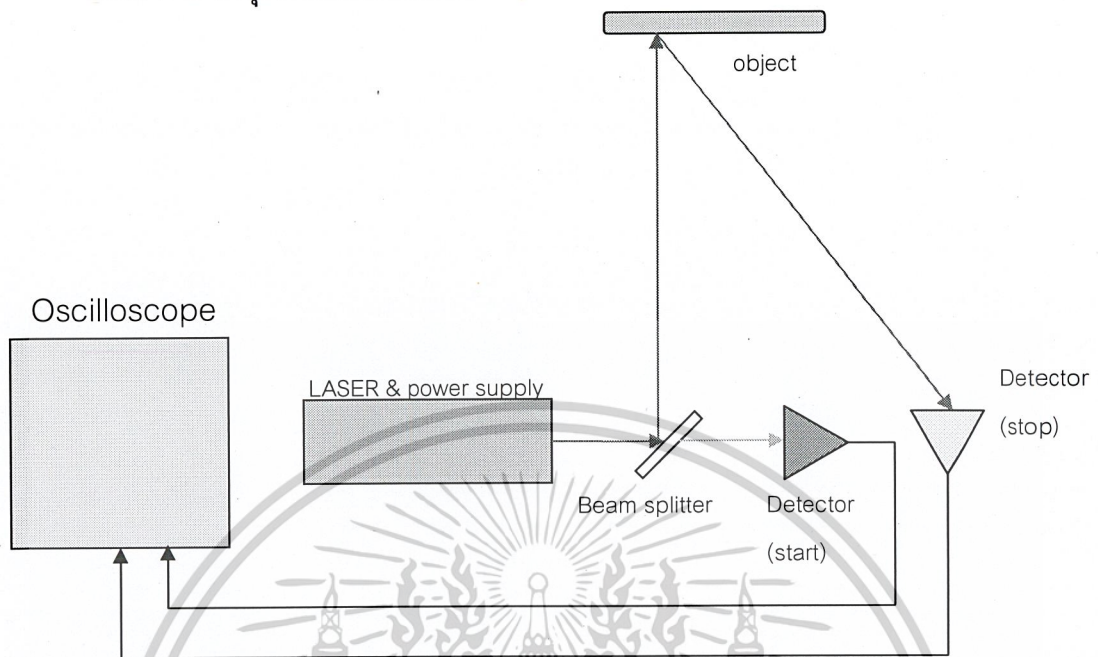
Rise/fall time : 20 ns



รูปที่ 3.7 Spectral Responsivity Curve ของตัวรับสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การจัดอุปกรณ์การทดลอง



รูปที่ 3.8 แผนภาพการจัดชุดทดลองที่ใช้

จากรูปข้างบน เมื่อเราทำการยิงเลเซอร์ ลำแสงเลเซอร์จะผ่านกระจก beam splitter โดยกระจก beam splitter จะมีหน้าที่แยกแสงเลเซอร์ออกเป็นสองส่วน โดยส่วนแรกจะทะลุผ่านเข้าสู่ตัวรับสัญญาณตัวที่ 1 ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นสัญญาณเริ่มต้นเข้าสู่ออสซิลโลสโคป ลำแสงเลเซอร์ส่วนที่สองจะสะท้อน beam splitter ไปยังวัตถุและสะท้อนจากวัตถุกลับมาสู่ตัวรับสัญญาณตัวที่ 2 จะได้สัญญาณเข้าออสซิลโลสโคปเป็นสัญญาณสิ้นสุด

การที่วางตัวรับสัญญาณที่รับสัญญาณสิ้นสุด ไว้ด้านข้างเนื่องจากแสงที่สะท้อนกลับมากมีการกระเจิงกลับมาและมีค่ากำลังที่ต่ำมากพอผ่าน beam splitter อีกครั้งทำให้สัญญาณมีค่าน้อยเกินกว่าที่ตัวรับสัญญาณจะสามารถรับได้ เนื่องจากการเปลี่ยนจุดที่วางตัวรับสัญญาณทำให้เกิดค่าผิดพลาดของระยะทางเกิดขึ้น ในระยะที่ใกล้ ๆ นั้นจะมีค่าผิดพลาดของระยะทางจากมุมที่เบี่ยงเบนไปจากการสะท้อนแต่ที่ระยะไกลๆ ค่ามุมนี้จะมีค่าน้อยลงจนเทียบได้กับระยะทางไป - กลับ

คุณสมบัติของ Beam splitter MS-25-1064-70/30-S ที่ใช้มีดังนี้

เป็น UV silica เคลือบด้วยโลหะ

%การสะท้อน/การทะลุผ่าน : 70/30±5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การประมวลผลสัญญาณ

เราใช้ออสซิลโลสโคปในการรับสัญญาณที่ได้จากตัวรับสัญญาณ ซึ่งออสซิลโลสโคปที่ใช้ คือ Tektronix TDS420A ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

Bandwidth:	200MHz
จำนวนช่องสัญญาณ (Channels):	4
Max Sample Rate:	100 MS/s
Sweep Speeds:	1 ns/div - 20 s/div
Vertical Sensitivity:	1 mV - 10 V



รูปที่ 3.9 ออสซิลโลสโคป Tektronix TDS420A

เมื่อเราได้สัญญาณเริ่มต้นและสิ้นสุดเราก็จะสามารถจะหาเวลาได้เป็น t_1 , t_2 โดย t_1 เป็นเวลาของสัญญาณเริ่มต้น และ t_2 เป็นเวลาของสัญญาณสิ้นสุดตามลำดับ จากนั้นเรานำเอาเวลาที่วัดได้ซึ่งเป็นเวลาที่ลำแสงเลเซอร์เดินทางไปและกลับหาสองเพื่อเป็นเวลาที่ เป็นจากเลเซอร์ถึงวัตถุ

$$\Delta t = \frac{t_1 - t_2}{2}$$

เวลาที่เรานั้นเราเอามาแทนในสมการที่เอาไว้หาระยะทางโดยที่ความเร็วนั้นเป็นความเร็วแสง $c = 2.99792458 \times 10^8$ m/s

$$s = v \times \Delta t$$

$$s = c \times \Delta t$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

การทดลองเครื่องวัดระยะทางด้วยแสงเลเซอร์ประกอบด้วยการทดลอง 3 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ ส่วนวัดคุณสมบัติของเลเซอร์, ส่วนวัดค่าความผิดพลาดของ ตัวรับสัญญาณ และส่วนที่ทำการทดลองวัดระยะทาง ซึ่งในส่วนที่ทำการทดลองวัดระยะทางจริงมีการปรับปรุงโดยเมื่อทำการทดลองจะมีการสร้างกล่องมาครอบตัวรับสัญญาณทั้ง 2 และตัวเลเซอร์ด้วย เพื่อต้องการลดแสงรบกวนจากภายนอก และลดการรบกวนจากแสงเลเซอร์ที่ไม่ได้มาจากการสะท้อนที่เป้าหมายอีกด้วย

4.1 ผลการทดลองจากการจัดอุปกรณ์

4.1.1 ทดลองเพิ่ม C-bank ให้แก่ Nd:YAG LASER และทำการวัดคุณสมบัติ

เมื่อได้ทำการทดลองยิง Nd:YAG LASER ออกมาแล้ว พบว่ามีพลังงานน้อยเกินไปจากการสังเกตเมื่อเลเซอร์ตกกระทบลงบนกระดาษ จึงได้ทำการเพิ่ม C-bank ให้แก่ Nd:YAG อีก โดย C-bank ที่ใช้มีค่าความจุ 22 μF เท่ากันกับของเดิม แล้วทำการวัดคุณสมบัติด้วยหัววัดกำลัง



รูปที่ 4.1 C-bank 1 ชุดที่ทำการเพิ่มเข้าไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติของ Nd:YAG LASER เมื่อทำการเพิ่ม C-bank

	1 c-bank	2 c-bank
ครั้งที่	E_{out} (mJ)	E_{out} (mJ)
1	4.90	47.10
2	4.78	46.50
3	4.87	47.50
4	4.93	48.60
5	4.81	40.40
6	5.03	43.00
7	4.88	45.40
8	4.85	44.00
9	5.13	46.50
10	4.82	47.30
E_{out} เฉลี่ย (mJ)	4.90	45.63
Volt (V)	865	865
C (μ F)	21.50	44.10
E_{in} (J)	8.04	16.31
Efficiency	0.06	0.28
P (W)	21.50	200.00
Bandwidth (μ s)	228	228

สรุปผลการทดลอง

การเพิ่ม C-bank ให้มีความจุมากขึ้น ทำให้มีพลังงานสะสมไว้ และจ่ายให้แก่หลอดแฟลชมากขึ้น จึงทำให้เลเซอร์มีประสิทธิภาพดีขึ้น มีกำลังสูงสุดสูงขึ้น ทำให้นำไปใช้ในการวัดระยะทางได้ดีขึ้น นั่นคือเมื่อมีพลังงานมาก เมื่อเกิดการสูญเสียพลังงานไประหว่างการเดินทาง ก็ยังคงมีพลังงานมากพอที่จะสามารถวัดได้เมื่อเลเซอร์เดินทางกลับมา

4.1.2 วัดค่าความผิดพลาดเมื่อนำตัวรับสัญญาณ 2 ตัว มาวางอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกัน

เป็นการทดลองที่ทำเพื่อต้องการหาค่าความผิดพลาดจากตัวรับสัญญาณทั้ง 2 ตัวว่ามีค่าที่ delay ต่างกันเท่าไร เพราะว่าการทดลองนี้ใช้ตัวรับสัญญาณถึง 2 ตัวด้วยกัน แน่ใจว่าทั้ง 2 ตัวต้องมีค่าที่ตอบสนองต่อแสงในความไวที่ไม่เท่ากัน V_{start} คือแรงดันสัญญาณจากตัวรับสัญญาณเริ่มต้น V_{stop} คือแรงดันสัญญาณจากตัวรับสัญญาณสิ้นสุด ที่อ่านได้จากออสซิลโลสโคป

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความผิดพลาดเมื่อนำตัวรับสัญญาณ 2 ตัว มาวางอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกัน

ครั้งที่	V_{start} (mV)	$90\%V_{start}$ (mV)	V_{stop} (V)	$90\%V_{stop}$ (V)	Δt (ns)
1	121.20	109.08	3.10	2.79	56.50
2	119.60	107.64	2.86	2.57	51.50
3	118.00	106.20	3.02	2.72	62.00
4	122.00	109.80	3.06	2.75	55.50
5	126.80	114.12	3.02	2.72	49.50
6	122.80	110.52	2.86	2.57	48.50
7	119.60	107.64	2.94	2.65	54.50
8	122.80	110.52	3.02	2.72	57.50
9	122.80	110.52	3.06	2.75	61.00
10	121.20	109.08	3.02	2.72	61.00
11	122.80	110.52	2.82	2.54	51.50
12	123.60	111.24	2.90	2.61	52.00
13	121.20	109.08	2.86	2.57	49.50
14	123.60	111.24	3.06	2.75	54.50
15	125.20	112.68	3.02	2.72	65.50
16	122.80	110.52	2.90	2.61	56.50
17	122.00	109.80	2.86	2.57	62.00
18	128.40	115.56	3.06	2.75	49.50
19	122.80	110.52	2.82	2.54	49.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

20	127.60	114.84	2.86	2.57	55.50
เฉลี่ย	122.84	110.56	2.96	2.66	55.18
				error	55.18 ns

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองได้ค่าความผิดพลาดที่ 55.18 ns เมื่อนำ ตัวรับสัญญาณ 2 ตัว มาวางอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกัน



รูปที่ 4.2 ขณะทำการวัดค่าความผิดพลาดเมื่อนำ ตัวรับสัญญาณ 2 ตัว มาวางอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน

4.1.3 วัดหาค่าความผิดพลาดเมื่อนำ ตัวรับสัญญาณ 2 ตัว มาวางอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกัน โดยมีการเพิ่มกระดาดเจาะรูวางไว้หน้าตัวรับเพื่อลดสัญญาณรบกวน

การทดลองนี้ทำการทดลองที่คล้ายกับการทดลองที่แล้วแต่มีการเพิ่มกระดาดเจาะรูเข้าที่หน้าตัวรับสัญญาณ เพื่อต้องการที่จะลด mode ของเลเซอร์ดังกล่าวเพื่อต้องการให้กราฟที่ออกมาเห็นค่าสูงสุดได้ชัดเจนขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความผิดพลาดโดยมีการเพิ่มกระดาศะจรู

ครั้งที่	V_{start} (mV)	$90\%V_{start}$ (mV)	V_{stop} (V)	$90\%V_{stop}$ (V)	Δt (ns)
1	324	291.60	11.56	10.40	53
2	336	302.40	11.88	10.69	56
3	328	295.20	12.28	11.05	60
4	334	300.60	12.04	10.84	56
5	332	298.80	11.96	10.76	46
6	338	304.20	11.88	10.69	49
7	332	298.80	11.88	10.69	45
8	338	304.20	11.80	10.62	48
9	330	297.00	11.88	10.69	63
10	334	300.60	11.80	10.62	45
11	332	298.80	11.88	10.69	46
12	330	297.00	12.04	10.84	54
13	330	297.00	11.96	10.76	47
14	320	288.00	11.80	10.62	62
15	326	293.40	11.80	10.62	63
16	330	297.00	11.80	10.62	46
17	320	288.00	11.80	10.62	62
18	324	291.60	11.80	10.62	61
19	318	286.20	12.04	10.84	62
20	320	288.00	11.32	10.19	54
เฉลี่ย	328.80	295.92	11.86	10.67	53.90
				ค่าความผิดพลาด	53.90 ns

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

การทดลองนี้ทำเพื่อต้องการที่จะขจัด mode ของเลเซอร์ออกไป โดยใช้เข็มเจาะรูกระดาษแข็ง เป็นรูเล็ก ๆ แล้วนำมาวัดค่าความผิดพลาดของ ตัวรับสัญญาณ ทั้ง 2 ได้ค่าความผิดพลาด ที่ 53.90 ns



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดลองจากการวัดระยะทาง

4.2.1 ทดลองวัดโดยเปลี่ยนตัวสะท้อน

การทดลองนี้เป็นการทดลองที่จัดทำเพื่อต้องการทราบว่าวัสดุชิ้นใดมีสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนมากที่สุด และสามารถทราบค่าเลเซอร์ Nd: YAG ชุดนี้สามารถสะท้อนวัสดุชนิดไหนได้ดีที่สุด โดยที่การทดลองนี้ได้ทำการเลือกใช้ตัวสะท้อนเลเซอร์ทั้งหมด 5 ชนิด ได้แก่ กระจก, เหยียดโลหะ, กระดาษแข็งสีขาว, ใบบนไม้สดและผ้า

ตารางที่ 4.4 แสดงสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนของวัตถุต่างชนิดกัน

ครั้งที่	กระจก		
	V_{start} (mV)	V_{stop} (V)	Δt (μs)
1	137.50	4.50	60
2	131.50	4.42	70
3	144.00	4.50	50
4	141.50	4.42	50
5	145.50	4.74	50
6	159.50	5.14	50
7	147.00	4.74	55
8	142.50	4.38	60
9	141.00	4.50	45
10	143.50	4.42	50
เฉลี่ย	143.35	4.58	54.00
		%R	31.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนของวัตถุต่างชนิดกัน (ต่อ)

ครั้งที่	เหรียญโลหะ		
	V_{start} (mV)	V_{stop} (V)	Δt (μs)
1	145.50	10.05	55
2	151.50	9.85	50
3	152.00	10.05	55
4	149.50	9.45	45
5	152.50	10.25	50
6	149.50	9.05	55
7	151.50	9.45	50
8	150.00	9.35	50
9	155.00	9.85	50
10	160.50	9.65	50
เฉลี่ย	151.75	9.70	51.00
		%R	63.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนของวัตถุต่างชนิดกัน (ต่อ)

ใบไม้สด			
ครั้งที่	V_{start} (mV)	V_{stop} (V)	Δt (μs)
1	176.00	3.42	50
2	154.00	5.10	50
3	155.50	5.02	55
4	160.00	4.94	50
5	158.00	4.94	60
6	162.00	4.62	50
7	152.00	4.88	65
8	156.50	4.94	55
9	160.00	4.86	55
10	162.00	4.54	55
เฉลี่ย	159.60	4.73	54.50
		%R	29.61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนของวัตถุต่างชนิดกัน (ต่อ)

กระดาษแข็งสีขาวมัน			
ครั้งที่	V_{start} (mV)	V_{stop} (V)	Δt (μs)
1	162.00	6.48	50
2	168.00	6.96	50
3	170.00	6.90	45
4	168.00	6.62	55
5	173.50	6.62	55
6	176.00	6.78	50
7	174.00	5.90	45
8	176.00	5.58	60
9	178.50	6.46	45
10	182.00	6.22	50
เฉลี่ย	172.80	6.45	50.50
		%R	37.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนของวัตถุต่างชนิดกัน (ต่อ)

ครั้งที่	ผ้า		
	V_{start} (mV)	V_{stop} (V)	Δt (μs)
1	184.00	4.62	50
2	196.50	4.78	55
3	183.00	4.62	55
4	178.00	4.70	50
5	179.00	4.70	55
6	186.00	4.70	50
7	184.00	4.78	50
8	182.00	4.62	50
9	180.00	4.70	45
10	182.00	4.54	50
เฉลี่ย	183.45	4.68	51.00
		%R	25.49

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองจะเห็นได้ว่า วัสดุแต่ละชนิดจะสามารถสะท้อนได้ดีไม่เท่ากันโดยจากการทดลองจะเห็นว่าเหรียญโลหะสามารถสะท้อนได้ดีที่สุด สะท้อนได้น้อยสุดคือผ้า โดยสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้เหรียญโลหะ กระดาษแข็งสีขาว ไม้สัด กระดาษ และ ผ้า

4.2.2 ทำการวัดโดยใช้จุดที่วัดต่างกันเป็น V_{max} , $90\%V_{max}$ และ $80\%V_{max}$

การทดลองนี้ทำเพื่อต้องการวัดค่าที่ใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุดเนื่องจากที่จุดสูงสุดของกราฟเป็น ripple จึงต้องทำการวัดค่าที่ life time แทนค่าสูงสุดและทำการเปรียบเทียบว่าจะใช้ค่า life time ที่ค่าไหนจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงการวัดที่ใช้จุดวัดที่ต่างกัน

ครั้งที่	V_{max}			$90\%V_{max}$			$80\%V_{max}$		
	V_{start} (mV)	V_{stop} (V)	Δt (ns)	V_{start} (mV)	V_{stop} (V)	Δt (ns)	V_{start} (mV)	V_{stop} (V)	Δt (ns)
1	338	730	41.00	304.00	657	70.00	270.40	584	57.50
2	334	690	90.00	300.60	621	65.50	267.20	552	58.50
3	338	670	29.50	304.20	603	59.50	270.10	536	58.50
4	334	650	49.50	300.60	585	66.50	267.20	520	55.00
5	338	650	60.00	304.20	585	65.50	270.10	520	49.50
6	334	690	41.00	300.60	621	65.50	267.20	552	59.50
7	338	690	62.00	304.20	621	69.50	270.10	552	62.50
8	338	670	53.50	304.20	603	63.00	270.10	536	60.00
9	338	670	39.00	304.20	603	70.00	270.10	536	59.00
10	334	650	39.50	300.60	585	53.50	267.20	520	57.50
11	338	670	42.50	304.20	603	76.00	270.10	536	57.00
12	338	670	69.50	304.20	603	68.00	270.10	536	54.50
13	338	690	48.50	304.20	621	63.00	270.10	552	61.50
14	338	690	51.00	304.20	621	76.50	270.10	552	61.50
15	338	650	41.00	304.20	585	64.00	271.00	520	64.00
เฉลี่ย	336.93	675.33	50.50	303.23	607.80	66.40	269.41	540.27	58.40
		s (m)	15.14		s (m)	19.91		s (m)	17.51

สรุปผลการทดลอง

เมื่อใช้ค่าสูงสุดของกราฟ ค่าที่ได้จะไม่คงที่นัก เพราะว่าที่จุดสูงสุดนั้นจะมี spike ที่มาก ต้องการที่จะหลีกเลี่ยงค่าดังกล่าว จึงต้องมาใช้ช่วง life time แทน โดยจากการทดลองเลือกใช้ค่าที่ใกล้เคียงมากที่สุด ที่ 80% และ 90% จากการทดลองแล้วสามารถเลือกได้ว่าค่า 90% ใกล้เคียงที่สุด

4.2.3 ทำการวัดที่ระยะต่างๆ

การทดลองนี้ทำการวัดระยะทางจริงโดยที่ระยะทางที่คำนวณได้จะมาจากเวลาที่ life time 90% เพราะจากการทดลองที่ผ่านมาให้ค่าที่เป็นที่พอใจในระดับหนึ่ง โดยการทดลองนี้จะทำการทดลองภายในห้องทดลองโดยจะทำการวัดทีละ 1 เมตรแล้วเลื่อนตัวสะท้อนออกไปทีละ 1 เมตร (ตัวสะท้อนในที่นี้ทำจากกระจก)

ตารางที่ 4.6 แสดงการวัดระยะทาง ที่ระยะ 1-10 เมตร

ระยะ 1 เมตร						
ครั้งที่	V_{start} (mV)	$90\%V_{start}$ (mV)	V_{stop} (V)	$90\%V_{stop}$ (V)	$\Delta t_{100\%}$ (ns)	$\Delta t_{90\%}$ (ns)
1	309	278.10	4.94	4.45	64	84
2	319	287.10	4.82	4.34	48	80
3	311	279.90	4.82	4.34	40	80
4	311	279.90	4.42	3.98	52	68
5	311	279.90	4.66	4.19	48	76
6	315	283.50	4.74	4.27	52	84
7	311	279.90	4.82	4.34	52	84
8	311	279.90	5.46	4.91	56	92
9	309	278.10	5.06	4.55	56	88
10	311	279.90	5.46	4.91	52	84
11	315	283.50	5.46	4.91	52	84
12	321	288.90	5.22	4.70	52	88
13	313	281.70	5.26	4.73	48	84
14	311	279.90	5.58	5.02	52	84
15	319	287.10	6.2	5.58	48	88
เฉลี่ย	313.13	281.82	5.13	4.62	51.47	83.20
ลบค่าความผิดพลาด					-2.43	29.30
$\Delta t/2$ (ns)					-1.22	14.65
s (m)					-0.36	4.39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงการวัดระยะทาง ที่ระยะ 1-10 เมตร (ต่อ)

ระยะ 2 เมตร						
ครั้งที่	V_{start} (mV)	$90\%V_{start}$ (mV)	V_{stop} (V)	$90\%V_{stop}$ (V)	$\Delta t_{100\%}$ (ns)	$\Delta t_{90\%}$ (ns)
1	299	269.10	7.16	6.44	52	92
2	301	270.90	7.16	6.44	56	88
3	303	272.70	7.24	6.52	52	84
4	301	270.90	6.76	6.08	50	84
5	301	270.90	7.16	6.44	48	88
6	301	270.90	7.16	6.44	56	84
7	311	279.90	6.84	6.16	52	84
8	303	272.70	6.76	6.08	52	80
9	301	270.90	6.84	6.16	52	84
10	311	279.90	6.92	6.23	52	88
11	303	272.70	6.92	6.23	52	80
12	301	270.90	7.24	6.52	56	88
13	305	274.50	7.16	6.44	52	85
14	303	272.70	6.92	6.23	56	96
15	299	269.10	7.00	6.30	52	92
เฉลี่ย	302.87	272.58	7.01	6.32	52.67	86.47
ลบค่าความผิดพลาด					-1.23	32.57
$\Delta t/2$ (ns)					-0.62	16.28
s (m)					-0.18	4.88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงการวัดระยะทาง ที่ระยะ 1-10 เมตร (ต่อ)

ระยะ 3 เมตร						
ครั้งที่	V_{start} (mV)	$90\%V_{start}$ (mV)	V_{stop} (V)	$90\%V_{stop}$ (V)	$\Delta t_{100\%}$ (ns)	$\Delta t_{90\%}$ (ns)
1	291	261.90	2.88	2.59	52	80
2	295	265.50	2.76	2.48	52	86
3	301	270.90	3.12	2.81	56	86
4	295	265.50	2.68	2.41	52	88
5	297	267.30	3.12	2.81	52	88
6	305	274.50	2.32	2.09	52	83
7	293	263.70	2.02	1.82	52	83
8	295	265.50	2.02	1.82	56	88
9	297	267.30	1.86	1.67	52	85
10	297	267.30	1.90	1.71	56	92
11	295	265.50	2.86	2.57	52	84
12	297	267.30	2.82	2.54	48	80
13	295	265.50	2.74	2.47	52	88
14	297	267.30	2.94	2.65	56	88
15	295	265.50	2.74	2.47	56	84
เฉลี่ย	296.33	266.70	2.59	2.33	53.07	85.53
ลบค่าความผิดพลาด					-0.83	31.63
$\Delta t/2$ (ns)					-0.42	15.82
s (m)					-0.12	4.74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงการวัดระยะทาง ที่ระยะ 1-10 เมตร (ต่อ)

ระยะ 4 เมตร						
ครั้งที่	V_{start} (mV)	$90\%V_{start}$ (mV)	V_{stop} (V)	$90\%V_{stop}$ (V)	$\Delta t_{100\%}$ (ns)	$\Delta t_{90\%}$ (ns)
1	295	265.50	5.64	5.08	60	76
2	299	269.10	5.72	5.15	54	84
3	295	265.50	5.72	5.15	56	84
4	295	265.50	5.88	5.29	52	72
5	297	267.30	6.28	5.65	56	81
6	299	269.10	7.00	6.30	52	74
7	299	269.10	7.48	6.73	52	80
8	299	269.10	7.80	7.02	60	84
9	299	269.10	7.40	6.66	56	80
10	297	267.30	6.00	5.40	54	64
11	295	265.50	6.28	5.65	50	80
12	303	272.70	6.52	5.87	48	76
13	299	269.10	6.92	6.23	56	88
14	297	267.30	6.20	5.58	44	77
15	301	270.90	6.36	5.72	52	84
เฉลี่ย	297.93	268.14	6.48	5.83	53.47	74.13
ลบค่าความผิดพลาด					-0.43	20.23
$\Delta t/2$ (ns)					-0.22	10.12
s (m)					-0.06	3.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงการวัดระยะทาง ที่ระยะ 1-10 เมตร (ต่อ)

ระยะ 5 เมตร						
ครั้งที่	V_{start} (mV)	$90\%V_{start}$ (mV)	V_{stop} (V)	$90\%V_{stop}$ (V)	$\Delta t_{100\%}$ (ns)	$\Delta t_{90\%}$ (ns)
1	299	269.10	3.72	3.35	52	88
2	301	270.90	4.20	3.78	60	100
3	307	276.30	3.56	3.20	52	80
4	301	270.90	3.96	3.56	60	83
5	303	272.70	3.96	3.56	56	84
6	307	276.30	4.12	3.71	56	86
7	303	272.70	3.32	2.99	52	82
8	303	272.70	3.32	2.99	52	82
9	307	276.30	3.24	2.92	52	76
10	305	274.50	3.40	3.06	60	88
11	307	276.30	3.40	3.06	56	88
12	307	276.30	3.40	3.06	56	88
13	303	272.70	3.24	2.92	44	85
14	305	274.50	3.40	3.06	56	89
15	315	283.50	4.52	4.07	44	84
เฉลี่ย	304.87	274.38	3.65	3.29	53.87	85.53
ลบค่าความผิดพลาด					-0.03	31.63
$\Delta t/2$ (ns)					-0.02	15.82
s					-5.00mm	4.74m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงการวัดระยะทาง ที่ระยะ 1-10 เมตร (ต่อ)

ระยะ 6 เมตร						
ครั้งที่	V_{start} (mV)	$90\%V_{start}$ (mV)	V_{stop} (V)	$90\%V_{stop}$ (V)	$\Delta t_{100\%}$ (ns)	$\Delta t_{90\%}$ (ns)
1	311	279.90	3.22	2.90	52	84
2	315	283.50	3.22	2.90	52	84
3	315	283.50	3.26	2.93	64	84
4	139	125.10	3.14	2.83	48	88
5	323	290.70	3.10	2.79	48	88
6	321	288.90	3.10	2.79	52	84
7	317	285.30	3.34	3.01	56	88
8	317	285.30	2.94	2.65	56	88
9	321	288.90	2.98	2.68	56	88
10	317	285.30	2.94	2.65	44	84
11	315	283.50	2.90	2.61	52	84
12	317	285.30	3.38	3.04	48	84
13	321	288.90	3.42	3.08	48	84
14	317	285.30	3.34	3.01	56	84
15	319	287.10	3.38	3.04	52	84
เฉลี่ย	305.67	275.10	3.18	2.86	52.27	85.33
ลบค่าความผิดพลาด					-1.63	31.43
$\Delta t/2$ (ns)					-0.82	15.72
s (m)					-0.24	4.71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงการวัดระยะทาง ที่ระยะ 1-10 เมตร (ต่อ)

ระยะ 7 เมตร						
ครั้งที่	V_{start} (mV)	$90\%V_{start}$ (mV)	V_{stop} (V)	$90\%V_{stop}$ (V)	$\Delta t_{100\%}$ (ns)	$\Delta t_{90\%}$ (ns)
1	291	261.90	1.68	1.67	76	90
2	299	269.10	1.94	1.75	64	97
3	301	270.90	1.94	1.75	60	84
4	305	274.50	2.02	1.82	60	84
5	293	263.70	2.34	2.11	68	93
6	303	272.70	2.38	2.14	64	89
7	303	272.70	2.42	2.18	56	82
8	295	265.50	2.38	2.14	52	92
9	303	272.70	2.50	2.25	68	98
10	303	272.70	2.34	2.11	60	88
11	299	269.10	2.22	2.00	68	84
12	305	274.50	2.22	2.00	76	84
13	305	274.50	1.82	1.64	64	80
14	309	278.10	2.02	1.82	76	80
15	309	278.10	2.14	1.93	84	88
เฉลี่ย	301.53	271.38	2.16	1.95	66.40	87.53
ลบค่าความผิดพลาด					12.50	33.63
$\Delta t/2$ (ns)					6.25	16.82
s (m)					1.87	5.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงการวัดระยะทาง ที่ระยะ 1-10 เมตร (ต่อ)

ระยะ 8 เมตร						
ครั้งที่	V_{start} (mV)	$90\%V_{start}$ (mV)	V_{stop} (V)	$90\%V_{stop}$ (V)	$\Delta t_{100\%}$ (ns)	$\Delta t_{90\%}$ (ns)
1	311	279.90	1.94	1.75	84	84
2	307	276.90	1.82	1.64	60	84
3	303	272.70	1.57	1.41	52	80
4	309	278.10	1.85	1.67	64	84
5	307	276.90	1.67	1.50	64	85
6	317	285.30	1.71	1.54	72	85
7	311	279.90	1.67	1.50	72	76
8	307	276.90	1.73	1.56	56	84
9	323	290.70	1.67	1.50	60	80
10	317	285.30	1.67	1.50	56	78
11	307	276.90	1.53	1.38	68	82
12	319	287.10	1.57	1.41	68	82
13	313	281.70	1.63	1.47	68	82
14	315	283.50	1.57	1.41	64	80
15	309	278.10	1.49	1.34	64	84
เฉลี่ย	311.67	280.66	1.67	1.50	64.80	82.00
ลบค่าความผิดพลาด					10.90	28.10
$\Delta t/2$ (ns)					5.45	14.05
s (m)					1.63	4.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงการวัดระยะทาง ที่ระยะ 1-10 เมตร (ต่อ)

ระยะ 9 เมตร						
ครั้งที่	V_{start} (mV)	$90\%V_{start}$ (mV)	V_{stop} (V)	$90\%V_{stop}$ (V)	$\Delta t_{100\%}$ (ns)	$\Delta t_{90\%}$ (ns)
1	313	281.70	1.25	1.76	72	88
2	309	278.10	1.97	1.77	64	78
3	309	278.10	1.95	1.76	72	86
4	309	278.10	2.19	1.97	72	82
5	309	278.10	2.01	1.88	68	84
6	309	278.10	1.89	1.70	68	84
7	322	289.80	2.03	1.83	64	88
8	309	278.10	1.87	1.68	64	84
9	317	285.30	1.99	1.79	64	88
10	307	276.30	2.03	1.83	60	84
11	309	278.10	1.99	1.79	60	82
12	321	288.90	1.91	1.72	68	84
13	309	278.10	1.97	1.77	68	82
14	311	279.90	2.07	1.86	68	84
15	311	279.90	1.91	1.72	64	85
เฉลี่ย	311.60	280.44	1.93	1.79	66.40	84.20
ลบค่าความผิดพลาด					12.50	30.30
$\Delta t/2$ (ns)					6.25	15.15
s (m)					1.87	4.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงการวัดระยะทาง ที่ระยะ 1-10 เมตร (ต่อ)

ระยะ 10 เมตร						
ครั้งที่	V_{start} (mV)	$90\%V_{start}$ (mV)	V_{stop} (V)	$90\%V_{stop}$ (V)	$\Delta t_{100\%}$ (ns)	$\Delta t_{90\%}$ (ns)
1	299	269.10	1.71	1.54	64	80
2	299	261.10	1.69	1.52	60	84
3	301	270.90	1.65	1.49	60	70
4	291	261.90	5.8	5.22	64	90
5	289	261.10	6.32	5.72	64	88
6	291	261.90	5.8	5.22	68	90
7	293	263.70	5.8	5.22	64	95
8	291	261.90	6.2	5.58	68	86
9	289	261.10	6.68	6.01	64	88
10	283	263.70	5.72	5.15	68	95
11	301	270.90	5.32	4.79	60	92
12	291	261.90	4.68	4.21	56	89
13	295	265.50	4.68	4.21	64	93
14	293	263.70	4.68	4.21	56	85
15	288	261.10	4.68	4.21	60	95
เฉลี่ย	292.93	263.97	4.76	4.29	62.67	88.00
ลบค่าความผิดพลาด					8.76	34.10
$\Delta t/2$ (ns)					4.38	17.05
s (m)					1.31	5.11

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าที่ได้ยังไม่ค่อยชัดเจนนักค่ายังมีการแกว่งอยู่โดยทำการทดลองที่วัดระยะโดยใช้ทั้ง 90% และ 100% เพื่อทำการเปรียบเทียบกันว่าค่าที่ได้ค่าไหนเป็นค่าที่ดีที่สุดจากการทดลองนี้ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าค่าไหนเป็นค่าที่ดีที่สุดจึงต้องทำการแก้ไขในครั้งต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ทำการวัดที่ระยะต่างๆ

วัตถุประสงค์ สามารถทำการทดลองได้และนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าจริง

วิธีการทดลอง

ทำการทดลองคล้ายกับการทดลองครั้งที่แล้ว แต่การทดลองนี้จะอ่านค่าสูงสุดโดยใช้สายตาคะเนจุดยอดของสูงสุดเองแล้วนำค่าที่ได้มาเฉลี่ย โดยการทดลองนี้ทำการทดลองภายในห้องทดลองเช่นเดิม

ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.7 แสดงการวัดระยะทางโดยใช้การประมาณกึ่งกลาง ที่ระยะ 1-10 เมตร

ระยะ 1 เมตร			
ครั้งที่	V_{start} (mV)	V_{stop} (V)	Δt (ns)
1	304	11.60	64
2	314	11.20	60
3	302	9.80	52
4	306	8.80	52
5	310	9.80	64
6	310	9.60	64
7	306	9.00	56
8	314	8.60	60
9	308	9.00	64
10	310	8.60	52
เฉลี่ย	308.40	9.60	58.80
ลบค่าความผิดพลาด			4.90
$\Delta t/2$ (ns)			2.45
s(m)			0.73
ค่าความผิดพลาด(%)			26.55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 แสดงการวัดระยะทางโดยใช้การประมาณกึ่งกลาง ที่ระยะ 1-10 เมตร(ต่อ)

ระยะ 2 เมตร			
ครั้งที่	V_{start} (mV)	V_{stop} (V)	Δt (ns)
1	308	7.40	64
2	310	7.80	68
3	318	7.20	60
4	318	8.00	64
5	312	7.40	68
6	310	7.60	64
7	318	7.80	72
8	308	7.40	60
9	322	7.80	80
10	310	7.40	64
เฉลี่ย	313.40	7.58	66.40
ลบค่าความผิดพลาด			12.50
$\Delta t/2$ (ns)			6.25
s(m)			1.87
ค่าความผิดพลาด(%)			6.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 แสดงการวัดระยะทางโดยใช้การประมาณกึ่งกลาง ที่ระยะ 1-10 เมตร(ต่อ)

ระยะ 3 เมตร			
ครั้งที่	V_{start} (mV)	V_{stop} (V)	Δt (ns)
1	310	6.80	72
2	312	6.00	68
3	320	6.64	84
4	312	6.40	72
5	320	6.16	68
6	320	5.92	64
7	322	5.76	68
8	312	5.76	72
9	320	5.92	68
10	312	5.92	68
เฉลี่ย	316.00	6.13	70.40
ลบค่าความผิดพลาด			16.50
$\Delta t/2$ (ns)			8.25
s(m)			2.47
ค่าความผิดพลาด(%)			17.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 แสดงการวัดระยะทางโดยใช้การประมาณกึ่งกลาง ที่ระยะ 1-10 เมตร(ต่อ)

ระยะ 4 เมตร			
ครั้งที่	V_{start} (mV)	V_{stop} (V)	Δt (ns)
1	310	1.24	80
2	320	1.26	82
3	318	1.30	80
4	320	1.26	78
5	320	1.26	74
6	320	1.36	88
7	316	1.26	80
8	318	1.30	72
9	310	1.26	72
10	316	1.26	74
เฉลี่ย	316.80	1.28	78.00
ลบค่าความผิดพลาด			24.10
$\Delta t/2$ (ns)			12.05
s(m)			3.61
ค่าความผิดพลาด(%)			9.69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 แสดงการวัดระยะทางโดยใช้การประมาณกึ่งกลาง ที่ระยะ 1-10 เมตร(ต่อ)

ระยะ 5 เมตร			
ครั้งที่	V_{start} (mV)	V_{stop} (mV)	Δt (ns)
1	308	828	84
2	310	844	86
3	318	812	92
4	320	900	88
5	318	796	80
6	316	844	84
7	316	884	92
8	316	932	88
9	318	924	84
10	308	876	82
เฉลี่ย	314.80	852.00	86.00
ลบค่าความผิดพลาด			32.10
$\Delta t/2(ns)$			16.05
s(m)			4.81
ค่าความผิดพลาด(%)			3.77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 แสดงการวัดระยะทางโดยใช้การประมาณกึ่งกลาง ที่ระยะ 1-10 เมตร(ต่อ)

ระยะ 6 เมตร			
ครั้งที่	V_{start} (mV)	V_{stop} (mV)	Δt (ns)
1	303	322	92
2	312	396	96
3	302	396	94
4	304	244	88
5	300	232	92
6	310	240	96
7	310	240	94
8	310	236	104
9	310	220	88
10	308	232	92
เฉลี่ย	306.90	275.80	93.60
ลบค่าความผิดพลาด			39.70
$\Delta t/2$ (ns)			19.85
s(m)			5.95
ค่าความผิดพลาด(%)			0.82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 แสดงการวัดระยะทางโดยใช้การประมาณกึ่งกลาง ที่ระยะ 1-10 เมตร(ต่อ)

ระยะ 7 เมตร			
ครั้งที่	V_{start} (mV)	V_{stop} (mV)	Δt (ns)
1	302	234	96
2	310	238	96
3	310	230	100
4	300	232	108
5	310	228	104
6	300	220	100
7	302	208	96
8	304	220	104
9	302	216	102
10	310	220	96
เฉลี่ย	305.00	224.60	100.20
ลบค่าความผิดพลาด			46.30
$\Delta t/2$ (ns)			23.15
s(m)			6.94
ค่าความผิดพลาด(%)			0.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 แสดงการวัดระยะทางโดยใช้การประมาณกึ่งกลาง ที่ระยะ 1-10 เมตร(ต่อ)

ระยะ 8 เมตร			
ครั้งที่	V_{start} (mV)	V_{stop} (mV)	Δt (ns)
1	312	216	104
2	310	204	104
3	310	198	96
4	310	216	108
5	312	204	106
6	312	204	104
7	310	216	104
8	310	212	100
9	310	220	102
10	312	212	116
เฉลี่ย	310.80	210.20	104.40
ลบค่าความผิดพลาด			50.50
$\Delta t/2$ (ns)			25.25
s(m)			7.57
ค่าความผิดพลาด(%)			5.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 แสดงการวัดระยะทางโดยใช้การประมาณกึ่งกลาง ที่ระยะ 1-10 เมตร(ต่อ)

ระยะ 9 เมตร			
ครั้งที่	V_{start} (mV)	V_{stop} (mV)	Δt (ns)
1	302	126	108
2	302	118	96
3	300	110	110
4	300	114	100
5	300	110	110
6	300	106	110
7	302	106	114
8	300	128	114
9	300	116	100
10	300	112	100
เฉลี่ย	300.60	114.60	106.20
ลบค่าความผิดพลาด			52.30
$\Delta t/2$ (ns)			26.15
s(m)			7.84
ค่าความผิดพลาด(%)			12.89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 แสดงการวัดระยะทางโดยใช้การประมาณกึ่งกลาง ที่ระยะ 1-10 เมตร(ต่อ)

ระยะ 10 เมตร			
ครั้งที่	V_{start} (mV)	V_{stop} (mV)	Δt (ns)
1	300	104	116
2	302	120	120
3	302	120	116
4	300	120	114
5	300	116	120
6	300	120	112
7	300	120	120
8	302	120	120
9	300	112	112
10	300	112	112
เฉลี่ย	300.60	116.40	116.20
ลบค่าความผิดพลาด			62.30
$\Delta t/2$ (ns)			31.15
s(m)			9.34
ค่าความผิดพลาด(%)			6.61

สรุปผลการทดลอง

การทดลองนี้จะคล้ายกับการทดลองครั้งที่แล้วแต่จะแตกต่างกันตรงที่การวัดค่าสูงสุดของกราฟการทดลองนี้จะวัดค่าสูงสุดที่ได้จากการใช้การปรับออสซิลโลสโคปให้หาค่าเฉลี่ยสูงสุดเนื่องจากค่าสูงสุดที่ได้เมื่อทำการขยายจะมีค่าที่เป็น ripple มากโดยภายใน 1 พิก เมื่อทำการขยายดูแล้วจะมี ripple ถึง 3-6 ลูกคลื่นในนั้น เป็นสาเหตุให้อ่านค่าที่ผิดได้ จึงทำการตัดปัญหาโดยการที่ไม่ทำการขยายดูพิก แต่ใช้การกะด้วยสายตาเองผลการทดลองที่ได้ถือว่าเป็นที่น่าพอใจเนื่องจากมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 ทำการวัดระยะต่าง ๆ ภายนอกอาคาร

วัตถุประสงค์ สามารถทำการวัดระยะทางภายนอกอาคารได้

วิธีการทดลอง

นำเครื่องวัดระยะทางด้วยแสงเลเซอร์ที่ได้ทำการจัดอุปกรณ์เหมือนกับการทดลองที่วัดระยะได้จริง มาทำการวัดระยะทางภายนอกอาคาร

ผลการทดลอง

สัญญาณที่ได้จากตัวรับสัญญาณ เมื่อแสดงออกมาทางออสซิลโลสโคป จะไม่กลายเป็นสัญญาณที่มีลักษณะเป็นพัลส์เหมือนดิน แต่จะเกิดการยกระดับขึ้นมาจากระดับพื้นเป็นสัญญาณที่เท่ากันโดยตลอด

สรุปผลการทดลอง

เมื่อนำเครื่องวัดระยะทางออกวัดภายนอกอาคารแล้วสามารถวัดได้เพียง 2-4 เมตรเท่านั้น เนื่องจากแสงจากดวงอาทิตย์มีความเข้มมากกว่าแสงจากเลเซอร์ทำให้ตัวรับสัญญาณจับสัญญาณที่ได้จากแสงดวงอาทิตย์เข้ามาพร้อมกันด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้เป็นการสรุปผลการทดลองในการวัดระยะทางโดยใช้แสงเลเซอร์ และรูปแบบของการจัดระบบวัดระยะทาง ซึ่งมีการศึกษาถึงระบบจ่ายกำลังให้แก่หลอดไฟแฟลชที่ใช้ในการกระตุ้นให้เกิดแสงเลเซอร์, ระบบวัดระยะทาง และระบบประมวลผลสัญญาณ โดยจะกล่าวถึงผลการทดลองของระบบรวม รวมทั้งปัญหาที่เกิดขึ้นขณะทำการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

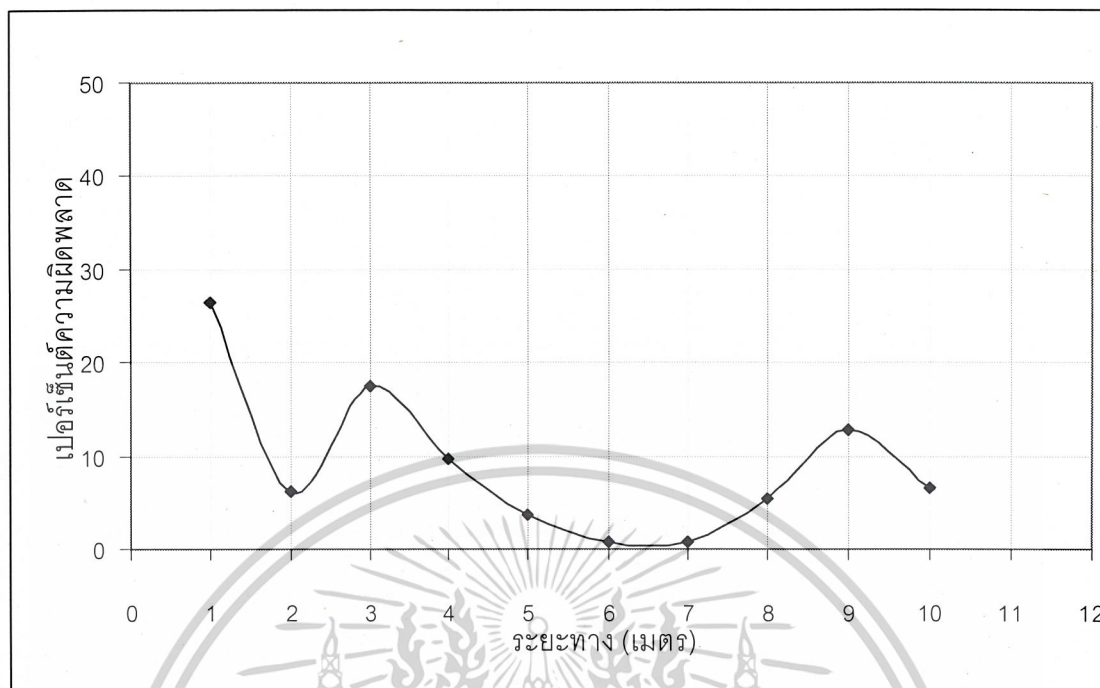
ด้านคุณสมบัติของเลเซอร์ที่นำมาใช้ทำเลเซอร์วัดระยะทางนี้ เราได้เลือกใช้ Nd:YAG LASER เพราะเป็นเลเซอร์ที่มีพลังงานสูง และมีขนาดเล็กกว่าเลเซอร์ประเภทอื่นเมื่อเทียบกับกำลังที่เท่ากัน โดยเลเซอร์ที่ใช้มีกำลัง 200.1316 วัตต์ มีประสิทธิภาพ 0.279734804

คุณสมบัติของเลเซอร์อีกข้อหนึ่งที่สำคัญในการใช้เป็นเลเซอร์วัดระยะทางคือประสิทธิภาพในการสะท้อนที่พื้นผิวต่างๆ กัน จากการทดลองเราสามารถเรียงลำดับวัตถุที่มีประสิทธิภาพในการสะท้อนจากมากไปน้อยได้ดังนี้ เทริยลูไลนะ กระดาษแข็งสีขาว ใบบ่มสด กระฉก และ ผ้า

การวัดค่าความผิดพลาดของตัวรับสัญญาณทั้ง 2 ตัว เนื่องจากตัวรับสัญญาณทั้ง 2 ตัวที่ใช้ไม่ได้มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ เมื่อนำมาใช้วัดสัญญาณเปรียบเทียบกันจึงมีโอกาสที่จะเกิดค่าผิดพลาดขึ้นมาได้ ซึ่งในที่นี้เราได้ทำการวัดค่าความผิดพลาดเมื่อตัวรับสัญญาณทั้งสองตัวรับสัญญาณพร้อมกัน เราพบว่ามีความผิดพลาดเกิดขึ้น โดยที่ตัวรับสัญญาณสิ้นสุดรับสัญญาณได้ช้ากว่าตัวรับสัญญาณเริ่มต้นอยู่ 53 นาโนวินาที ซึ่งค่าความผิดพลาดนี้อาจเกิดขึ้นได้จากตัวรับสัญญาณเองหรือเกิดขึ้นจากสายส่งมีความยาวไม่เท่ากัน

การวัดระยะทางจริงผลที่ดีที่สุดโดยที่มีค่าผิดพลาดน้อยที่สุด จะทำการวัดที่จุดสูงสุดของสัญญาณโดยใช้เครื่องออสซิลโลสโคปอ่านค่าเฉลี่ยสูงสุดของสัญญาณเพราะที่ค่าสูงสุดนั้นเมื่อทำการขยายสัญญาณดูแล้วจะเห็นว่ามีค่า ripple อยู่มากเครื่องจะทำการอ่านค่า ripple ที่สูงสุดแทนที่จะเป็นจุดสูงสุดของสัญญาณแทน

ค่าเปอร์เซ็นต์การผิดพลาดที่ได้อาจสามารถนำมาแสดงเป็นกราฟโดยจะเห็นว่าที่ระยะทางน้อยๆ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจะมากและที่ระยะทางเพิ่มขึ้นค่าความผิดพลาดจะน้อยลง



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ระยะทางต่างๆ

5.2 ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาและทดลองสร้างระบบวัดระยะทางด้วยเลเซอร์ขึ้นมา มีปัญหาเกิดขึ้นบางประการที่ได้รับการแก้ไขแล้ว ดังนี้

1. ระบบจ่ายกำลังให้แก่หลอดไฟแฟลชที่ใช้ในตอนแรกเกิดปัญหาที่ทริกเกอร์ซึ่งเป็นตัวขยายกำลังให้หลอดแฟลชทำงานเสีย ไม่สามารถทริกหลอดแฟลชให้ติดได้ จึงทำการแก้ไขวงจรโดยเปลี่ยนไปใช้ Silicon Controlled rectifier แทน

2. การจัดระบบวัดระยะทาง ในตอนเริ่มต้นได้ทำการจัดระบบวัดระยะทางในแบบที่ 1 เมื่อนำมาใช้วัดระยะทางแล้ว มีความผิดพลาดเกิดขึ้น เมื่อยิงแสงเลเซอร์ออกไปแสงส่วนใหญ่จะทะลุ Beam splitter ออกไปสะท้อนกับเป้าหมาย และอีกส่วนหนึ่งจะสะท้อน Beam splitter ไปยังตัวรับสัญญาณเริ่มต้น แต่เกิดการสะท้อนที่ผิวของ Beam splitter อีกครั้ง ไปยังตัวรับสัญญาณสิ้นสุด ทำให้ตัวรับสัญญาณสิ้นสุดรับสัญญาณที่เกิดจากการสะท้อนที่ผิวของ Beam splitter แทนที่จะรับสัญญาณที่สะท้อนกลับมาจากเป้าหมาย ทำให้เวลาที่ได้ผิดพลาดไป ทำให้ไม่สามารถวัดระยะทางได้ เราจึงได้ทำการเปลี่ยน Beam splitter ที่ใช้ใหม่เป็นแบบกระจกสะท้อนที่วางทำมุม 45 องศาแทน ซึ่งกระจกนี้จะสะท้อนแสงส่วนใหญ่ออกไป และปล่อยให้แสงบางส่วนทะลุผ่าน และทำการวัดระยะทางอีกครั้ง พบว่าสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับสัญญาณสิ้นสุดมีค่าน้อยมาก เนื่องจากเมื่อแสงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สะท้อนกลับมายังเป้าหมาย เดินทางผ่าน Beam splitter ที่เป็นกระจกสะท้อน เกิดการสะท้อนกลับ เข้าไปยังตัวเลเซอร์มากกว่าที่จะทะลุผ่านมายังตัวรับสัญญาณสิ้นสุด ทำให้สัญญาณที่รับได้มีค่าน้อย เราจึงได้ทำการเปลี่ยนระบบวัดระยะทางใหม่เป็นแบบที่ 2 โดยเปลี่ยนจุดที่วางตัวรับสัญญาณสิ้นสุด ใหม่ให้ไม่ต้องผ่านกระจกสะท้อน แต่รูปแบบใหม่นี้จะมีค่าผิดพลาดจากระยะทางเกิดขึ้น เนื่องจาก เกิดมุมสะท้อนขึ้น ทำให้ระยะทางกลับยาวกว่าระยะทางไป แต่ค่าผิดพลาดนี้มีผลน้อยเมื่อเทียบกับ ระยะทางที่วัดเมื่อระยะทางที่วัดมีค่ามากขึ้น ค่ามุมนี้ก็จะมีส่วนน้อยลง

3. การวัดระยะเวลาที่แสงเดินทางไป-กลับ จะทำการวัดจากออสซิลโลสโคป โดยดูจากความแตกต่างของเวลาของสัญญาณทั้งสองซึ่งโดยปกติจะดูจากจุดสูงสุดของสัญญาณ แต่สัญญาณที่ได้ จากตัวรับสัญญาณนั้นจะมี ripple อยู่มาก จึงต้องใช้ค่าเฉลี่ยโดยดูจากสัญญาณทั้งสอง มาเป็น ค่าตัวแทนของจุดสูงสุดแทน

แต่ยังมีปัญหาที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุง คือ เมื่อนำมาวัดระยะทางนอกห้องทดลองที่มี แสงอาทิตย์ จะไม่สามารถรับสัญญาณที่เป็นสัญญาณสิ้นสุดได้ จึงแนะนำว่าควรจัดอุปกรณ์ให้ตัวรับ สัญญาณ stop อยู่ในที่ๆ แสงอาทิตย์ไม่สามารถส่องผ่านเข้าไปได้



บรรณานุกรม

Weber, Marvin J., 2001. Handbook of lasers. Boca Raton, Fla. : CRC Press.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

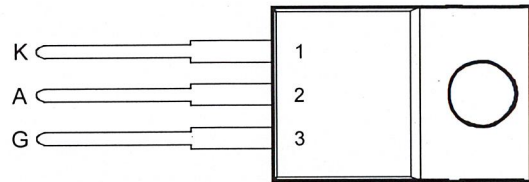
TIC106 SERIES SILICON CONTROLLED RECTIFIERS

Copyright © 1999, Power Innovations Limited, UK

APRIL 1971 - REVISED JULY 2000

- 5 A Continuous On-State Current
- 30 A Surge-Current
- Glass Passivated Wafer
- 400 V to 800 V Off-State Voltage
- Max I_{GT} of 200 μ A

TO-220 PACKAGE
(TOP VIEW)



Pin 2 is in electrical contact with the mounting base.

MDC1ACA

absolute maximum ratings over operating case temperature (unless otherwise noted)

RATING		SYMBOL	VALUE	UNIT
Repetitive peak off-state voltage (see Note 1)	TIC106D	V_{DRM}	400	V
	TIC106M		600	
	TIC106S		700	
	TIC106N		800	
Repetitive peak reverse voltage	TIC106D	V_{RRM}	400	V
	TIC106M		600	
	TIC106S		700	
	TIC106N		800	
Continuous on-state current at (or below) 80°C case temperature (see Note 2)		$I_{T(RMS)}$	5	A
Average on-state current (180° conduction angle) at (or below) 80°C case temperature (see Note 3)		$I_{T(AV)}$	3.2	A
Surge on-state current at (or below) 25°C (see Note 4)		I_{TSM}	30	A
Peak positive gate current (pulse width \leq 300 μ s)		I_{GM}	0.2	A
Peak gate power dissipation (pulse width \leq 300 μ s)		P_{GM}	1.3	W
Average gate power dissipation (see Note 5)		$P_{G(AV)}$	0.3	W
Operating case temperature range		T_C	-40 to +110	°C
Storage temperature range		T_{stg}	-40 to +125	°C
Lead temperature 1.6 mm from case for 10 seconds		T_L	230	°C

- NOTES: 1. These values apply when the gate-cathode resistance $R_{GK} = 1 \text{ k}\Omega$.
2. These values apply for continuous dc operation with resistive load. Above 80°C derate linearly to zero at 110°C.
3. This value may be applied continuously under single phase 50 Hz half-sine-wave operation with resistive load. Above 80°C derate linearly to zero at 110°C.
4. This value applies for one 50 Hz half-sine-wave when the device is operating at (or below) the rated value of peak reverse voltage and on-state current. Surge may be repeated after the device has returned to original thermal equilibrium.
5. This value applies for a maximum averaging time of 20 ms.

PRODUCT INFORMATION

Information is current as of publication date. Products conform to specifications in accordance with the terms of Power Innovations standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Power
INNOVATIONS

TIC106 SERIES SILICON CONTROLLED RECTIFIERS

APRIL 1971 - REVISED JULY 2000

electrical characteristics at 25°C case temperature (unless otherwise noted)

PARAMETER		TEST CONDITIONS			MIN	TYP	MAX	UNIT
I_{DRM}	Repetitive peak off-state current	$V_D = \text{rated } V_{DRM}$	$R_{GK} = 1 \text{ k}\Omega$	$T_C = 110^\circ\text{C}$			400	μA
I_{RRM}	Repetitive peak reverse current	$V_R = \text{rated } V_{RRM}$	$I_G = 0$	$T_C = 110^\circ\text{C}$			1	mA
I_{GT}	Gate trigger current	$V_{AA} = 12 \text{ V}$	$R_L = 100 \Omega$	$t_{p(g)} \geq 20 \mu\text{s}$		5	200	μA
V_{GT}	Gate trigger voltage	$V_{AA} = 12 \text{ V}$	$R_L = 100 \Omega$	$T_C = -40^\circ\text{C}$			1.2	V
		$t_{p(g)} \geq 20 \mu\text{s}$	$R_{GK} = 1 \text{ k}\Omega$		0.4	0.6	1	
		$V_{AA} = 12 \text{ V}$	$R_L = 100 \Omega$	$T_C = 110^\circ\text{C}$	0.2			
I_H	Holding current	$V_{AA} = 12 \text{ V}$	$R_{GK} = 1 \text{ k}\Omega$	$T_C = -40^\circ\text{C}$			8	mA
		Initiating $I_T = 10 \text{ mA}$					5	
		$V_{AA} = 12 \text{ V}$	$R_{GK} = 1 \text{ k}\Omega$	Initiating $I_T = 10 \text{ mA}$				
V_T	Peak on-state voltage	$I_T = 5 \text{ A}$	(See Note 6)				1.7	V
dv/dt	Critical rate of rise of off-state voltage	$V_D = \text{rated } V_D$	$R_{GK} = 1 \text{ k}\Omega$	$T_C = 110^\circ\text{C}$		10		V/ μs

NOTE 6: This parameter must be measured using pulse techniques, $t_p = 300 \mu\text{s}$, duty cycle $\leq 2\%$. Voltage sensing-contacts, separate from the current carrying contacts, are located within 3.2 mm from the device body.

thermal characteristics

PARAMETER		MIN	TYP	MAX	UNIT
$R_{\theta JC}$	Junction to case thermal resistance			3.5	$^\circ\text{C/W}$
$R_{\theta JA}$	Junction to free air thermal resistance			62.5	$^\circ\text{C/W}$

PRODUCT INFORMATION

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

2 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THERMAL INFORMATION

AVERAGE ANODE ON-STATE CURRENT
DERATING CURVE

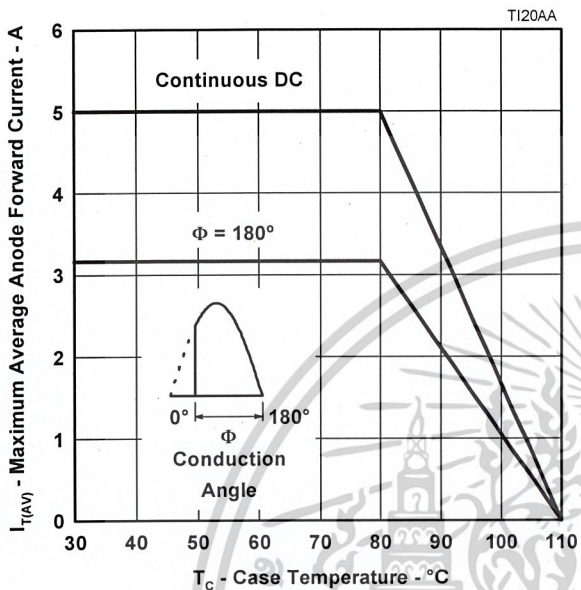


Figure 1.

ANODE POWER DISSIPATED
VS
ON-STATE CURRENT

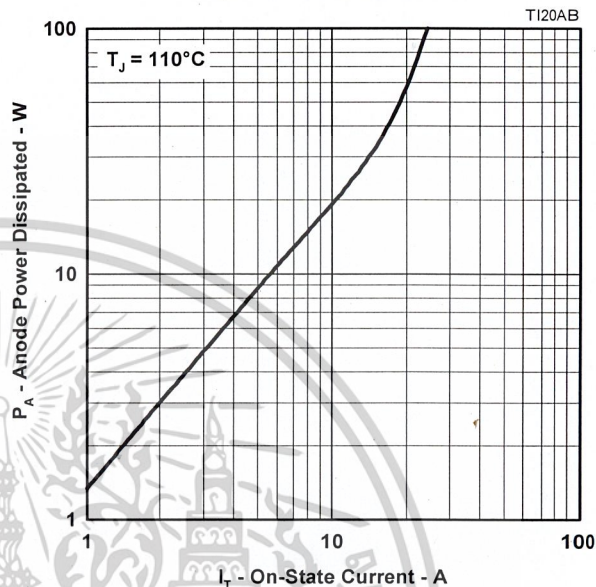


Figure 2.

SURGE ON-STATE CURRENT
VS
CYCLES OF CURRENT DURATION

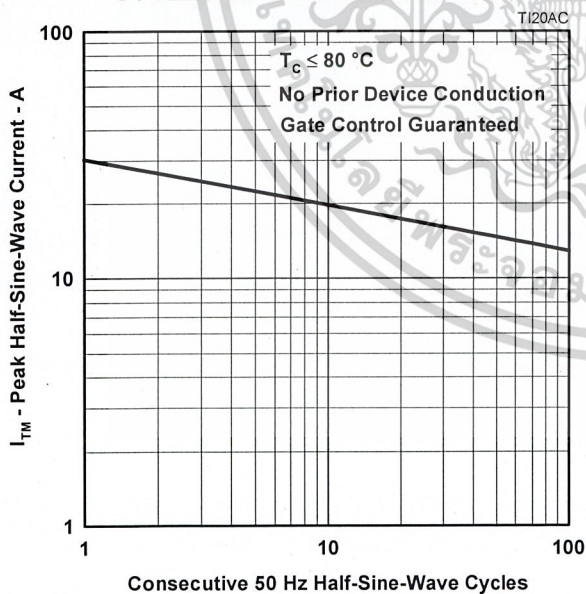


Figure 3.

TRANSIENT THERMAL RESISTANCE
VS
CYCLES OF CURRENT DURATION

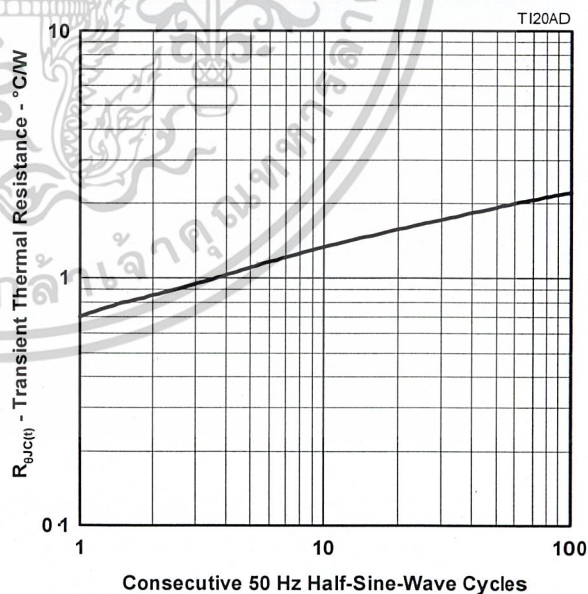


Figure 4.

PRODUCT INFORMATION



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TIC106 SERIES SILICON CONTROLLED RECTIFIERS

APRIL 1971 - REVISED JULY 2000

TYPICAL CHARACTERISTICS

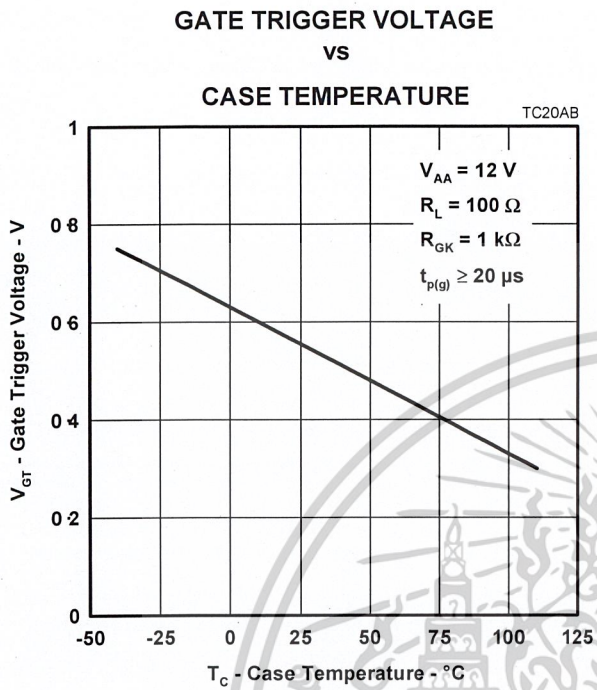


Figure 5.

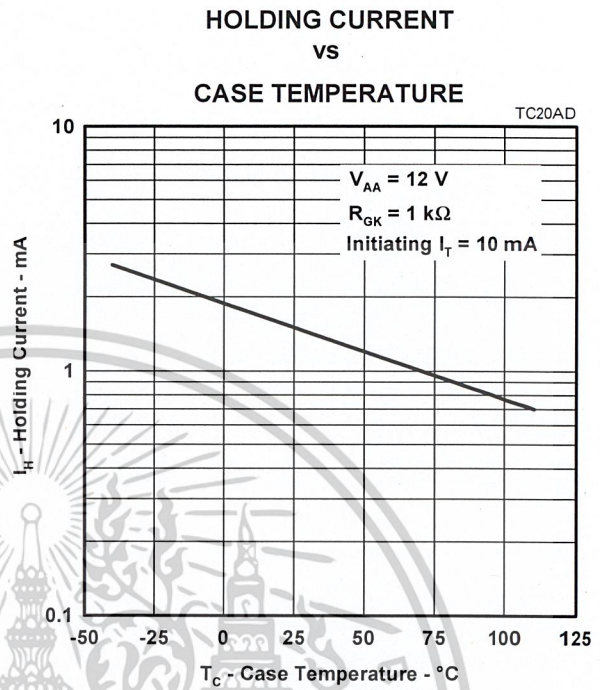


Figure 6.

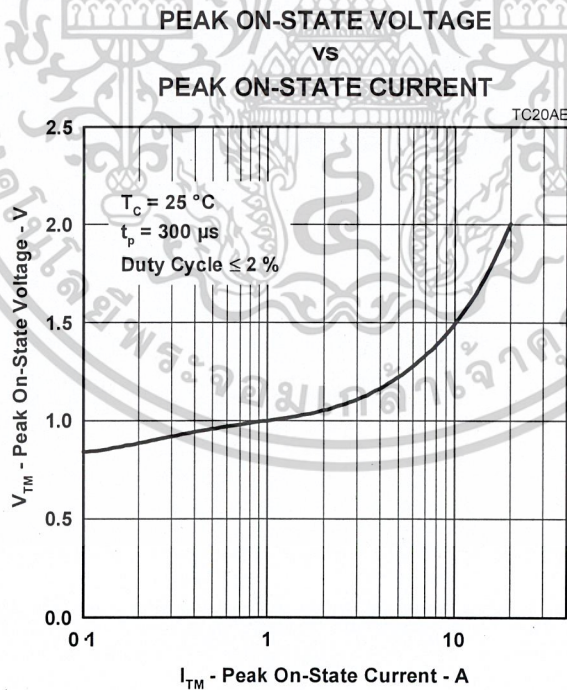


Figure 7.

PRODUCT INFORMATION

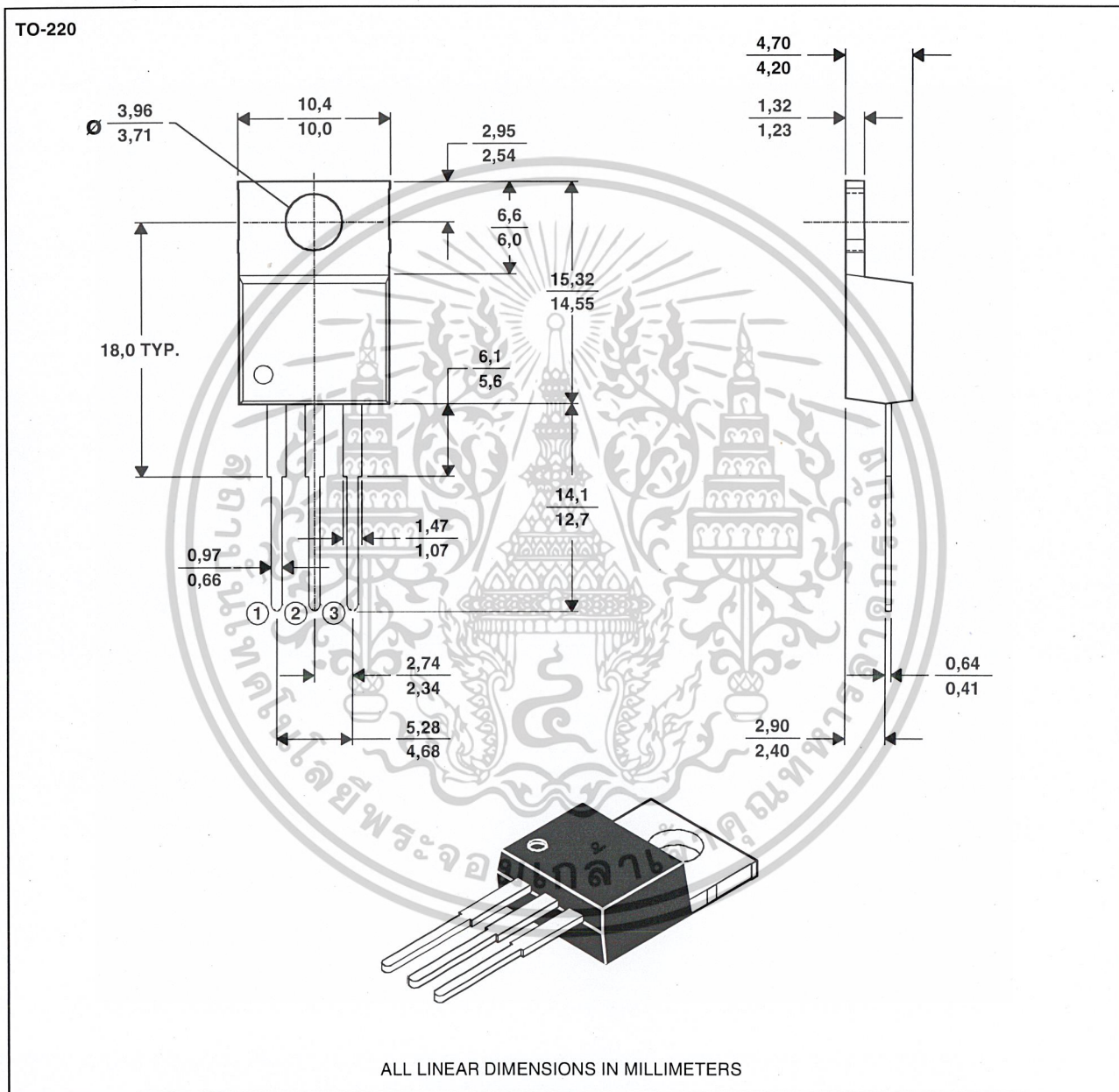
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
4 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MECHANICAL DATA

TO-220

3-pin plastic flange-mount package

This single-in-line package consists of a circuit mounted on a lead frame and encapsulated within a plastic compound. The compound will withstand soldering temperature with no deformation, and circuit performance characteristics will remain stable when operated in high humidity conditions. Leads require no additional cleaning or processing when used in soldered assembly.



NOTE A: The centre pin is in electrical contact with the mounting tab.

PRODUCT INFORMATION



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TIC106 SERIES SILICON CONTROLLED RECTIFIERS

APRIL 1971 - REVISED JULY 2000

IMPORTANT NOTICE

Power Innovations Limited (PI) reserves the right to make changes to its products or to discontinue any semiconductor product or service without notice, and advises its customers to verify, before placing orders, that the information being relied on is current.

PI warrants performance of its semiconductor products to the specifications applicable at the time of sale in accordance with PI's standard warranty. Testing and other quality control techniques are utilized to the extent PI deems necessary to support this warranty. Specific testing of all parameters of each device is not necessarily performed, except as mandated by government requirements.

PI accepts no liability for applications assistance, customer product design, software performance, or infringement of patents or services described herein. Nor is any license, either express or implied, granted under any patent right, copyright, design right, or other intellectual property right of PI covering or relating to any combination, machine, or process in which such semiconductor products or services might be or are used.

PI SEMICONDUCTOR PRODUCTS ARE NOT DESIGNED, INTENDED, AUTHORIZED, OR WARRANTED TO BE SUITABLE FOR USE IN LIFE-SUPPORT APPLICATIONS, DEVICES OR SYSTEMS.

Copyright © 2000, Power Innovations Limited

PRODUCT INFORMATION

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

6

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DET110 - HIGH-SPEED SILICON DETECTOR

DESCRIPTION:

Thorlabs' DET110 is a ready-to-use high-speed photo detector. The unit comes complete with a photodiode and internal 12V bias battery enclosed in a ruggedized aluminum housing. The head includes a removable 1" optical coupler (SM1T1), providing easy mounting of ND filters; spectral filters and other Thorlabs 1" stackable lens mount accessories. Also available are fiber adapters (SMA, FC and ST style). An #8-32 tapped hole is provided on the base of the housing to mount the detector directly to a Thorlabs' positioning device (1/2" post holder, mounting plates, etc.).

SPECIFICATIONS:

Detector:	Silicon PIN	Housing:	Black Anodized Aluminum
Spectral Response:	350-1100nm	Size:	φ1.43" x 1.67"
Peak Wavelength:	960nm+/-50nm	Output:	BNC, DC-Coupled
Rise/Fall Time¹:	20ns	Bias:	12V Battery (Type A23)
Diode Capacitance:	20pF	Mounting:	8-32 (M4) Tapped Hole
NEP:	1.2 x 10 ⁻¹⁴ W/√HZ	Diode	TO-5, Anode Marked
Dark Current:	10nA	Socket:	
Active Area:	13mm ² 3.6mm x 3.6mm square	Damage	100mW CW
Linearity Limit:	1mW	Threshold:	0.5 J/cm ² (10ns pulse)

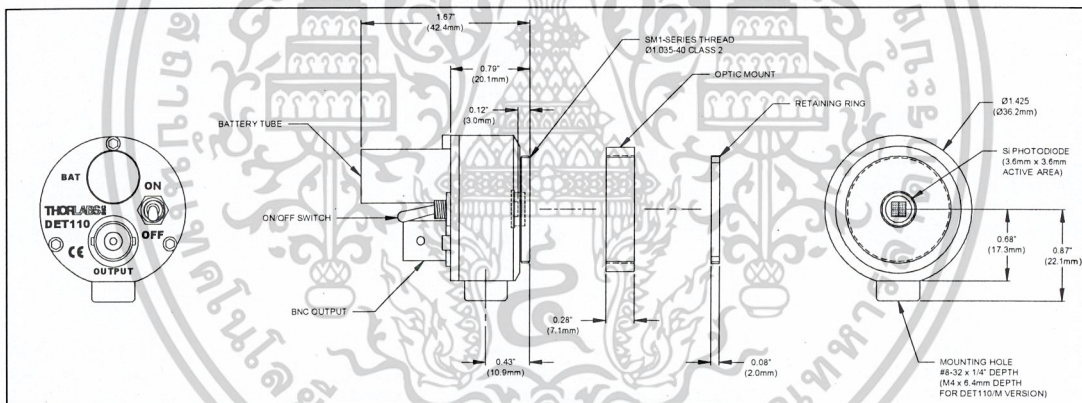


Figure 1. - Mechanical Dimensions

OPERATION:

Thorlabs DET series are ideal for measuring both pulsed and CW light sources. The DET110 includes a reversed-biased PIN photo diode, bias battery, and ON/OFF switch packaged in a ruggedized housing. The BNC output signal is the direct photocurrent out of the photo diode anode and is a function of the incident light power and wavelength. The Spectral Responsivity, $\mathfrak{R}(\lambda)$, can be obtained from Figure 2 to estimate the amount of photocurrent to expect. Most users will wish to convert this photocurrent to a voltage for viewing on an oscilloscope or DVM. This is accomplished by adding an external load resistance, R_{LOAD} . The output voltage is derived as:

$$V_o = P * \mathfrak{R}(\lambda) * R_{LOAD}$$

The bandwidth, f_{BW} , and the rise-time response, t_R , are determined from the diode capacitance, C_J , and the load resistance, R_{LOAD} as shown below:

$$f_{BW} = 1 / (2 * \pi * R_{LOAD} * C_J)$$

$$t_R = 0.35 / f_{BW}$$

2199-S01 Rev C 4/28/04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

For maximum bandwidth, we recommend using a 50Ω coax cable with a 50Ω terminating resistor at the end of the coax. This will also minimize ringing by matching the coax with its characteristic impedance. If bandwidth is not important, you may increase the amount of voltage for a given input light by increasing the R_{LOAD} up to a maximum of 10KΩ.

Note: The detector has an AC path to ground even with the switch in the OFF position. It is normal to see an output response to an AC signal with the switch in this state. However, because the detector is unbiased, operation in this mode is not recommended.

Figure 2 - Typical DET110 Spectral Responsivity Curve

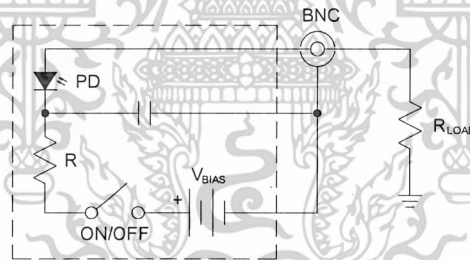
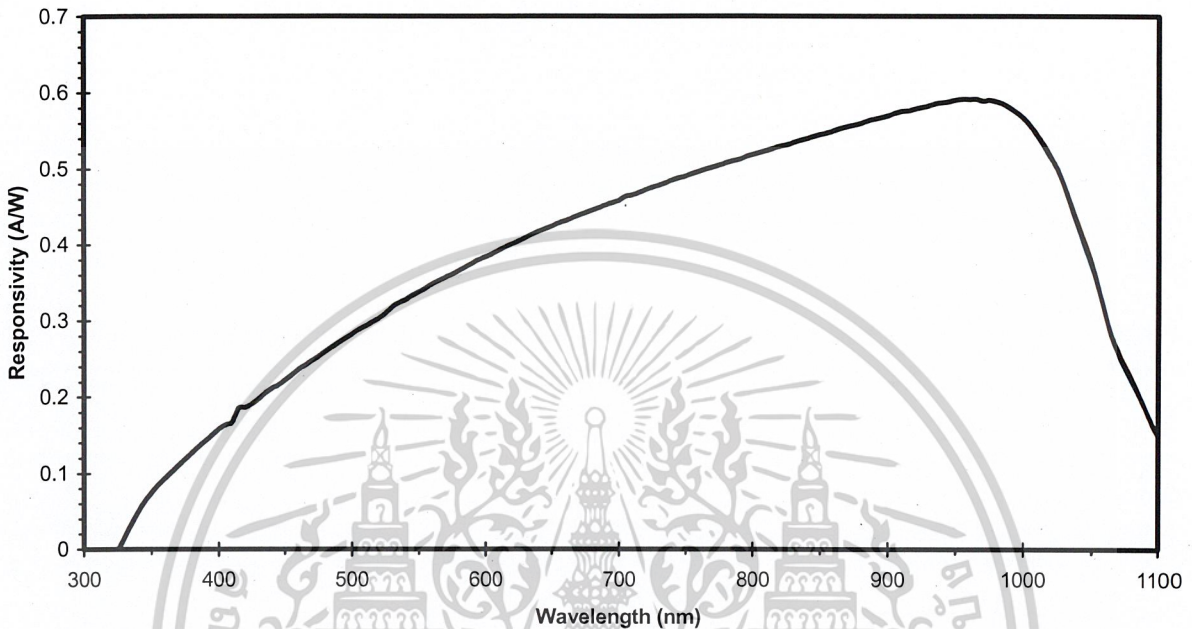


Figure 3 - Circuit Block Diagram

FIBER ADAPTERS AND OTHER ACCESSORIES

Thorlabs sells a number of accessories that are compatible with the 1" thread on the DET housing including FC, SMA, and ST fiber adapters, stackable lens tubes for mounting optics, and cage assemblies that allow the DET to be incorporated into elaborate 3-D optical assemblies.

Caution: The DET110 was designed to allow maximum accessibility to the photo detector by having the front surface of the diode extend outside of the DET housing. When using fiber adapters, make sure that the fiber ferrule does not crash into the detector. Failure to do so may cause damage to the diode and / or the fiber. An easy way to accomplish this is to install a SM1RR retaining ring (included with the DET110) inside the 1" threaded coupler *before* installing the fiber adapter.

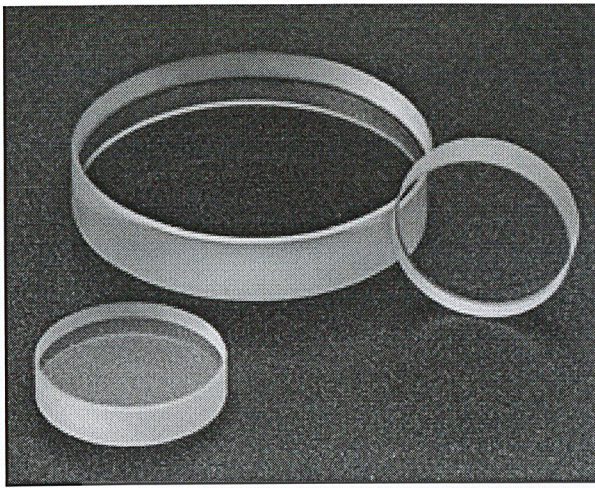
Also available are 1ns Si detectors, InGaAs detectors, and a complete line of amplified detectors.

MAINTAINING THE DET110

There are no serviceable parts in the DET110 optical head or power supply. The housing may be cleaned by wiping with a soft, damp cloth. The window of the detector should only be cleaned using optical grade wipes. If you suspect a problem with your DET110 please call Thorlabs and technical support will be happy to assist you.

2199-S01 Rev C 4/28/04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

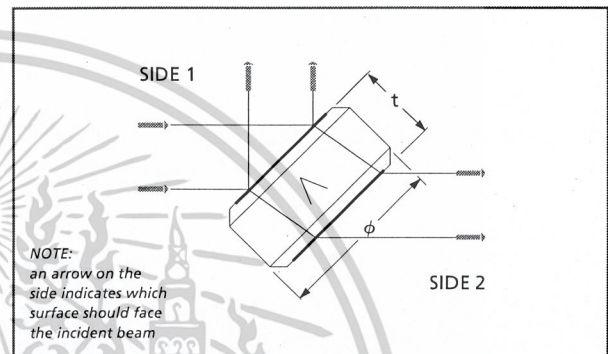


Available in:
 ✓ Production Quantities
 ✓ Custom Sizes

Plate Beamsplitters

Melles Griot plate beamsplitters are used to separate a laser beam into two separate beams or to combine beams at right angles to each other. The front surface of the beamsplitter reflects a portion of the incoming beam.

- Each face is polished to flatness of $\lambda/10$ or better.
- Beamsplitters are ideal for beam separation or combination
- Ultrahard, high-damage-threshold coatings are available for all wavelengths from 193 nm to 1064 nm.
- Internally reflected ghost images are minimized by an antireflection coating on the rear surface.
- Transmission curves are supplied with every component.



16 BSQ / BSB beamsplitters

SPECIFICATIONS: BEAMSPLITTERS

- Angle of Incidence: $45^\circ \pm 3^\circ$
- Diameter: $\phi +0.00, -0.15$ mm
- Thickness: $t \pm 0.15$ mm
- Chamfer: Nominally 0.5 mm \times 45° protective edge bevel
- Parallelism: 10 arc seconds
- Wavefront Distortion: $\lambda/10$ at 632.8 nm over clear aperture
- Surface Quality: Ultrafine laser polish, 10-5 scratch and dig
- Clear Aperture: 90% of diameter
- Coating:
 - Side 1: Ultrahard or durable reflector
 - Side 2: Ultrahard or durable antireflector

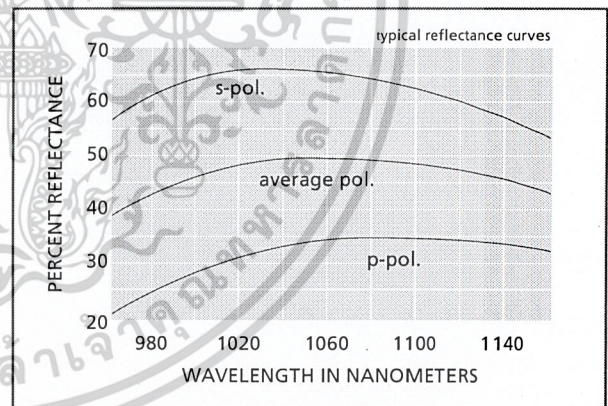


Plate beamsplitter optimized for 1064 nm

CORRECT COMPONENT ORIENTATION

Each component is marked with an arrow indicating Side 1. To prevent permanent damage, Side 1 must face the incident energy. The damage threshold for beamsplitters is primarily dependent upon the coating performance of Side 2.

Plate Beamsplitters

Wavelength (nm)	Laser Type	Reflectance		Damage Threshold	Coating Type	Diameter ϕ (mm)	Thickness t (mm)	PRODUCT NUMBER
		R_{avg}	Material					
193	ArF	50 \pm 3%	CaF ₂	2 J/cm ² in 10 nsec	Durable	50	10	16 BSC 015
			UVFS			50	10	16 BSQ 015
						75	12.5	16 BSQ 017
248	KrF	50 \pm 3%	UVFS	2 J/cm ² in 10 nsec	Ultrahard	50	10	16 BSQ 025
						75	12.5	16 BSQ 027
261–266	4th harmonic Nd:YAG	50 \pm 3%	UVFS	2 J/cm ² in 10 nsec	Ultrahard	25	6	16 BSQ 115
						50	10	16 BSQ 117
308	XeCl	50 \pm 3%	UVFS	1.5 J/cm ² in 10 nsec	Ultrahard	50	10	16 BSQ 035
						75	12.5	16 BSQ 037
351–355	3rd harmonic Nd:YAG	50 \pm 3%	UVFS	2 J/cm ² in 10 nsec	Ultrahard	25	6	16 BSQ 133
488–514	Ar	50 \pm 5%	BK7	1 kW/cm ² CW	Ultrahard	25	6	16 BSB 363
523–532	2nd harmonic Nd:YAG	33 \pm 3%	BK7	6 J/cm ² in 10 nsec	Ultrahard	25	6	16 BSB 153
523–532	2nd harmonic Nd:YAG	50 \pm 3%	BK7	6 J/cm ² in 10 nsec	Ultrahard	25	6	16 BSB 154
694	Ruby	50 \pm 3%	BK7	20 J/cm ² in 30 nsec	Ultrahard	25	6	16 BSB 493
						50	10	16 BSB 495
1047–1064	Nd:YAG	33 \pm 3%	BK7	12 J/cm ² in 10 nsec*	Ultrahard	25	6	16 BSB 183
	Nd:YLF	50 \pm 3%	BK7	17 J/cm ² in 10 nsec*	Ultrahard	25	6	16 BSB 184
	Nd:Glass							

R_s and R_p are nominal values. R_s = Reflectance for S polarization only. R_p = Reflectance for P polarization only. *Value based on measured test data.

$$R_{avg} = \frac{R_s + R_p}{2}$$

POLARIZATION

Because s-polarized light is reflected more effectively than p-polarized light, reflectivity values given in this section are given for average polarization values, i.e., (S+P)/2.

Visit Us Online! www.mellesgriot.com

MELLES GRLOT 14.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้