สำนักหอสมุด

สัญญาเลขที่ R2558C019

อภินันทนาการ

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ เลเซอร์กระจายลำแสงแบบเส้นสำหรับปฏิบัติการ การสะท้อนและหักเหของแสง

ผู้วิจัย

นางสาวพราวิณี บุญเรศ

ผศ.ดร.คเชนทร์ แดงอุดม

สังกัด

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนเรศวร
วันลงทะเบียน 25 มี.ค. 2559
เลขทะเบียน 1690840
เลขเรียกหนังสือ ว QC
.L36
W4245
ว658

สนับสนุนโดยกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยนเรศวร

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบคุณ ทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณรายได้ มหาวิทยาลัยนเรศวร ปีงบประมาณ 2558 สาขาวิทยาศาสตร์กายภาพและคณิตศาสตร์ ที่ช่วยสนับสนุนในด้านงบประมาณเป็นจำนวนเงิน 180,000 บาท

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ช่วยอนุเคราะห์เรื่องเครื่องมือและสถานที่ทำงานวิจัย

ผศ.ดร.คเชนทร์ แดงอุดม

Title Laser spreads beam as line for laboratory : reflection and refraction of light.

Author Parvinee Boonyaras and Kachain Dangudom

Abstract

This research aims to develop a light source for the experiment of the reflection and refraction of light. The light source is laser diode wavelength 650 nm and powell lens was used to spread a beam as line. The line laser light source has high intensity and variation less than 20% in 30 cm range. The line laser beam was visible in an area of brightness up to 700 lux for warm white light and 2000 lux for cool white light. The line laser beam is suitable for use as a light source instead of traditional incandescent light source which has limited visibility in low light less than 60 lux.

Keywords : line laser / reflection / refraction / light source

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
4	**ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล**	22
	4.1 ค่าความเข้มแสงและความชัดเจนของลำแสง	22
	4.2 การใช้งานเลเซอร์กระจายลำแสงแบบเส้นในปฏิบัติการการสะท้อนและหักเหของแสง	25
5	สรุปผล	29
	บรรณานุกรม	30

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
2-1	แสดงช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น	6
4-1	ความชัดเจนของลำแสงสำหรับการใช้งานภายใต้แสงสว่างภายนอก	23

มหาวิทยาลัยนเรศวร

บทที่ 1

บทนำ

ในการเรียนรู้ฟิสิกส์พื้นฐานเพื่อให้เกิดความเข้าใจและเห็นภาพ จึงได้มีการเรียนรู้จากการทำ ปฏิบัติการควบคู่อยู่ด้วย ซึ่งในปฏิบัติการเกี่ยวกับการสะท้อนและหักเหของแสงนั้น ก็เป็นส่วนสนับสนุนความเข้าใจในการเรียนรู้ในทฤษฎี ที่สามารถจัดตั้งได้ทั้งในระดับมัธยมศึกษา และในระดับอุดมศึกษา โดยอาศัย แผ่นสะท้อน ตัวกลางหักเห เครื่องวัดมุม และแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในปฏิบัติการนี้ในปัจจุบันคือ กล่องแสงที่ใช้หลอดไฟแบบไส้เป็นแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งทำให้เกิดการกระจายของแสงในทุกทิศทาง ซึ่งต้องมีการเปิดช่องปรับแสงให้ออกมาเป็นเส้นในทิศทางเดียวกัน ซึ่งต้องอาศัยทักษะในการปรับ และแสงที่ได้ออกมามักจะมีความเข้มต่ำและมีลักษณะเป็นเส้นที่บานออก ไม่คมชัด จึงต้องใช้งานในห้องที่มืด อีกทั้งหลอดไฟแบบไส้ที่ให้ความเข้มแสงสูง จะทำให้เกิดความร้อน และใช้พลังงานไฟฟ้าค่อนข้างมาก และอาจก่อให้เกิดอันตรายได้ ทางผู้วิจัยจึงมีความคิดที่จะพัฒนาแหล่งกำเนิดแสง สำหรับปฏิบัติการ การสะท้อน และหักเหของแสง โดยใช้เลเซอร์ไดโอด และเลนส์กระจายแสงให้เป็นแบบเส้น ซึ่งแสงเลเซอร์นั้น มีคุณสมบัติที่ให้ความเข้มสูง มีลักษณะเป็นลำแสงที่ความเข้มแสงไม่ลดลงจากการกระจายตัวโดยรอบทิศทาง และใช้แหล่งพลังงานเป็นไฟกระแสตรงแรงดันต่ำ ซึ่งปลอดภัยกว่าแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดไส้ที่ใช้ไฟกระแสสลับ ซึ่งมักพบปัญหาไฟรั่วอยู่บ่อยครั้ง

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาคุณภาพของแสงเลเซอร์ที่ทำให้กระจายลำแสงแบบเส้น ในด้านความเข้มแสง ลักษณะของเส้นแสง ความคมชัดของเส้นแสง และการทดสอบประสิทธิภาพการใช้เลเซอร์กระจายลำแสงแบบเส้นในการทำปฏิบัติการ เรื่องการสะท้อน และหักเหของแสง ซึ่งจะทดลองใช้ในปฏิบัติการฟิสิกส์พื้นฐาน [1-3] ของมหาวิทยาลัยนเรศวร และเมื่องานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงจะสามารถนำมาปรับปรุงพัฒนาปฏิบัติการพื้นฐานของมหาวิทยาลัยนเรศวรได้ และยังเป็นแนวทางในการปรับปรุงพัฒนาปฏิบัติการเรื่อง การสะท้อนและหักเหของแสง ให้กับสถาบันการศึกษาอื่น ๆ ต่อไป

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อสร้างแหล่งกำเนิดแสงที่มีการกระจายลำแสงแบบเส้นจากเลเซอร์
2. เพื่อศึกษาผลของเลนส์กระจายแสงเพื่อหาสมบัติที่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน
3. เพื่อวัดสมบัติทางแสงของเลเซอร์กระจายลำแสงแบบเส้น
4. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานเลเซอร์ กระจายลำแสงแบบเส้นในปฏิบัติการ การสะท้อนและหักเหของแสง

ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

แหล่งกำเนิดแสงที่ให้แสงสว่างทั้งในธรรมชาติหรือหลอดไฟที่ใช้งานจะมีการกระจายความเข้มแสงในทุกทิศทางและความเข้มแสงจะลดลงอย่างมากเมื่อห่างจากแหล่งกำเนิดแสง แต่สำหรับแสงเลเซอร์ ซึ่งคุณสมบัติของเลเซอร์ มีทิศทางเดียวที่แน่นอน (directionality) ลำแสงเลเซอร์จะขนานกันไปตลอดระยะทางไกล ๆ ไม่มีการบานปลายออก ดังนั้นความเข้มของแสงเลเซอร์จะลดลงน้อยมากในระยะทางไกล ๆ เลเซอร์ เป็นแสงเอกรงค์ (monochromaticity) แสงเลเซอร์มีความยาวคลื่นเพียงค่าเดียว ซึ่งแตกต่างจากแหล่งกำเนิดแสงที่เราพบเห็นในชีวิตประจำวัน เช่น หลอดไฟฟ้า และ ดวงอาทิตย์ จะเป็นแสงสีขาว ถ้าให้แสงสีขาวนี้ผ่านปริซึม จะเห็นแถบสีต่าง ๆ เรียงกันอย่างต่อเนื่องจากสีม่วงถึงสีแดง เรียกว่า แถบสเปกตรัม

แสงเลเซอร์มีลักษณะโดดเด่นไม่เหมือนแหล่งกำเนิดแสงชนิดอื่นในเชิงความเข้มสูง มีความเจิดจ้า (brightness) และเมื่อลำแสงตกกระทบวัตถุ ก็เกิดความระยิบระยับของลำแสงขึ้น(laser speckle) โดยเฉพาะเมื่อวัตถุนั้นมีความหยาบหรือแม้แต่ในบรรยากาศที่มีฝุ่นละอองหรือ ควันซึ่งเป็นอนุภาคแขวนลอยที่กระจายตัวแบบสุ่ม (random) ทั้งนี้เนื่องจากแสงเลเซอร์เกิดการสะท้อนแบบไม่มีทิศทางกับอนุภาค หรือผิวของวัตถุ และเกิดการแทรกสอดของลำแสง ทำให้เกิดความระยิบระยับขึ้น จึงเป็นมิติของการมองเห็น แสงเลเซอร์ มีความเป็นอาพันธ์ (coherence) ซึ่งแตกต่างจากหลอดไฟฟ้าทั่วไปที่เปล่งแสงจากจำนวนมาก โดยแต่ละอะตอมจะทำหน้าที่เป็นต้นกำเนิดแสง ดังนั้นแต่ละอะตอมก็ปล่อยแสงออกมาอย่างอิสระซึ่งกันและกัน แสงที่ถูกปล่อยออกมาจากหลอดไฟจึงมีเฟส และความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน ยิ่งกว่านั้นแต่ละคลื่นที่ถูกปล่อยออกมามีทิศทางไม่แน่นอน หรือเป็น random แสงจากแหล่งต้นกำเนิดแสงธรรมดาโดยทั่วไปจะเรียกว่า แสงอินโคฮีเรนต์ (incoherence light) ต้นกำเนิดของแสงเลเซอร์นอกจากจะให้แสงสีเดียวทุก ๆ คลื่นของแสงเลเซอร์จะมีเฟสเดียวกันหมด ดังนั้นแสงเลเซอร์จึงเรียกว่า แสงโคฮีเรนต์ (coherence light) [4]

จากคุณสมบัติของแสงเลเซอร์ดังที่กล่าวมานั้น จึงเหมาะที่จะนำมาใช้ในปฏิบัติการเรื่องการสะท้อน และหักเหของแสง และทำให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าการใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอดไส้

การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ ที่เกี่ยวข้อง

ปฏิบัติการการสะท้อนแสง และหักเหของแสง เป็นปฏิบัติการพื้นฐานสำคัญในการช่วยสนับสนุนการเรียนรู้ฟิสิกส์ ทั้งในระดับมัธยมศึกษา ซึ่งเห็นได้จาก หลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน [5, 6] และในระดับอุดมศึกษา ยกตัวอย่าง เช่น ในรายวิชาฟิสิกส์พื้นฐานของมหาวิทยาลัยนเรศวรได้มีปฏิบัติการเรื่อง การสะท้อนและหักเหของแสงอยู่ในสามรายวิชาคือ

1. 261101 ปฏิบัติการฟิสิกส์ 1

2. 261103 ปฏิบัติการฟิสิกส์เบื้องต้น

3. 261108 หลักฟิสิกส์ 1

ซึ่งปฏิบัติการเรื่องสะท้อนและหักเหของแสงที่มักพบปัญหาเกี่ยวกับแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้มองเห็นได้ไม่ชัดเจน ไม่สามารถทดลองในสถานที่ที่มีแสงรบกวนมากได้ จัดตั้งแหล่งกำเนิดแสงได้ยาก รวมไปถึงเรื่องพลังงาน และความปลอดภัยในการใช้งาน ทางผู้วิจัยจึงได้ศึกษาการนำแสงเลเซอร์ มาใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสง เพื่อพัฒนาปฏิบัติการ การสะท้อน และหักเหของแสงให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ต้องทำการศึกษาสมบัติของเลเซอร์ที่นำมาใช้งาน และศึกษาถึงประสิทธิภาพ ในการนำชุดเลเซอร์ที่นำมาใช้งาน และศึกษาถึงประสิทธิภาพ ในการนำชุดเลเซอร์กระจายลำแสงแบบเส้น มาใช้ในปฏิบัติการ การสะท้อนและหักเหของแสง

เลเซอร์กระจายลำแสงแบบเส้น (line laser) ซึ่งอาศัยหักเหของแสงผ่านเลนส์ทรงกระบอก (cylindrical lens) หรือเลนส์โพเวลล์ (powell lens) ซึ่งทำให้เกิดการกระจายแสงเป็นเส้นได้ [7] ซึ่งลำแสงแบบเส้นนี้ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในด้านการสแกนด้วยเลเซอร์ [8, 9] ซึ่งในงานวิจัยนี้จะนำเลเซอร์กระจายลำแสงแบบเส้นมาใช้ประโยชน์ในการเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่สามารถนำมาใช้ในปฏิบัติการทางแสงและงานวิจัยทางแสง จึงต้องมีการออกแบบและศึกษาสมบัติทางแสงในเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานได้ต่อไป

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงคุณภาพแสงที่ได้จากเลเซอร์กระจายลำแสงแบบเส้น

2. ทราบถึงประสิทธิภาพการนำเลเซอร์กระจายลำแสงแบบเส้นไปใช้ในปฏิบัติการ เรื่องการสะท้อนและหักเหของแสง

3. ได้อุปกรณ์สำหรับพัฒนาปฏิบัติการ การสะท้อน และหักเหของแสงที่ใช้งานได้สะดวก ราคาประหยัด และมีความปลอดภัยในการใช้งาน

4. สามารถนำไปพัฒนาชุดปฏิบัติการพื้นฐานของ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวรได้

5. ชุดเลเซอร์กระจายลำแสงแบบเส้นที่ได้ศึกษาในงานวิจัยนี้ สามารถนำไปพัฒนาปฏิบัติการพื้นฐานฟิสิกส์ เรื่องการสะท้อน และหักเหของแสงได้ ทั้งในระดับมัธยมศึกษา และอุดมศึกษาต่อไปได้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ธรรมชาติของแสง[10]

แสง คือ การแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นที่สายตามนุษย์มองเห็น หรือบางครั้งอาจรวมถึงการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่รังสีอินฟราเรดถึงรังสีอัลตราไวโอเลต

แสงจะแสดงคุณสมบัติทั้งคลื่นและของอนุภาคในเวลาเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากทวิภาวะของคลื่นและอนุภาค (duality of wave and particle) ธรรมชาติที่แท้จริงของแสงเป็นปัญหาหลักปัญหาหนึ่งของฟิสิกส์สมัยใหม่

แสงมีคุณสมบัติทวิภาวะ กล่าวคือ

แสงเป็นคลื่น : แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยที่ระนาบการสั่นของสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับระนาบการสั่นของสนามไฟฟ้าและตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น ทั้งนี้แสงยังมีการเลี้ยวเบนซึ่งเป็นคุณสมบัติหนึ่งของคลื่น

แสงเป็นอนุภาค : แสงเป็นก้อนพลังงานมีค่าพลังงาน E = hf โดยที่ h คือค่าคงตัวของพลังค์ และ f คือความถี่ของแสง เรียกอนุภาคแสงว่า โฟตอน (Photon)

2.1.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า[11]

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Radiation (EM radiation หรือ EMR)) เป็นคลื่นชนิดหนึ่งที่ไม่ต้องใช้ตัวกลางในการเคลื่อนที่ เช่น คลื่นวิทยุ (Radiowaves) คลื่นไมโครเวฟ (Microwaves) เป็นต้น

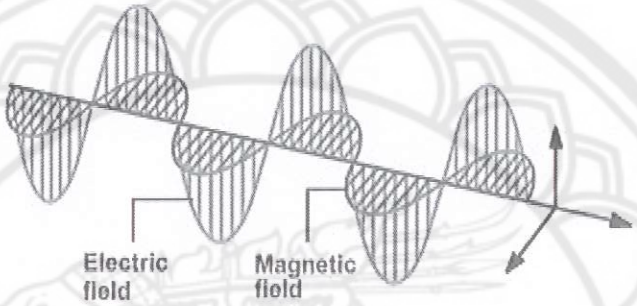
ปัจจุบันมีการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหลายๆด้าน เช่น การติดต่อสื่อสาร (มือถือ โทรทัศน์ วิทยุ เรดาร์ ใยแก้วนำแสง) ทางการแพทย์ (รังสีเอกซ์) การทำอาหาร (คลื่นไมโครเวฟ) และการควบคุมรีโมท (รังสีอินฟราเรด)

คุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คือ เป็นคลื่นที่เกิดจากคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กตั้งฉากกันและเคลื่อนที่ไปยังทิศทางเดียวกัน คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถเดินทางได้ด้วยความเร็ว 299,792,458 เมตร/วินาที หรือเทียบเท่ากับความเร็วแสง (velocity of light)

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดจากการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic disturbance) โดยการทำให้สนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก หรือถ้าสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงก็จะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ายังเป็นคลื่นตามขวาง ประกอบด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มี

การสั่นในแนวตั้งฉากกันและอยู่บนระนาบตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของคลื่น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นที่เคลื่อนที่โดยไม่อาศัยตัวกลางจึงสามารถเคลื่อนที่ในสุญญากาศได้ ดังแสดงในภาพ 2-1

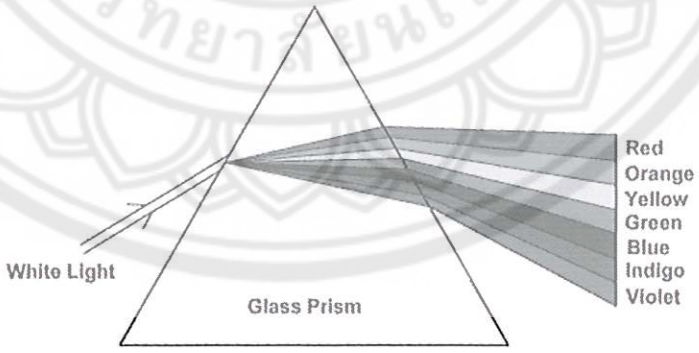
สเปกตรัม (Spectrum) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะประกอบด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่และความยาวคลื่นแตกต่างกัน ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่คลื่นแสงที่ตามองเห็น อัลตราไวโอเลต อินฟราเรด คลื่นวิทยุ โทรทัศน์ ไมโครเวฟ รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา เป็นต้น ดังนั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงมีประโยชน์มากในการสื่อสารโทรคมนาคมและทางการแพทย์



ภาพ 2-1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า[12]

2.1.2 ความยาวคลื่นแสง

หากเรานำแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นแสงสีขาวส่องผ่านปริซึม แสงขาวจะถูกแยกออกได้ 7 สี คือ ม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง แสด และแดง โดยลำดับของสีจะเรียงตามการกระจายแสงจากมากไปน้อย เรียกแสงสีที่เกิดขึ้นนี้ว่า สเปกตรัมของแสง ดังแสดงในภาพ 2-2

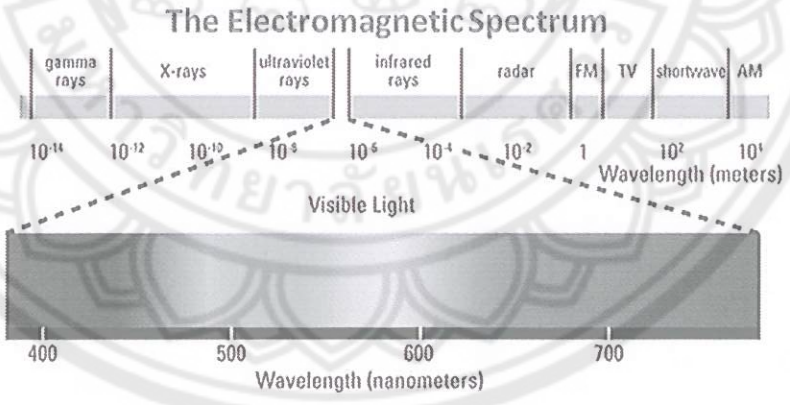


ภาพ 2-2 แสดงแสงขาวผ่านปริซึมแยกเป็นแสงสีต่างๆ[13]

ตาราง 2-1 แสดงช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น[14]

แสงสี	ความยาวคลื่น(นาโนเมตร)
ม่วง	380-450
น้ำเงิน	450-500
เขียว	500-570
เหลือง	570-590
แสด	590-610
แดง	610-760

การที่เราสามารถเห็นสีของวัตถุแตกต่างกันก็เพราะเมื่อให้แสงกระทบผิววัตถุ ปริมาณแสงสะท้อนจากผิววัตถุหรือปริมาณแสงที่ผ่านจากวัตถุเข้าสู่ตามีปริมาณต่างกัน การจะเห็นสีที่แท้จริงของวัตถุ วัตถุนั้นจะต้องส่องด้วยแสงสีเดียวกันหรือมีแสงสีเดียวกันรวมอยู่ด้วยจึงจะมองเห็นวัตถุด้วยสีแท้จริงของมัน และถ้าส่องด้วยแสงแดดจะเห็นสีที่แท้จริงของวัตถุ ทั้งนี้เพราะแสงแดดประกอบด้วยแสงสีต่างๆทุกสี ดังนั้นแสงที่มีสีเดียวกับวัตถุจะสะท้อนเข้าสู่ตา แสงช่วงที่ตาสามารถมองเห็นมีค่าอยู่ระหว่าง 400–700 นาโนเมตร โดยแสงสีม่วงซึ่งมีความยาวคลื่นน้อยที่สุดหรือความถี่สูงสุด ส่วนแสงสีอื่นๆให้สเปกตรัมของแสงในช่วงนี้ก็มีความยาวคลื่นสูงขึ้นตามลำดับจนถึงแสงสีแดงมีความยาวคลื่นมากที่สุดหรือมีความถี่ต่ำที่สุด ดังแสดงในภาพ 2-3

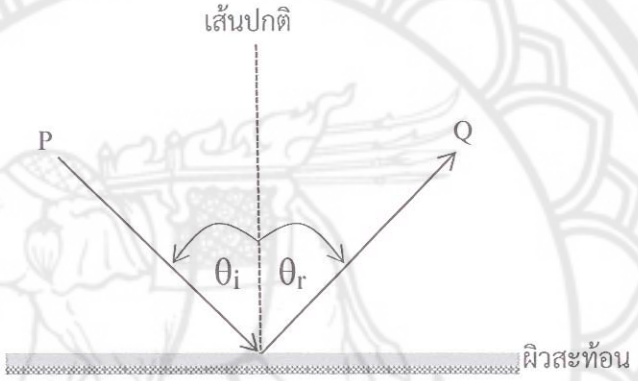


ภาพ 2-3 แสดงสเปกตรัมแสงที่ตามองเห็นได้[15]

คลื่นที่มีความถี่ต่ำกว่าแสงสีแดง เรียกว่า “อินฟราเรด (Infrared)” ส่วนคลื่นที่มีความถี่สูงกว่าแสงสีม่วง เรียกว่า “อัลตราไวโอเลต (Ultraviolet)”

2.2 การสะท้อน (Reflection)

การสะท้อน (reflection) หมายถึงการเปลี่ยนแปลงทิศทาง ของหน้าคลื่นที่รอยต่อของตัวกลางสองชนิด และทำให้หน้าคลื่นหันกลับไปยังฝั่งของตัวกลางชนิดแรก ตัวอย่างเช่น การสะท้อนของแสง คลื่นน้ำ และคลื่นเสียง โดยอยู่ภายใต้***กฎการสะท้อน*****ที่กล่าวว่า*****ที่พื้นผิวใด ๆ มุมตกกระทบ*** *(θ_i) จะมีค่าเท่ากับมุมสะท้อน (θ_r) ณ จุดที่เกิดการสะท้อนนั้น*จากแผนภาพดังแสดงในภาพ 2-4 รังสีตกกระทบ PO ตกสู่กระจกเงาที่จุด O และสะท้อนออกเกิดเป็นรังสีสะท้อน OQ เส้นตั้งฉากกับพื้นผิวสะท้อน มีชื่อเรียกว่าเส้นปกติหรือเส้นตั้งฉาก มุมตกกระทบ θ_i *คือมุมที่วัดจากรังสีตกกระทบสู่เส้นตั้งฉาก ในทำนองเดียวกันมุมสะท้อน* θ_r คือมุมที่เกิดจากรังสีสะท้อนตัดกับเส้นปกติ



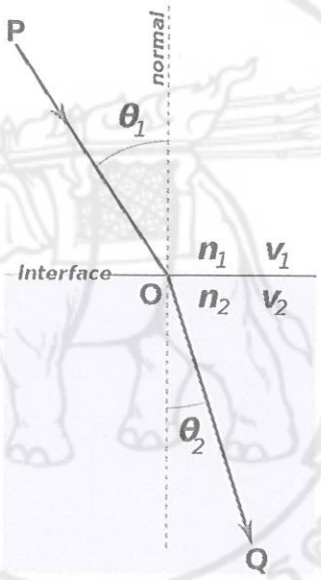
ภาพ 2-4 แสดงการสะท้อนของแสง

แสงอาจเกิดการสะท้อนสมบูรณ์ (specular reflection) เช่น การสะท้อนผ่านกระจกเงา หรือสะท้อนไม่สมบูรณ์ (diffuse reflection) ซึ่งสูญเสียภาพเชิงฟิสิกส์ แต่อนุรักษ์พลังงานขึ้นกับชนิดของตัวกลางทึบแสงซึ่งแสงเกิดการสะท้อนกระจกเงาเป็นตัวอย่างที่สำคัญในการสะท้อนที่สมบูรณ์ กระจกเงาประกอบด้วยแผ่นแก้วที่ฉาบด้วยโลหะที่พื้นผิวโลหะที่ฉาบบนแผ่นแก้วนี้เองที่เกิดการสะท้อนของแสงการสะท้อนของแสงยังอาจเกิดได้กับพื้นผิวประเภทโปร่งแสง เช่น การสะท้อนของแสงบนผิวน้ำ หรือกระจกใส

ในธรรมชาติ การสะท้อนของแสงเกิดขึ้นที่ทุกพื้นผิวสัมผัสระหว่างตัวกลางสองชนิด ที่มีดัชนีการหักเหแสงที่แตกต่างกัน กล่าวคือการสะท้อนของแสงผ่านกระจกเงา ก็คือการสะท้อนของแสงที่ผิวสัมผัสระหว่างแก้วกับโลหะที่ฉาบไว้ ในขณะที่การสะท้อนบนผิวน้ำ ก็คือการสะท้อนที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำกับอากาศโดยทั่วไปแสงส่วนหนึ่งจะเกิดการสะท้อนที่ผิวสัมผัสของวัตถุดังกล่าว และส่วนที่เหลือจะหักเหและเดินทางเข้าสู่ตัวกลางชนิดที่สอง

2.3 การหักเห (Refraction)

การหักเหของแสง เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อแสงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางต่างชนิดกัน เมื่อแสงเคลื่อนที่จากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่ง แสงจะมีการหักเหและการหักเหจะเกิดขึ้นที่ผิวรอยต่อของตัวกลาง ในการเปลี่ยนตัวกลางความถี่ของแสงยังคงเท่าเดิม ส่วนความยาวคลื่นและความเร็วของแสงจะเปลี่ยนไป ในตัวกลางที่มีค่าความหนาแน่นน้อย แสงจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง (ดัชนีหักเหของแสงน้อย)และในตัวกลางที่มีค่าความหนาแน่นมาก แสงจะเคลื่อนที่ด้วยความต่ำ (ดัชนีหักเหของแสงมาก)



ภาพ 2-5 แสดงการหักเหของแสง

กฎการหักเหของแสง

1. รังสีตกกระทบ เส้นแนวฉาก และรังสีหักเห อยู่ในระนาบเดียวกันดังแสดงในภาพ 2-5
2. สำหรับตัวกลางคู่หนึ่ง ๆ อัตราส่วนระหว่างค่า sin ของมุมตกกระทบ θ_1 ในตัวกลางหนึ่งกับค่า sin ของมุมหักเห θ_2 ในอีกตัวกลางหนึ่งมีค่าคงที่เสมอดังสมการ 1

$$\frac{sin\theta_1}{sin\theta_2} = n_{12} = \frac{n_2}{n_1} \qquad (1)$$

หรือเขียนได้เป็น

$$n_1 sin\theta_1 = n_2 sin\theta_2 \qquad (2)$$

ความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ตั้งขึ้นจากการทดลอง Snell จึงเป็นที่รู้จักกันในนามกฎการหักเหของสเนลล์ (Snell's law of reflaction)

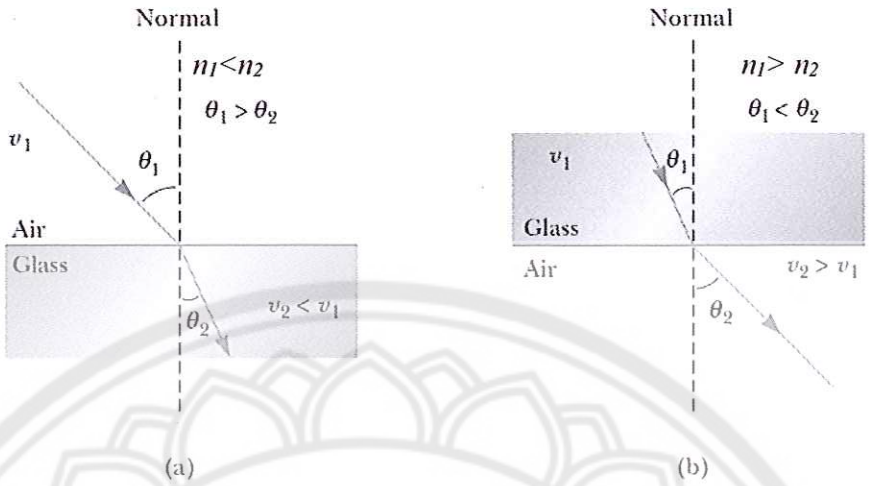
นอกจากนี้สมการ 1 ยังสามารถเขียนในรูปของความสัมพันธ์กับความเร็ว v และความยาวคลื่น λ ได้เป็น

$$\frac{sin\theta_1}{sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = n_{12} = \frac{n_2}{n_1} \qquad (3)$$

ในการหักเหของแสง ทิศทางการเคลื่อนที่ของแสงจะอยู่ในแนวเดิม ถ้าแสงตกตั้งฉากกับผิวรอยต่อของตัวกลาง และจะไม่อยู่ในแนวเดิมถ้าแสงไม่ตกตั้งฉากกับผิวรอยต่อของตัวกลาง

การหักเหของแสงเกิดขึ้นได้ 2 แบบ คือ

1. การหักเหเข้าหาเส้นปกติ เกิดขึ้นเมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเหน้อยไปสู่ตัวกลางที่มีดัชนีหักเหมากดังแสดงในภาพ 2-6(a)
2. การหักเหออกจากเส้นปกติ เกิดขึ้นเมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเหมากไปสู่ตัวกลางที่มีดัชนีหักเหน้อยดังแสดงในรูปที่ 2-6(b)



ภาพ 2-6 แสดงการหักเหของแสง

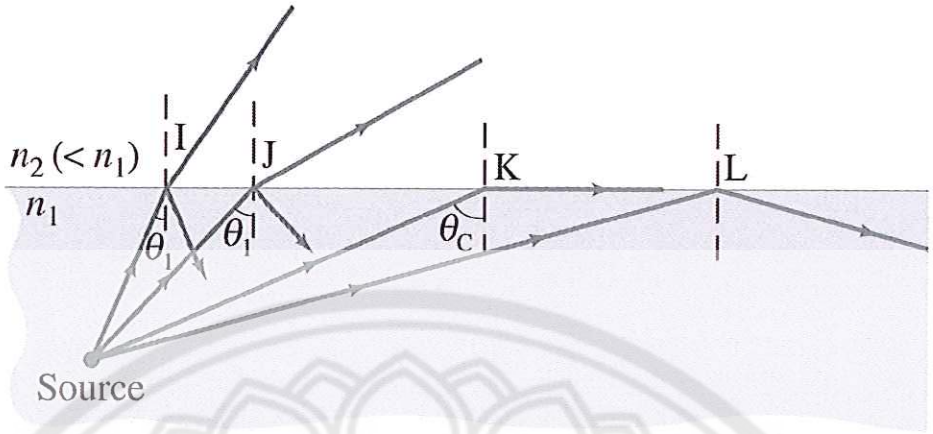
(a) แสงเดินทางจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเหน้อยไปสู่ตัวกลางที่มีดัชนีหักเหมาก

(b) แสงเดินทางจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเหมากไปสู่ตัวกลางที่มีดัชนีหักเหน้อย

2.4 มุมวิกฤตและการสะท้อนกลับหมด (The Critical Angle and Total Reflection)

เมื่อรังสีของแสงจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเหมากไปยังตัวกลางที่มีดัชนีหักเหน้อยกว่าอาจแยกการพิจารณาได้เป็น 3 ลักษณะดังภาพ 2-7 คือ

1. เมื่อมุมตกกระทบ θ_1 น้อยกว่า**มุมวิกฤต** θ_c ซึ่งเป็นมุมตกกระทบที่ทำให้มุมหักเห θ_2 เป็น 90 องศาจะมีทั้งรังสีหักเหและรังสีสะท้อน
2. เมื่อมุมตกกระทบเท่ากับมุมวิกฤต จะมีรังสีสะท้อนและรังสีหักเหแต่รังสีหักเหจะขนานไปกับผิวของตัวกลาง
3. เมื่อมุมตกกระทบมีค่ามากกว่ามุมวิกฤต แสงจะไม่หักเหผ่านไปสู่อีกตัวกลางหนึ่งแต่จะมีการสะท้อนเพียงอย่างเดียวลักษณะนี้เรียกว่า**การสะท้อนกลับหมด**



ภาพ 2-7 แสดงการหักเหของแสงและการสะท้อนกลับหมด

ถ้าพิจารณาจากกฎการหักเหและจากภาพ 2-6 (b) จะได้ว่า

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$$

$$\sin\theta_2 = \frac{n_1}{n_2}\sin\theta_1$$

มุมตกกระทบ θ_1 มากที่สุดที่จะยังคงทำให้เกิดการหักเหได้ (เมื่อ $\theta_2 = 90°$) หรือ $\theta_1 = \theta_c$ โดยที่

$$\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1} \qquad (4)$$

เมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางซึ่มมีดัชนีหักเห $n_1 = n$ สู่อากาศ $n_2 = 1$ จะสามารถหาค่าดัชนีหักเหของตัวกลางนั้นได้จาก

$$n = \frac{1}{\sin\theta_c} \qquad (5)$$

2.5 เลเซอร์ (Laser)

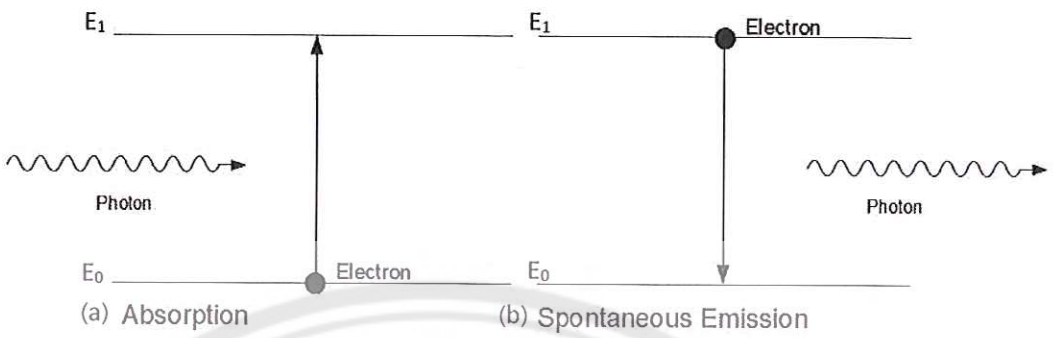
เลเซอร์คือ อุปกรณ์ที่ให้กำเนิดลำแสงที่มีลักษณะเฉพาะ ซึ่งพลังงานแสงเลเซอร์ สามารถมีคุณสมบัติได้หลากหลายขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ในการออกแบบ เลเซอร์ส่วนมากจะเป็นลำแสงที่มีขนาดเล็กมีการเบี่ยงเบนน้อย (low-divergence beam) และมีค่าความยาวคลื่นที่แน่นอน

การค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับเลเซอร์ เกิดขึ้นครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ.1960 โดย ทีโอดอร์ ไมแมน (Theodore Maiman) ที่สถาบันวิจัย ฮิวจ์ (Hughes Research Laboratories) ผลผลิตจากงานวิจัยเลเซอร์มีให้เห็นอย่างแพร่หลายในปัจจุบันเช่น เครื่องเล่นดีวีดี เครื่องอ่านบาร์โค้ดอุปกรณ์ตัดโลหะด้วยเลเซอร์ ฯลฯ จะเห็นได้ว่าเลเซอร์มีการใช้กันอย่างกว้างขวาง ไม่ว่าจะเป็นด้านวิทยาศาสตร์ด้านอุตสาหกรรม ด้านการแพทย์ หรือแม้กระทั่งด้านการทหาร ก็เพราะว่าเลเซอร์สามารถควบคุมความยาวคลื่นตามที่ต้องการได้

หลักการทำงานของเลเซอร์

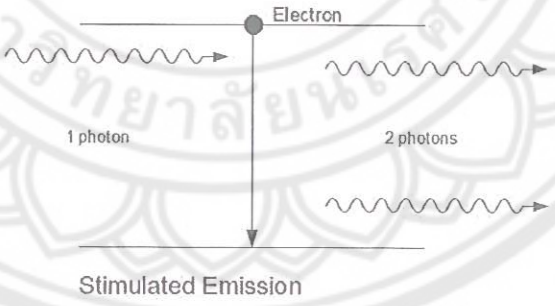
Laser ย่อมาจากคำว่า light amplification by stimulated emission of radiation ซึ่งแปลความได้ว่า การขยายแสงโดยอาศัยหลักการแผ่รังสีแบบกระตุ้น

การขยายแสง คือการเพิ่มจำนวนโฟตอนหรือเพิ่มความเข้มแสง ให้มีมากขึ้นกว่าเดิมซึ่งโดยปกติอิเล็กตรอนในอะตอมหรือโมเลกุลจะอยู่ในชั้นพลังงานต่ำเสมอ (E_0) เพราะเป็นสภาวะที่มีความเสถียรภาพมากกว่า แต่เมื่อถูกกระตุ้นก็จะเกิดการดูดกลืนพลังงานที่มากระตุ้นทำให้อิเล็กตรอนขึ้นไปอยู่ในชั้นพลังงานที่สูงกว่า (E_1) แต่สถานะพลังงานในชั้นพลังงาน E_1 นี้ไม่เสถียร จึงสามารถคงตัวได้เพียงชั่วระยะเวลาหนึ่ง หลังจากนั้นจึงมีการคายพลังงานออกมา เพื่อทำให้ตัวเองอยู่ในสภาวะเสถียรอีกครั้งในชั้นระดับพลังงาน E_0 ดังนั้นพลังงานที่อิเล็กตรอนปล่อยออกมา จึงมีค่าเท่ากับผลต่างของพลังงานระหว่างชั้นพลังงาน (E_1-E_0) การคายพลังงานออกมาหรือการปลดปล่อยในลักษณะนี้ เป็นไปตามธรรมชาติเราเรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่า การปลดปล่อยแบบเกิดขึ้นเอง (Spontaneous Emission) ดังแสดงในภาพ 2-8



ภาพ 2-8 การเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอน

ในปี ค.ศ. 1917 ไอน์สไตน์ ได้เสนอว่า นอกเหนือจากปรากฏการณ์ปลดปล่อยแบบเกิดขึ้นเองแล้ว ยังสามารถทำให้เกิด**การปลดปล่อยโดยการถูกกระตุ้น(stimulated emission)** ได้ด้วย ซึ่งการปลดปล่อยโดยการถูกกระตุ้นนี้เป็นกลไกหลักในการกำเนิดแสงเลเซอร์ กล่าวคือในขณะที่อิเล็กตรอนอยู่ในสถานะกระตุ้น เช่น อยู่ในชั้นพลังงาน E_1 ถ้ามีโฟตอนแสงจากภายนอกที่มีพลังงานเท่ากับความแตกต่างของระดับพลังงาน $E_1 - E_0$ เข้ามาชน จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นพลังงาน E_1 นี้ ถูกกระตุ้นให้ลงมายังชั้นพลังงาน E_0 โดยมีการคายพลังงานออกมาในรูปของโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับ $E_1 - E_0$ เนื่องจากโฟตอนแสงที่มาชนไม่ถูกดูดกลืน โดยอิเล็กตรอนที่ถูกชนทำให้จำนวนโฟตอนเพิ่มขึ้นเป็นสองอนุภาค (โฟตอนที่มากระตุ้นบวกกับโฟตอนที่ได้จากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน) ดังแสดงในภาพ 2-9

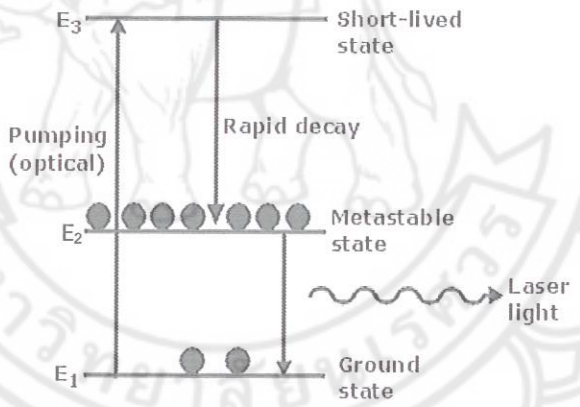


ภาพ 2-9 การปลดปล่อยโดยการถูกกระตุ้น

โฟตอนทั้งสองนี้มีพลังงานเท่ากัน มีความถี่เดียวกัน มีเฟสตรงกันมีโพลาไรเซชันเหมือนกัน และเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกัน ซึ่งถ้าพิจารณาในมุมมองของคลื่นแล้ว จะพบว่าเมื่อแสงสองขบวนมีความถี่ตรงกันมีเฟสตรงกัน เคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกันสามารถที่จะรวมกันในลักษณะที่เสริมกันได้

ทำให้ได้คลื่นรวมที่มีแอมปลิจูดสูงขึ้น เกิดเป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่า**การขยายสัญญาณแสง (light amplification)** ขึ้นถ้าสามารถทำให้เกิดการขยายสัญญาณแสงในลักษณะนี้กับอิเล็กตรอนเป็นจำนวนมาก ๆ ได้ก็จะทำให้ได้สัญญาณแสงที่มีความเข้มสูงออกมา จากที่กล่าวมาพบว่าปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งในการที่จะทำให้เกิดการขยายแสง โดยการกระตุ้นได้มาก ๆ คือการทำให้มีประชากรอิเล็กตรอนในสถานะกระตุ้นมาก ๆ ซึ่งในธรรมชาติเป็นไปไม่ได้จึงต้องมีการหาวิธีการที่จะทำให้ประชากรอิเล็กตรอนในสถานะกระตุ้นมากกว่าสถานะพื้น

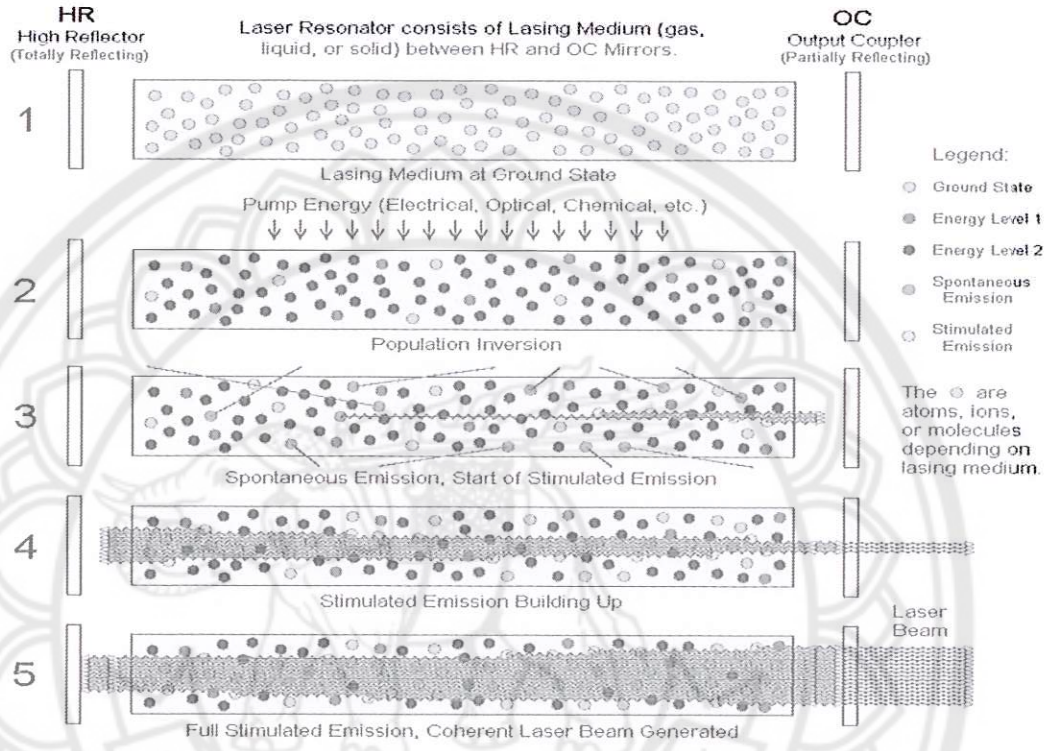
ปรากฏการณ์ที่ทำให้จำนวนประชากรอิเล็กตรอนในชั้นพลังงานสูง มีมากกว่าประชากรในชั้นพลังงานต่ำ เรียกว่า**ประชากรผกผัน** (population inversion)ในทางปฏิบัติสามารถทำให้เกิดประชากรผกผันได้โดยการใช้พลังงานจากภายนอกปริมาณหนึ่งที่เพียงพอ จะทำให้ประชากรอิเล็กตรอนมีสถานะ เปลี่ยนไปจากสถานะพื้น E_1 ไปยังสถานะกระตุ้น E_3 หลังจากนั้นอิเล็กตรอนจะเปลี่ยนสถานะมาอยู่ที่ E_2 อย่างรวดเร็ว สถานะชั้นระดับพลังงาน E_2 นี้เรียกว่า**สถานะกึ่งเสถียร** (metastable state)และเมื่ออิเล็กตรอนในสถานะกึ่งเสถียรถูกกระตุ้นให้ตกกลับมายังสถานะพื้น จะปลดปล่อยโฟตอนแสงเป็นจำนวนมากออกมาดังภาพ 2-10



ภาพ 2-10 การปลดปล่อยโฟตอนแสงจากสถานะกึ่งเสถียร

อย่างไรก็ตามการกระตุ้นประชากรอิเล็กตรอน เพื่อให้มีการปล่อยแสงเพียงครั้งเดียวยังไม่สามารถทำให้ได้แสงเลเซอร์ออกมา เนื่องจากในความเป็นจริงในขณะเดียวกับที่เกิดการปล่อยแสง โดยการถูกกระตุ้นก็จะมีการดูดกลืนแสงเกิดขึ้นด้วย โดยประชากรอิเล็กตรอนในสถานะพื้นทำให้ความเข้มแสงที่ได้มีปริมาณลดลงดังนั้นเพื่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความเข้มของสัญญาณแสงจึงต้องทำให้เกิดปรากฏการณ์ปล่อยแสง โดยการถูกกระตุ้นอย่างต่อเนื่อง โดยการทำให้โฟตอนแสงที่ได้จากการปลดปล่อยของประชากรอิเล็กตรอนมากระตุ้นให้เกิดการปลดปล่อยแบบถูกกระตุ้นซ้ำแล้วซ้ำอีก

จนกระทั่งสัญญาณแสงมีความเข้มสูงขึ้นจนถึงจุดเลสชิง (lasing point) หรือจุดออสซิลเลตของเลเซอร์ (laser oscillating point) แสงที่ได้ออกมาจึงมีสมบัติเป็นแสงเลเซอร์ซึ่งขั้นตอนการเกิดแสงเลเซอร์แสดงดังภาพ 2-11



ภาพ 2-11 แสดงการเกิดแสงเลเซอร์

คุณสมบัติของเลเซอร์

1.มีทิศทางเดียวที่แน่นอน (Directionality) ลำแสงเลเซอร์จะขนานกันไปตลอดระยะทางไกล ๆ ไม่มีการบานปลายออก ดังนั้นความเข้มของแสงเลเซอร์จะลดลงน้อยมากในระยะทางไกลๆ

2. เป็นแสงเอกรงค์ (Monochromaticity)แสงเลเซอร์เป็นแสงความยาวคลื่นเดี่ยว เช่น แสงสีแดงของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนมีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร ซึ่งต่างจากแสงที่เราพบเห็นในชีวิตประจำวัน เช่น หลอดไฟฟ้า และดวงอาทิตย์จะเป็นแสงที่มีหลายความยาวคลื่นรวมกันอยู่ เรียกว่าแสงขาว

3. **มีความเจิดจ้า (Brightness)**แสงเลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ให้ความเข้มสูง และเมื่อลำแสงตกกระทบวัตถุ ก็เกิดความระยิบระยับของลำแสงขึ้น(Laser Speackle) โดยเฉพาะเมื่อวัตถุนั้นมีความหยาบ หรือแม้แต่ในบรรยากาศที่มีฝุ่นละออง หรือควันซึ่งเป็นอนุภาคแขวนลอยอยู่ทั้งนี้เนื่องจากแสงเลเซอร์เกิดการสะท้อนแบบไม่มีทิศทางกับอนุภาคหรือผิวของวัตถุ และเกิดการแทรกสอดของลำแสงทำให้เกิดความระยิบระยับขึ้นแสงเลเซอร์กำลังต่ำ ๆ เช่น เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน ขนาด 1 mW ก็มีความเข้มสูงกว่าแสงพระอาทิตย์ ฉะนั้นถ้าฉายเข้าตามนุษย์โดยตรงแล้วจะเป็นอันตรายต่อนัยน์ตาถึงตาบอดได้

4. **มีความเป็นอาพันธ์** (coherence)หลอดไฟฟ้าที่เปล่งแสงประกอบด้วยอะตอมที่เล็กจำนวนมาก โดยแต่ละอะตอมจะทำหน้าที่เป็นต้นกำเนิดแสง ดังนั้นแต่ละอะตอมก็ปล่อยแสงออกมาอย่างอิสระซึ่งกันและกันแสงที่ถูกปล่อยออกมาจากหลอดไฟ จึงมีเฟสและความยาวคลื่นต่าง ๆ กันยิ่งกว่านั้นแต่ละคลื่นที่ถูกปล่อยออกมามีทิศทางไม่แน่นอน หรือเป็น random แสงจากแหล่งต้นกำเนิดแสงโดยทั่วไปจะไม่เป็นแสงอาพันธ์ (incoherence light) ต้นกำเนิดของแสงเลเซอร์นอกจากจะให้แสงความยาวคลื่นเดี่ยวแล้ว ทุกๆ คลื่นของแสงเลเซอร์จะมีเฟสเดียวกันหมด ดังนั้นแสงเลเซอร์จึงเป็นแสงโคฮีเรนต์(coherence light)

การประยุกต์ใช้งานเลเซอร์

1. **การใช้เลเซอร์ด้านการแพทย์** เลเซอร์ถูกนำมาใช้ในการผ่าตัดและรักษาทางด้านการแพทย์และจักษุแพทย์ เช่นการผ่าตัดที่มีขนาดเล็ก (Microsurgery) การผ่าตัดต้อ เป็นต้นเลเซอร์ที่ใช้ได้แก่ เลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ เลเซอร์อาร์กอนการเลือกใช้เลเซอร์แบบต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับว่าอวัยวะที่ต้องการผ่าตัดมีความสามารถในการดูดกลืนแสงสีอะไร และขนาดกำลังของเลเซอร์ เช่น เส้นเลือดแดงจะดูดกลืนสีแดงได้น้อย จึงใช้เลเซอร์แสงสีเขียวที่ได้จากเลเซอร์ก๊าซอาร์กอนในการใช้งานจริง ๆ อาจใช้ลำแขนที่มีกระจกเลนส์อยู่ภายในและหักงอได้เป็นตัวนำแสงเลเซอร์ ไปยังบริเวณอวัยวะที่จะผ่าตัดหรือใช้ลำแสงเลเซอร์ผ่านกล้องจุลทรรศน์ผ่าตัด ในการรักษาโรคมะเร็งเลเซอร์ที่ใช้จะต้องมีความหนาแน่นพลังงาน 300-500 ลูกบาศก์เซนติเมตร แสงเลเซอร์จะทำลายเซลล์เนื้องอก โดยไม่ทำลายเนื้อเยื่อปกติโดยรอบบาดแผลภายหลังการผ่าตัดจะฟื้นตัวเร็ว ในงานจุลศัลยกรรมของเส้นเลือดเลเซอร์สามารถห้ามเลือดให้หยุดไหล โดยการเชื่อมเส้นเลือดเล็ก ๆ ภายในบริเวณจำกัดให้ติดกัน วิธีการอาจใช้ท่อนำแสงเข้าช่วยด้วยเพื่อนำแสงเลเซอร์ไปตามช่องอวัยวะที่เข้าถึงยาก

2. **การใช้เลเซอร์ด้านสื่อสารโทรคมนาคม** การสื่อสารในปัจจุบันส่วนใหญ่ใช้คลื่นไมโครเวฟหรือใช้โทรศัพท์อย่างไรก็ตามหลังจากที่มีการพัฒนาเลเซอร์ไดโอด(semiconductor diode laser) และเส้นใยแก้วนำแสง (optical fiber) แล้วการสื่อด้วยแสง(optical communication) หรือการส่งข้อมูลข่าวสารจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งหรือระหว่างเมืองต่าง ๆ ก็เป็นไปได้อย่างรวดเร็ว ในอนาคตการสื่อสารด้วยเลเซอร์จะเข้ามาแทนที่ระบบโทรศัพท์ที่ใช้ลวดตัวนำที่ใช้กันอยู่ทั่วไป แสงเลเซอร์นี้มีจุดเด่นที่จะไม่มีสัญญาณรบกวนเพราะเป็นคลื่นแสงมีความจุข้อมูลสูงมาก เพราะมีความถี่สูงกว่าคลื่นวิทยุทำให้เส้นใยแก้วนำแสงเส้นหนึ่งสามารถจุคู่สายโทรศัพท์ได้เป็นพัน ๆ คู่

3. **การใช้เลเซอร์ด้านการสร้างภาพสามมิติ** ปัจจุบันได้ใช้เลเซอร์ในการสร้างภาพ 3 มิติ หรือภาพ โฮโลกราฟี_หมายถึง กระบวนการสร้างภาพฮอโลแกรม ซึ่งเป็นภาพ 3 มิติแตกต่างจากการสร้างภาพเชิง 3 มิติ โดยฮอโลแกรมนั้นเป็นภาพที่บันทึกลงบนฟิล์ม หรือแผ่นเคลือบด้วยสารสำหรับบันทึกแสง ซึ่งผ่านเทคนิคการบันทึกด้วยการใช้แสงที่มีหน้าคลื่นสอดคล้องกัน (coherence) เช่น แสงเลเซอร์และเมื่อถูกส่องสว่างอย่างเหมาะสม จะแสดงให้เห็นภาพที่มีลักษณะ 3 มิติฮอโลกราฟี เป็นเทคนิคที่ช่วยให้แสงกระจายจากวัตถุที่จะบันทึกและได้ถูกสร้างขึ้นใหม่ ต่อมาเพื่อให้ปรากฏเป็นวัตถุอยู่ในตำแหน่งเดิม เมื่อเทียบกับการบันทึกการเปลี่ยนแปลงรูปแบบตำแหน่ง และทิศทางของการระบบการมองเห็นเปลี่ยนแปลงไปอย่างถูกต้องเหมือนกับถ้าวัตถุ ก็ยังคงเป็นปัจจุบันจึงทำให้ภาพที่บันทึก(โฮโลแกรม) ปรากฏเป็นสามมิติเทคนิคของฮอโลกราฟี ยังสามารถใช้ในการเก็บดึงและประมวลผลข้อมูลที่เกี่ยวกับแสงในขณะที่ฮอโลกราฟีเป็นที่นิยมใช้เพื่อใช้แสดงภาพ 3 มิติแบบคงที่ แต่ก็ยังไม่สามารถสร้างฉากตามต้องการโดยการแสดงปริมาตรของ holographic ได้อาจกล่าวได้ว่า ฮอโลแกรมคือ บันทึกของรูปแบบการแทรกสอดของลำแสง ที่มีหน้าคลื่นสอดคล้องกัน 2 ลำ

4. **การใช้เลเซอร์ในการวัดการใช้เลเซอร์ในการวัด** นับ ทดสอบ ตรวจสอบการควบคุมทั้งในกระบวนการผลิตและในงานวิทยาศาสตร์ เช่นการตรวจสอบยางล้อเครื่องบินโดยไม่ทำลายโดยวิธีโฮโลกราฟี (holography) การวัดปริมาณมลภาวะเพื่อหาปริมาณของสารต่าง ๆ ในบรรยากาศเนื่องจากเลเซอร์มีความยาวคลื่นคงที่ และเป็นลำแสงขนานจึงถูกนำมาใช้เป็น**มาตรฐานการวัดที่ละเอียดแม่นยำ เช่น การวัดขนาดของสิ่งของการวัดระยะทางทั้งใกล้และไกล**

5. **การใช้เลเซอร์ในงานอุตสาหกรรม** เลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีคุณสมบัติเด่น คือเป็นคลื่นแสงที่มีระเบียบ มีลักษณะเป็นลำแสง ความเข้มแสงสูงจึงมีศักยภาพในการประยุกต์มากมาย ได้แก่ การใช้เลเซอร์เพื่อเจาะ ตัด เชื่อมเลเซอร์เป็นแสงที่มีความเข้มสูง และเป็นลำแสงเมื่อโฟกัสจะมีขนาดเล็กสามารถ เจาะ ตัด เชื่อมวัสดุต่าง ๆ ได้ รูปที่เจาะรอยเชื่อม จะมีขนาดเล็กและคมชัดมาก ทำให้สามารถทำงานที่มีความละเอียดสูงได้เลเซอร์ที่ใช้งานต้องมีกำลังสูงเช่น เลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์

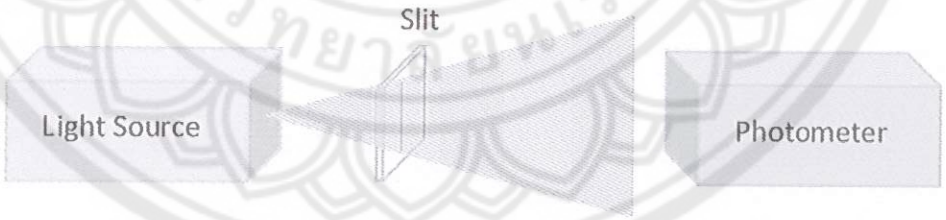
บทที่ 3

ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

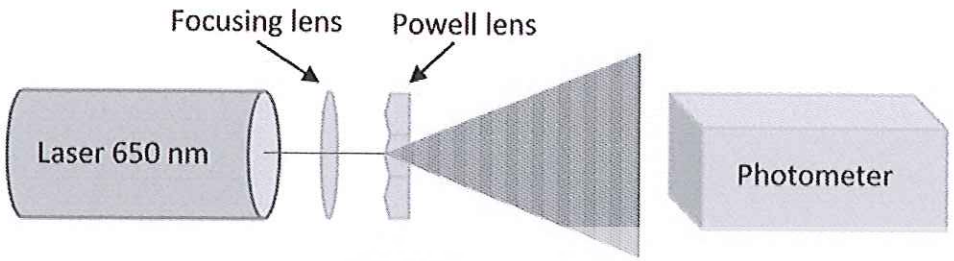
งานวิจัยนี้ได้ใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็น เลเซอร์ไดโอดความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร กำลังไม่เกิน 5 มิลลิวัตต์ ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง 3-5 โวลต์ กระจายลำแสงให้เป็นเส้นโดยใช้เลนส์โพเวลล์ เปรียบเทียบกับกล่องแสงที่ใช้ต้นกำเนิดแสงเป็นหลอดไส้(#211-2) โทนแสงสีเหลือง ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ กำลังไฟฟ้า 12 วัตต์ ใช้สลิตทำให้เป็นลำแสงแบบเส้น ผู้วิจัยได้ออกแบบแผ่นวงกลมแสดงตำแหน่งการวางแผ่นสะท้อนแสงและตัวกลางหักเหแสง แนวเส้นปกติ ค่ามุมตกกระทบ มุมสะท้อน และมุมหักเหของแสง ประกอบบนฐานที่หมุนได้ เพื่อเก็บข้อมูลคุณภาพการกระจายลำแสงแบบเส้นในการทำปฏิบัติการการสะท้อนและหักเหของแสง

3.1 การจัดตั้งระบบ

วัดค่าความเข้มแสงโดยใช้ Photometer OS-8020 การจัดตั้งระบบวัดความเข้มแสงจากกล่องแสงที่ใช้หลอดไส้ดังแสดงในภาพ 3-1 และจากเลเซอร์กระจายลำแสงแบบเส้นดังแสดงในภาพ 3-2 วัดความเข้มแสงที่ระยะ 30-60 เซนติเมตร จากต้นกำเนิดแสง

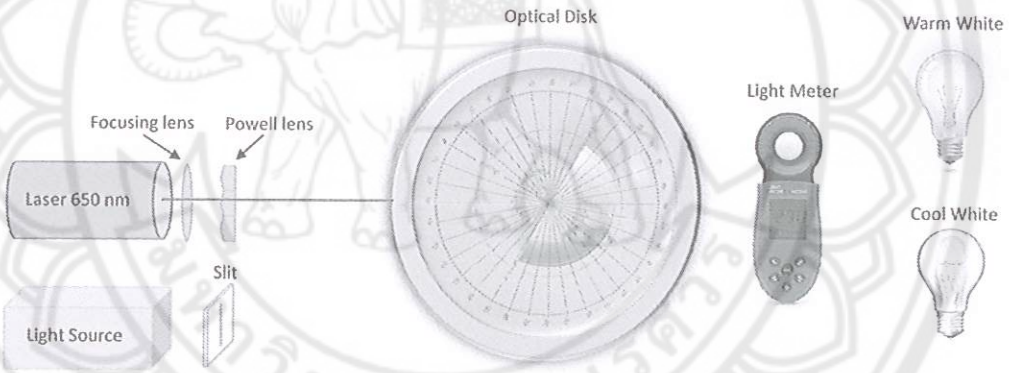


ภาพ 3-1 การวัดความเข้มแสงจากกล่องแสงที่ใช้หลอดไส้



ภาพ 3-2 การวัดความเข้มแสงจากเลเซอร์กระจายลำแสงแบบเส้น

เก็บข้อมูลคุณภาพการกระจายลำแสงแบบเส้นจากการสังเกตความชัดเจนของลำแสงสำหรับการใช้งานภายใต้แสงสว่างภายนอกในโทนแสงสีเหลืองและโทนแสงสีขาว โดยกลุ่มผู้สังเกตจำนวน 24 คน และวัดความสว่างโดย Lightmeter HS1010 จัดตั้งระบบและอุปกรณ์ที่ใช้ดังแสดงในภาพ 3-3



ภาพ 3-3 ความชัดเจนของลำแสงสำหรับการใช้งานภายใต้แสงสว่างภายนอก

3.2 ระยะเวลาทำการวิจัย และแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย

กิจกรรม	เดือนที่											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. ทบทวนวรรณกรรม/ สารสนเทศ (Information)	↔											
2. การจัดตั้งระบบทดลอง		←	—	→								
3. ทดสอบระบบ			←	—	→							
4. เก็บข้อมูล					←	—	—	—	→			
5. วิเคราะห์ผลการทดลอง							←	—	—	—	→	
6. เขียนบทความเพื่อรายงาน และถ่ายทอดผลงานวิจัย											↔	

3.3 งบประมาณของโครงการวิจัย

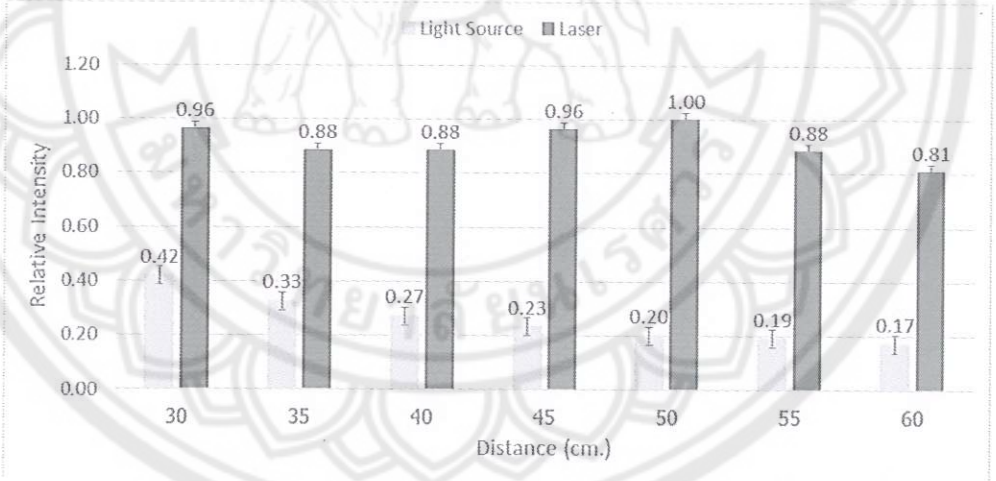
รายละเอียดค่าใช้จ่าย	งบประมาณ
1. หมวดค่าตอบแทน	
1.1 คณะผู้วิจัย	18,000
1.2 ผู้ช่วยวิจัย	15,000
2. หมวดค่าใช้สอย	
2.1 ค่าสืบค้นข้อมูล	3,000
2.2 ค่าจ้างเหมาบริการ	10,000
2.3 ค่าเดินทาง	10,000
2.4 ค่าที่พัก	5,000
2.5 ค่าใช้จ่ายในการสัมมนา ฝึกอบรม เผยแพร่ผลงาน	15,000
2.6 ค่าตรวจวิเคราะห์	8,000
3. หมวดค่าวัสดุ	
3.1 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	20,000
3.2 ระบบต้นกำเนิดแสง	30,000
3.3 ระบบตรวจวัดแสงและเก็บข้อมูล	25,000
3.4 ชิ้นส่วนอุปกรณ์ทางแสง	10,000
3.5 วัสดุสำหรับเผยแพร่ผลงาน	3,000
3.6 วัสดุคอมพิวเตอร์สำหรับการเชื่อมต่อและระบบบันทึกผล	5,000
3.7 หนังสือ วารสาร ตำรา	3,000
รวม	180,000

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ค่าความเข้มแสงและความชัดเจนของลำแสง

จากผลการวัดค่าความเข้มแสงจากกล่องแสงที่ใช้หลอดไส้ประกอบกับแผ่นสลิตและจากเลเซอร์กระจายลำแสงแบบเส้นด้วยเลนส์โพเวลล์ ที่ระยะห่างจากต้นกำเนิดแสง 30-60 เซนติเมตร พบว่าความเข้มแสงที่ได้จากเลเซอร์มีค่าสูงกว่ากล่องแสงที่ใช้หลอดไส้อย่างเห็นได้ชัดดังแสดงในภาพ 4-1 และความเข้มแสงจากเลเซอร์กระจายลำแสงแบบเส้น ในระยะใช้งานตั้งแต่ 30-60 เซนติเมตร จากต้นกำเนิดแสงนั้น มีค่าความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 20% ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงน้อยกว่ากล่องแสงที่ใช้หลอดไส้โดยกล่องแสงมีแนวโน้มของความเข้มแสงที่ลดลงเมื่ออยู่ในระยะห่างจากต้นกำเนิดแสงมากขึ้น และที่ระยะ 60 เซนติเมตรจากต้นกำเนิดแสงมีความเข้มแสงลดลงเหลือ 40.5% จากระยะ 30 เซนติเมตร



ภาพ 4-1 ความเข้มแสงสัมพัทธ์ของกล่องแสงและเลเซอร์ที่ระยะ 30-60 เซนติเมตร

จากการสังเกตความชัดเจนของลำแสงสำหรับการใช้งานภายใต้แสงสว่างภายนอกในโทนแสงสีขาวและโทนแสงสีเหลืองของเลเซอร์กระจายลำแสงแบบเส้นและกล่องแสงที่ใช้หลอดไส้ ซึ่งแบ่งระดับการสังเกตเห็นแนวลำแสงเป็น 4 ระดับ คือ ชัดเจน, มองเห็น, ไม่ชัดเจน และ มองไม่เห็น

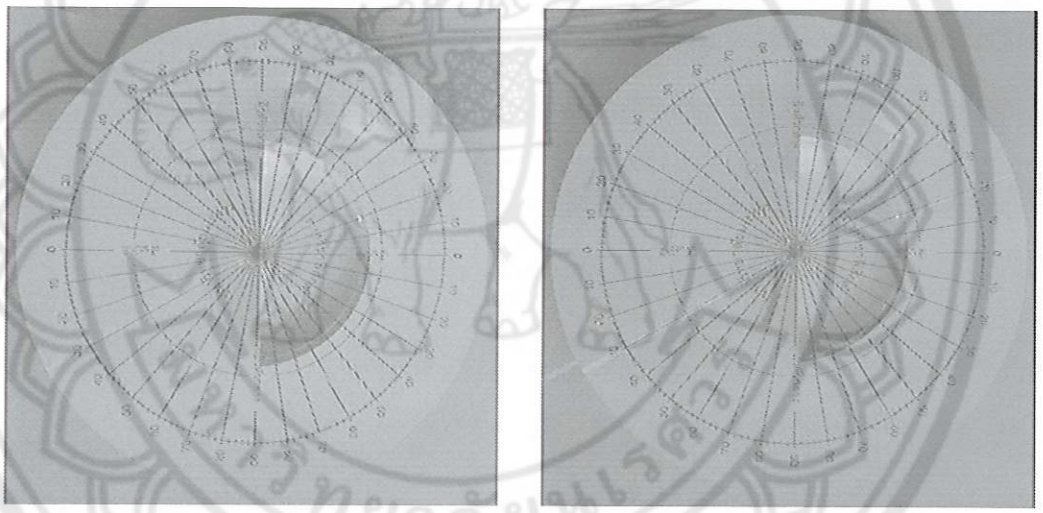
ตามลำดับ บันทึกผลการสังเกตเห็นลำแสงในระดับต่ำที่สุด จากกลุ่มผู้สังเกตที่ทดลองใช้งานจำนวน 24 คน ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 4-1 ความชัดเจนของลำแสงสำหรับการใช้งานภายใต้แสงสว่างภายนอก

ความสว่าง (ลักซ์)	เลเซอร์		กล่องแสง	
	แสงโทนสีขาว	แสงโทนสีเหลือง	แสงโทนสีขาว	แสงโทนสีเหลือง
0	ชัดเจน	ชัดเจน	ชัดเจน	ชัดเจน
10	ชัดเจน	ชัดเจน	ชัดเจน	มองเห็น
20	ชัดเจน	ชัดเจน	มองเห็น	มองเห็น
30	ชัดเจน	ชัดเจน	มองเห็น	มองเห็น
40	ชัดเจน	ชัดเจน	มองเห็น	ไม่ชัดเจน
50	ชัดเจน	ชัดเจน	ไม่ชัดเจน	ไม่ชัดเจน
60	ชัดเจน	ชัดเจน	ไม่ชัดเจน	มองไม่เห็น
70	ชัดเจน	ชัดเจน	มองไม่เห็น	
80	ชัดเจน	ชัดเจน		
90	ชัดเจน	ชัดเจน		
100	ชัดเจน	ชัดเจน		
200	ชัดเจน	มองเห็น		
300	ชัดเจน	มองเห็น		
400	มองเห็น	ไม่ชัดเจน		
500	มองเห็น	ไม่ชัดเจน		
600	มองเห็น	ไม่ชัดเจน		
700	มองเห็น	ไม่ชัดเจน		
800	ไม่ชัดเจน	มองไม่เห็น		
900	ไม่ชัดเจน			
1000	ไม่ชัดเจน			
2000	ไม่ชัดเจน			
3000	มองไม่เห็น			

จากผลการทดลองในตารางที่ 4-1 จะเห็นได้ว่าการใช้กล่องแสงที่ใช้หลอดไส้สามารถมองเห็นลำแสงได้ชัดเจนในบริเวณที่ไม่มีแสงสว่างจากภายนอกและสามารถมองเห็นลำแสงได้ในบริเวณที่มีความสว่างไม่เกิน 60 ลักซ์ แตกต่างจากลำแสงจากเลเซอร์กระจายลำแสงแบบเส้นที่สามารถมองเห็นลำแสงได้ชัดเจนในบริเวณที่มีความสว่างน้อยกว่า 100 ลักซ์ ในแสงโทนสีเหลือง และ 300 ลักซ์ ในแสงโทนสีขาว และสามารถมองเห็นลำแสงได้ในบริเวณที่มีแสงสว่างมากถึง 700 ลักซ์ ในแสงโทนสีเหลือง และ 2000 ลักซ์ ในแสงโทนสีขาว

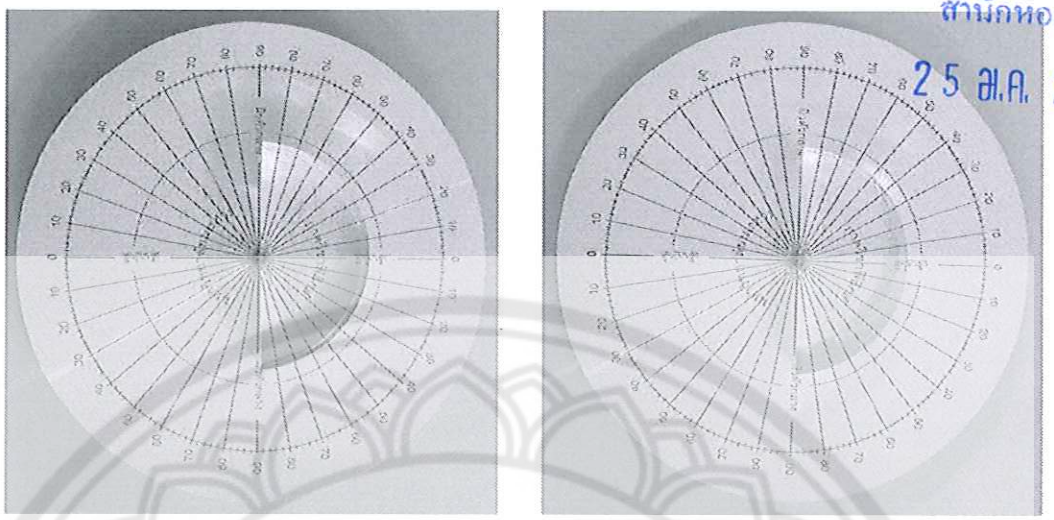
ตัวอย่างภาพถ่ายแนวลำแสงที่สังเกตได้ในบริเวณที่มีความสว่างของแสงภายนอกโทนสีขาว 30 ลักซ์ ดังแสดงในภาพ 4-2 แสงจากกล่องแสงที่ใช้หลอดไส้(ซ้าย) และ แสงจากเลเซอร์กระจายลำแสงแบบเส้น(ขวา) ซึ่งแสงจากเลเซอร์มองเห็นได้ชัดเจนกว่ากล่องแสงมาก และในบริเวณที่แสงสว่างภายนอกมีค่ามากลำแสงจากเลเซอร์ก็ยังสามารถมองเห็นได้ดังแสดงในภาพ 4-3 แสงจากเลเซอร์ในบริเวณที่มีแสงสว่างภายนอกความสว่าง 300 ลักซ์(ซ้าย) และ 1000 ลักซ์(ขวา)



ภาพ 4-2 แนวลำแสงที่ความสว่าง 30 ลักซ์ ภายใต้แสงโทนสีขาว กล่องแสง(ซ้าย) เลเซอร์(ขวา)

i b908640

สำนักหอสมุด
25 มี.ค. 2559
1 QC
976
.L26
ท424ร
2558



ภาพ 4-3 แนวลำแสงเลเซอร์ภายใต้แสงโทนสีขาวที่ความสว่าง 300 ลักซ์(ซ้าย) 1000 ลักซ์(ขวา)

4.2 การใช้งานเลเซอร์กระจายลำแสงแบบเส้นในปฏิบัติการการสะท้อนและหักเหของแสง

จากผลความชัดเจนของลำแสงของเลเซอร์กระจายลำแสงแบบเส้นที่ชัดเจนกว่ากล่องแสงแบบหลอดไส้มาก จึงได้นำมาใช้เป็นต้นกำเนิดแสงในปฏิบัติการฟิสิกส์พื้นฐานของมหาวิทยาลัยนเรศวรใน 3 รายวิชาคือ 261101 ฟิสิกส์1 261103 ฟิสิกส์เบื้องต้น และ 261107 หลักฟิสิกส์1 เริ่มใช้งานตั้งแต่ภาคการศึกษาต้น ปีการศึกษา 2558 เป็นต้นไป ซึ่งมีนิสิตได้ใช้ประโยชน์เป็นจำนวนไม่ต่ำกว่า 2,000 คนต่อปีการศึกษา อีกทั้งยังนำไปใช้ในการจัดตั้งปฏิบัติการระดับโรงเรียนที่ใช้ในงานบริการวิชาการของภาควิชาฟิสิกส์ซึ่งมีนักเรียนได้ใช้ประโยชน์ไม่ต่ำกว่า 1,000 คนต่อปีการศึกษา ลักษณะของการนำไปใช้ในการออกแบบปฏิบัติการการสะท้อนของแสงดังแสดงในภาพ 4-4 ปฏิบัติการการหักเหของแสงดังแสดงในภาพ 4-5 และ ปฏิบัติการมุมวิกฤติและการสะท้อนกลับหมดดังแสดงในภาพ 4-6

การทดลอง

ตอน 1 กฎการสะท้อนของแสง

วิธีทดลอง

จัดเครื่องมืออุปกรณ์ดังรูปที่ 5 ใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นเลเซอร์กระจายลำแสงแบบเส้น (line laser) จัดให้อยู่ในแนวตั้งฉากกับแผ่นวงกลมบอกองศา และจัดวางแผ่นพื้นผิวสะท้อนบนแผ่นวงกลมบอกองศาอย่างระมัดระวังโดยให้รังสีตกกระทบตั้งฉากกับระนาบพื้นผิวสะท้อน ในแนวตำแหน่งที่ 0° จะพบว่ารังสีตกกระทบและรังสีสะท้อนจะอยู่ในแนวเดียวกัน หมุนแผ่นวงกลมองศาโดยให้มุมตกกระทบเปลี่ยนไปทีละ 10° จนถึง 80° แล้วบันทึกมุมสะท้อนที่สังเกตได้ในแต่ละครั้ง

รูปที่ 5 การจัดเครื่องมือทดลองเรื่องการสะท้อนของแสง

เส้นปกติ (normal line)	หมายถึง	เส้นที่ตั้งฉากกับพื้นผิวกระจกด้านที่มีแสงตกกระทบ
มุมตกกระทบ (θ_i)	หมายถึง	มุมที่รังสีตกกระทบกระทำกับเส้นปกติ
มุมสะท้อน (θ_r)	หมายถึง	มุมที่รังสีสะท้อนกระทำกับเส้นปกติ

ตารางบันทึกผลการทดลอง

มุมตกกระทบ (θ_i)	มุมสะท้อน (θ_r)
0°	0°
10°	
20°	
30°	
40°	
50°	
60°	
70°	
80°	

ภาพ 4-4 ตัวอย่างปฏิบัติการการสะท้อนของแสง

ตอน 2 กฎการหักเหของแสง

วิธีการทดลอง

จัดเครื่องมือดังรูปที่ 6 ให้รังสีของแสงผ่านแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นวงกลมองศา และวางผิวระนาบของเลนส์ทรงกระบอกในแนวที่ตั้งฉากกับแนวเส้นผ่าศูนย์กลางของแผ่นวงกลมองศา จุดศูนย์กลางของเลนส์และแผ่นวงกลมองศาอยู่ตำแหน่งเดียวกัน จะพบว่าเส้นแสดงองศาบนแผ่นวงกลมองศาจะอยู่ในแนวรัศมีของผิวด้านทรงกระบอกของเลนส์และตั้งฉากกับผิวของเลนส์ หมุนแผ่นวงกลมองศาเพื่อเปลี่ยนให้มุมตกกระทบเพิ่มขึ้นทีละ 10° จนกระทั่งถึง 80° บันทึกค่ามุมหักเหแต่ละครั้ง

รูปที่ 6 การจัดเครื่องมือทดลองเรื่องการหักเหของแสง

ตารางบันทึกผลการทดลอง

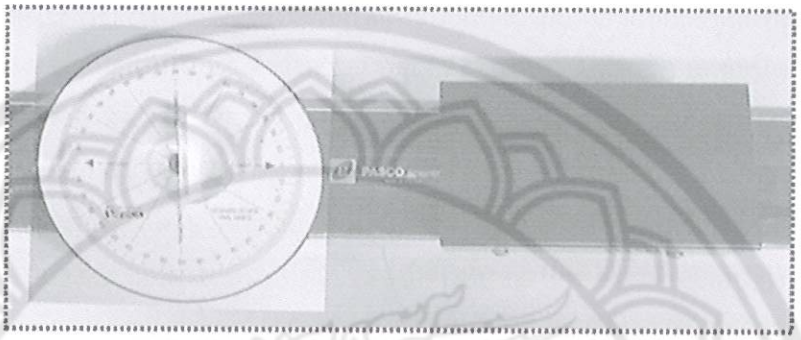
มุมตกกระทบ (θ_1)		มุมหักเห (θ_2)	
θ_1	$\sin\theta_1$	θ_2	$\sin\theta_2$
0°			
10°			
20°			
30°			
40°			
50°			
60°			
70°			
80°			

ภาพ 4-5 ตัวอย่างปฏิบัติการการหักเหของแสง

ตอน 3 มุมวิกฤตและการสะท้อนกลับหมด

วิธีการทดลอง

จัดเครื่องมือดังรูปที่ 7 ลักษณะคล้ายการทดลองในตอนที่ 2 โดยเปลี่ยนการวางเลนส์ทรงกระบอก **ให้ลำแสงตกกระทบทางด้านผิวโค้งของเลนส์และหักเหออกสู่อากาศด้านผิวเรียบของเลนส์ หมุนแผ่นวงกลมองศาเพื่อเปลี่ยนมุมตกกระทบเพิ่มขึ้นจนได้ค่ามุมวิกฤติ**



รูปที่ 7 การจัดเครื่องมือทดลองเรื่องมุมวิกฤตและการสะท้อนกลับหมด

ตารางบันทึกผลการทดลอง

ครั้งที่	มุมวิกฤติ (θ_c)	$\sin\theta_c$	$n = \frac{1}{\sin\theta_c}$
1			
2			
3			
ค่าดัชนีหักเหของเลนส์อะคริลิกเฉลี่ย			

ภาพ 4-6 ตัวอย่างปฏิบัติการมุมวิกฤติและการสะท้อนกลับหมด

บทที่ 5

สรุปผล

จากผลการศึกษาการใช้เลเซอร์กระจายลำแสงแบบเส้นเปรียบเทียบกับกล่องแสงที่ใช้หลอดไส้สำหรับใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงในปฏิบัติการการสะท้อนและหักเหของแสงพบว่า เลเซอร์ไดโอดขนาดเล็กกำลังไม่เกิน 5 มิลลิวัตต์ สามารถกระจายลำแสงแบบเส้นด้วยเลนส์โพเวลล์ ซึ่งได้ค่าความเข้มแสงที่สูงและอัตราการเปลี่ยนความเข้มแสงน้อยกว่าแสงจากกล่องแสงผ่านช่องสลิต ซึ่งในปฏิบัติการที่ใช้กล่องแสงเดิมต้องทำในห้องมืดหรือห้องที่มีความสว่างไม่เกิน 60 ลักซ์ แต่หากใช้ต้นกำเนิดแสงเป็นเลเซอร์กระจายลำแสงแบบเส้นสามารถทำได้แม้ขณะเปิดไฟในห้องปฏิบัติการหรือแม้กระทั่งภายนอกอาคาร ในบริเวณที่มีความสว่างมากถึง 700 ลักซ์สำหรับแสงโทนสีเหลืองและ 2000 ลักซ์สำหรับแสงโทนสีขาว จากผลที่ได้จากงานวิจัยนี้พบว่าเลเซอร์กระจายลำแสงแบบเส้นมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในปฏิบัติการการสะท้อนและหักเหของแสง รวมถึงในงานบริการวิชาการนอกสถานที่แก้ปัญหาเรื่องแสงรบกวนจากภายนอกได้เป็นอย่างดี และขณะนี้ได้นำผลงานวิจัยมาใช้ประดิษฐ์เป็นต้นกำเนิดแสงเพื่อใช้ในปฏิบัติการฟิสิกส์พื้นฐานของมหาวิทยาลัยนเรศวรใน 3 รายวิชาคือ 261101 ฟิสิกส์1 261103 ฟิสิกส์เบื้องต้น และ 261107 หลักฟิสิกส์1 เริ่มใช้งานตั้งแต่ภาคการศึกษาต้น ปีการศึกษา 2558 เป็นต้นไป ซึ่งมีนิสิตได้ใช้ประโยชน์เป็นจำนวนไม่ต่ำกว่า 2,000 คนต่อปีการศึกษา อีกทั้งยังนำไปใช้ในการจัดตั้งปฏิบัติการระดับโรงเรียนที่ใช้ในงานบริการวิชาการของภาควิชาฟิสิกส์ซึ่งมีนักเรียนได้ใช้ประโยชน์ไม่ต่ำกว่า 1,000 คนต่อปีการศึกษา

บรรณานุกรม

[1] คณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ (2554). คู่มือปฏิบัติการฟิสิกส์ รายวิชา 261101 ปฏิบัติการฟิสิกส์1. มหาวิทยาลัยนเรศวร ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ พิษณุโลก.

[2] คณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ (2554). คู่มือปฏิบัติการฟิสิกส์ รายวิชา 261103 ปฏิบัติการฟิสิกส์เบื้องต้น. มหาวิทยาลัยนเรศวร ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ พิษณุโลก.

[3] คณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ (2554). คู่มือปฏิบัติการฟิสิกส์ รายวิชา261108 หลักฟิสิกส์ 1. มหาวิทยาลัยนเรศวร ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ พิษณุโลก.

[4] วีกีพีเดีย (ออนไลน์). http://th.wikipedia.org/wiki/เลเซอร์. 10 ตุลาคม 2556.

[5] กระทรวงศึกษาธิการ (2551). หลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช 2551.

[6] สำนักวิชาการและมาตรฐานการศึกษา สำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน (2551). ตัวชี้วัดและสาระการเรียนรู้แกนกลาง กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช 2551. กระทรวงศึกษาธิการ

[7] wikipedia (online). http://en.wikipedia.org/wiki/Line_laser. 10 ตุลาคม 2556.

[8] Gerald F. Marshall *Handbook of Optical and Laser Scanning*, Marcel Dekker, Inc., 2004.

[9] Simon Winkelbach, Sven Molkenstruck, and Friedrich M. Wahl, *Low-Cost Laser Range Scanner and Fast Surface Registration Approach*, Pattern Recognition, DAGM. 2006.

[10] สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. **ธรรมชาติของแสง**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/viewbulletin/1090-?groupid=241.

[11] วิกิพีเดีย. **คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://th.wikipedia.org/wiki/คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.

[12] ascensionwarrior. **Electromagnetic waves and Consciousness.** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://uniteunderfreedom.com/?p=1003.

[13] Tutorvista. **Dispersion of White Light.** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก http://www.tutorvista.com/physics/dispersion-of-white-light.

[14] สำนักเทคโนโลยีเพื่อการเรียนการสอน สำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน. **แสงและสเปกตรัม**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.obeclms.com/lesson/12_Light/content02.html.

[15] PhotovoltaicLightingGroup. **VISIBLE LIGHT.** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก http://www.solarlightaustralia.com.au/2013/02/20/visible-light.