

รายงานฉบับสมบูรณ์

ชื่อเรื่อง การศึกษาก๊าซไอโอดีนกระตุ้นด้วยเลเซอร์พอยเตอร์สีเขียว

ชื่อเรื่อง Studies of iodine vapor excited with a green laser pointer

รหัสโครงการ

SCH-NR-2010-21-02

ชื่อหัวหน้าโครงการ

ผศ.ดร.อมรินทร์ รัตนะวิศ

หน่วยงานที่สังกัด

ภาควิชาฟิสิกส์อุตสาหกรรมและอุปกรณ์การแพทย์
คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถนนพิบูลสงคราม แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

(ปกใน)

รายงานฉบับสมบูรณ์

ชื่อเรื่อง การศึกษาก๊าซไอโอดีนกระตุ้นด้วยเลเซอร์พอยเตอร์สีเขียว

ชื่อเรื่อง Studies of iodine vapor excited with a green laser pointer

รายนามคณะผู้วิจัย

ผศ.ดร.อมรินทร์ รัตนะวิศ

วันเริ่มต้นโครงการ

วันสิ้นสุดโครงการ.....31 ตุลาคม 2556.....

(..... / ตรวจสอบเนื้อหาแล้ว)

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก
ศูนย์ประสานงานนักเรียนทุนรัฐบาลทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
และสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

ขอขอบคุณ

ดร.มลฤดี เรณูสวัสดิ์และคณะวิจัย ห้องปฏิบัติการความยาวคลื่น
ฝ่ายมาตรวิทยามิติ, สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ที่เอื้อเพื่อสถานที่ทำวิจัย
รวมถึงอุปกรณ์และเครื่องมือที่เกี่ยวข้อง

ปี พ.ศ. ที่ได้รับทุน 2553

ชื่อเรื่อง การศึกษาก๊าซไอโอดีนกระตุ้นด้วยเลเซอร์พอยเตอร์สีเขียว

ผู้วิจัย ผศ.ดร.อมรินทร์ รัตนะวิศ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการศึกษาก๊าซไอโอดีนเมื่อถูกกระตุ้นด้วยเลเซอร์สีเขียวที่มีความยาวคลื่น 532 nm ทำให้เกิดสภาวะเรืองแสงและเกิดเลเซอร์แบบไม่มีกระจกสะท้อน

การเกิดสภาวะเรืองแสงสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายและสามารถใช้เลเซอร์พอยเตอร์ที่มีกำลังต่ำในการกระตุ้น การวัดสเปกตรัมของการเรืองแสงของก๊าซไอโอดีนในช่วงการมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า พบว่าเกิดเส้นสเปกตรัมนับสิบเส้นสเปกตรัม และผลการทดลองดังกล่าวจะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการสอบเทียบเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ต่อไปในอนาคตได้

ทั้งนี้งานวิจัยยังได้มุ่งประเด็นในการศึกษาสภาวะการเกิดเลเซอร์แบบไม่มีกระจกสะท้อนของก๊าซไอโอดีน โดยการใช้เลเซอร์สีเขียวแบบลำแสงต่อเนื่องที่มีความเสถียรสูงและมีกำลังอยู่ในช่วงระหว่าง 10-70 mW เป็นแหล่งพลังงานกระตุ้น ซึ่งพบว่ากำลังขีดเริ่มการเกิดเลเซอร์อยู่ที่ 10 mW ซึ่งถือว่าเป็นกำลังที่น้อยมากและเป็นการค้นพบที่สำคัญที่จะสามารถขึ้นำการใช้ก๊าซไอโอดีนเป็นสารเลเซอร์ในหลักการรวมแสงต่อไป นอกจากนี้กำลังขีดเริ่มที่มีค่าน้อยมากแล้ว เลเซอร์ที่ได้ศึกษาจากงานวิจัยนี้อาจกลายเป็นแหล่งพลังงานกระตุ้นในอนาคตเนื่องด้วยความง่ายในการสร้างและมีเส้นสเปกตรัมของการเกิดเลเซอร์ที่หลากหลาย

Project title: Studies of iodine vapor excited with a green laser pointer

Researcher: Asst. Prof. Dr. Amarin Ratanavis

Abstract

This research study aims to explore an optically pumped iodine vapor using green lasers with wavelength 532 nm in the aspect of the fluorescence and mirrorless laser emissions.

The fluorescence emission in the visible region was observed with a low power laser pointer. Several spectral lines were recorded with a USB spectrometer. The obtained spectral emission can be served as the references for spectrometer calibrations.

Furthermore, this research explores the mirrorless lasing behavior of the iodine vapor pumped by high power green laser in the range between 10 mW and 70 mW. The power threshold of 10 mW was achieved suggesting the promising candidate for the optical beam combiner technology. With simplicity and spectra richness, iodine vapor has an optimistic future to be used as the pumping source for various applications.

สารบัญเรื่อง

	หน้าที่
1. บทนำ	10
2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	10
3. การทบทวนวรรณกรรม	10
4. การออกแบบการวิจัย	11
5. ขอบเขตของการวิจัย	11
6. ระเบียบวิธีวิจัย	
6.1 การเรียงแสงของก๊าซไอโอดีนกระตุ้นด้วยเลเซอร์พอยเตอร์	12
6.2 การทดสอบการเกิดเลเซอร์แบบไม่มีกระจกสะท้อนของก๊าซไอโอดีน กระตุ้นโดยเลเซอร์สีเขียว	14
7. ผลการวิจัย	
7.1 ผลการวัดการเรียงแสงของก๊าซไอโอดีนกระตุ้นด้วยเลเซอร์พอยเตอร์	16
7.2 ผลการเรียงแสงของก๊าซไอโอดีนกระตุ้นโดยเลเซอร์พอยเตอร์	19
7.3 ผลการทดลองการสร้างระบบเลเซอร์	22
8. สรุปผล	25
9. ปัญหาและอุปสรรค	27
10. บรรณานุกรม	28
11. ภาคผนวก	
ก. ประวัติคณะผู้วิจัย	29
ข. การโฟกัสลำแสงเลเซอร์	30
ค. ผลงานการเผยแพร่	34

สารบัญรูปภาพ

หน้าที่

ภาพที่ 1	สเปกโตรมิเตอร์ใช้ในการวัดความยาวคลื่นของเลเซอร์พอยเตอร์สีเขียว	12
ภาพที่ 2	การตอบสนองของสเปกโตรมิเตอร์ใช้ในการวัดความยาวคลื่น	13
ภาพที่ 3	การทดลองวัดความยาวคลื่นของเลเซอร์พอยเตอร์สีเขียว	13
ภาพที่ 4	การทดลองวัดความยาวคลื่นของเลเซอร์พอยเตอร์สีเขียว	14
ภาพที่ 5	การออกแบบการสร้างเลเซอร์สีเขียวกำลังสูง	15
ภาพที่ 6	ระบบเลเซอร์สีเขียวขนาด 400 mW ที่ประกอบสร้างขึ้น	15
ภาพที่ 7	เลเซอร์ไอโอดีนกระตุ้นโดยเลเซอร์สีเขียวกำลังสูง	16
ภาพที่ 8	ผลการทดลองการวัดสเปกตรัมของเลเซอร์พอยเตอร์สีแดง	17
ภาพที่ 9	ผลการทดลองการวัดสเปกตรัมของเลเซอร์พอยเตอร์สีเขียว	17
ภาพที่ 10	การมองเห็นของมนุษย์ที่ความยาวคลื่นต่างๆ	18
ภาพที่ 11	องค์ประกอบภายในของเลเซอร์พอยเตอร์สีเขียว	18
ภาพที่ 12	การเรืองแสงของก๊าซไอโอดีนซึ่งถูกกระตุ้นโดยเลเซอร์พอยเตอร์	19
ภาพที่ 13	เส้นสเปกตรัมของการเรืองแสงของก๊าซไอโอดีน	20
ภาพที่ 14	ค่าคงที่ Frank-Condon ของก๊าซไอโอดีน ของเส้นสเปกตรัม R56 (32-v'')	20
ภาพที่ 15	การทดลองการเกิดลำแสงเลเซอร์แบบไม่มีกระจกสะท้อน	22
ภาพที่ 16	การเกิดเลเซอร์แบบไม่มีกระจกสะท้อนของก๊าซไอโอดีน	23
ภาพที่ 17	สเปกตรัมของเลเซอร์ชนิดก๊าซไอโอดีนแบบไม่มีกระจกสะท้อน	23
ภาพที่ 18	การส่งผ่านแสงของระบบ Filter	25
ภาพที่ 19	ผลการวัดกำลังขีดเริ่มของเลเซอร์ชนิดก๊าซไอโอดีนแบบไม่มีกระจกสะท้อน	25

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้าที่

ภาพที่ 20 การโฟกัสลำแสงเลเซอร์

30

ภาพที่ 21 ขนาดลำแสงโฟกัสที่ความยาวโฟกัสของเลนส์ต่างๆ

34

สารบัญตาราง

หน้าที่

ตารางที่ 1 ค่าความยาวคลื่นของการเรืองแสงของก๊าซไอโอดีนในเส้นสเปกตรัม

R56 (32-v'')

21

1. บทนำ

ประเทศไทยอยู่สภาวะการเจริญเติบโตทั้งทางด้านเศรษฐกิจและสังคม การพัฒนาทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในปัจจุบันจึงเป็นสิ่งที่ต้องเกิดขึ้นควบคู่กันอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ซึ่งการพัฒนาทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนั้นควรเริ่มตั้งแต่เยาวชน ซึ่งจะเป็นกำลังหลักของประเทศในวันข้างหน้า การสร้างแรงบันดาลใจในวิทยาศาสตร์ จะสามารถโน้มน้าวเยาวชนให้สนใจและเข้าใจต่อวิทยาศาสตร์ การสร้างแรงบันดาลใจนั้นสามารถทำได้โดยการใช้การทดลองที่แปลกใหม่และน่าประหลาดใจ ทว่าการสอนวิทยาศาสตร์ในปัจจุบันยังขาดเครื่องมือการทดลองเหล่านี้ ในงานวิจัยนี้จะเป็นส่วนหนึ่งที่จะสร้างและพัฒนาชุดการทดลองที่อธิบายการดูดกลืนและการเรืองแสง รวมถึงการสร้างระบบเลเซอร์อย่างง่าย ๆ โดยใช้แสงเลเซอร์กระตุ้นที่ทำได้ง่ายและมีราคาถูกในประเทศไทย นั่นคือเลเซอร์พอยเตอร์สีเขียว โดยอาศัยก๊าซไอโอดีน เป็นสารเรืองแสงและเป็นสารเลเซอร์ ซึ่งผลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะประโยชน์อย่างยิ่งต่อการนำไปใช้อย่างแพร่หลายในสถานศึกษาต่างๆ

เลเซอร์เป็นคำตอบที่มองหาปัญหา “Laser is a solution in search of a problem [1]” เป็นคำนิยามของเลเซอร์ ตั้งแต่ครั้งแรกที่เลเซอร์ได้ถูกประดิษฐ์ขึ้นในโลก และในปัจจุบันแม้เลเซอร์จะเกิดขึ้นในโลกกว่า 50 ปี เลเซอร์ก็ยังคงเป็นคำตอบที่ยังมองหาปัญหาต่างๆ นอกจากงานวิจัยนี้จะมีประโยชน์ในแง่ของการเป็นชุดทดลองดังกล่าวมาแล้วเบื้องต้น งานวิจัยนี้ได้ศึกษาศักยภาพการเป็นสารเลเซอร์ของก๊าซไอโอดีน ซึ่งจะเกิดประโยชน์ในพัฒนาระบบเลเซอร์ชนิดก๊าซในประเทศต่อไป

หมายเหตุ

วัตถุประสงค์, การออกแบบการวิจัยและขอบเขตการวิจัยได้มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากภายหลังจากการทำการทดลองพบว่าข้อจำกัดของเลเซอร์พอยเตอร์ในเรื่องความเสถียรของกำลังเลเซอร์ที่ไม่คงที่ ซึ่งเป็นผลมาจากความร้อนในเลเซอร์แควิตี้ของเลเซอร์พอยเตอร์ รวมถึงกำลังเลเซอร์ของเลเซอร์พอยเตอร์ทั่วไปไม่อยู่ในระดับที่ทำให้เกิดเลเซอร์ได้ โครงการวิจัยนี้จึงได้เปลี่ยนแหล่งพลังงานกระตุ้นจากเลเซอร์พอยเตอร์สีเขียว มาเป็นเลเซอร์สีเขียวซึ่งมีกำลังงานในระดับ 100 mW และต่อมาสามารถสร้างระบบเลเซอร์ไอโอดีนแบบไม่มีกระจกสะท้อน (Mirrorless laser) ได้

2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อสร้างชุดการทดลองการเรืองแสง โดยใช้ก๊าซไอโอดีนกระตุ้นด้วยเลเซอร์พอยเตอร์สีเขียว
2. เพื่อสร้างระบบเลเซอร์ไอโอดีนกระตุ้นด้วยเลเซอร์สีเขียว

3. การทบทวนวรรณกรรม งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ผลงานที่มีผู้ศึกษามาก่อน

ก๊าซไอโอดีนได้ถูกใช้เป็นส่วนตัวอย่างในการศึกษาการดูดกลืนของแสงรวมถึงการเรืองแสง ให้ห้องทดลองเบื้องต้นของวิชาเคมีเชิงฟิสิกส์[2] ด้วยก๊าซไอโอดีนนั้นสามารถดูดกลืนแสงสีเขียวในความยาวคลื่น 532 nm ได้เป็นอย่างดี ดังนั้นก๊าซไอโอดีนยังถูกนำไปใช้ในการควบคุมความเสถียร

ของ Nd:YAG เลเซอร์[3] จากการทดลองการเรืองแสงก๊าซไอโอดีนสามารถให้แสงสีแดง เมื่อถูกกระตุ้นด้วยด้วยเลเซอร์พอยเตอร์สีเขียว[4] หากแต่ว่าการทดลองฟลูออเรสเซนซ์นั้น มีค่านึงถึงการพัฒนาไปสู่การระบบเลเซอร์ ซึ่งจำเป็นต้องศึกษาถึงสถานะที่จำเป็นและเหมาะสมต่อการเกิดเลเซอร์ ซึ่งได้แก่ ความดันและอุณหภูมิของก๊าซไอโอดีน รวมถึงการออกแบบระบบทางแสงที่เอื้ออำนวยต่อการเกิดเลเซอร์

แนวคิดของการใช้ก๊าซเป็นสารรวมแสง (beam combiner) นั้นได้รับความสนใจอย่างยิ่งในปัจจุบัน[5] เนื่องจากเทคโนโลยีของเลเซอร์ได้พัฒนาเป็นอย่างมาก และเลเซอร์ชนิดต่างๆมีราคาถูกและหาได้ตามท้องตลาด โดยเฉพาะเลเซอร์ของแข็งและเลเซอร์ไดโอด แต่เลเซอร์เหล่านี้มีข้อจำกัดเมื่อถูกใช้ในกำลังงานสูง ซึ่งจะแตกต่างจากการใช้ก๊าซเป็นสารเลเซอร์ซึ่งจะไม่มีปัญหาทั้งด้านกำลังและอุณหภูมิ [6] การใช้ก๊าซเป็นสารรวมแสงจึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการสร้างเลเซอร์กำลังงานสูง แต่หาว่าการหาก๊าซที่เสถียรและดูดกลืนเลเซอร์ที่มีอยู่ในท้องตลาดเป็นสิ่งที่ท้าทาย ก๊าซไอโอดีนเป็นก๊าซที่ดูดกลืนแสงสีเขียวของ Second harmonic Nd:YAG laser และสามารถให้แสงเลเซอร์ในช่วงความถี่ต่างๆในช่วงมองเห็นได้ รวมถึงในย่านอินฟราเรด [7] ในปัจจุบันหลักการของ Second harmonic Nd:YAG laser ได้ถูกนำมาใช้ในเลเซอร์พอยเตอร์สีเขียวและเลเซอร์กำลังต่ำสีเขียว ซึ่งเป็นเลเซอร์ที่หาซื้อได้ง่ายในปัจจุบัน ดังนั้นการศึกษานี้สามารถระบุได้ว่าก๊าซไอโอดีนมีความเหมาะสมสามารถเป็นก๊าซที่เข้าข่ายนำไปประยุกต์ใช้ในงานรวมแสงเลเซอร์ได้หรือไม่ โดยเลเซอร์พอยเตอร์สีเขียวและเลเซอร์สีเขียวเป็นแหล่งพลังงานกระตุ้น

นอกจากนี้เลเซอร์พอยเตอร์สีเขียวและเลเซอร์สีเขียวกำลังต่ำ จะกลายเป็นเครื่องมือใหม่ในทางวิทยาศาสตร์ในการศึกษาก๊าซอะตอมคู่ (ก๊าซไอโอดีน) ในวิชาเคมีหรือฟิสิกส์ควอนตัม, การเรืองแสง และการเกิดเลเซอร์ในประเทศไทยต่อไปได้

4. การออกแบบการวิจัย

1. ศึกษาการดูดกลืนและการเรืองแสงของก๊าซไอโอดีนต่อเลเซอร์สีเขียวที่อุณหภูมิห้อง
2. วัดการเรืองแสงของก๊าซไอโอดีนเมื่อกระตุ้นด้วยเลเซอร์พอยเตอร์สีเขียว
3. ออกแบบระบบเลเซอร์ไอโอดีนแบบไม่มีกระจกสะท้อน (Mirrorless laser)
4. การวัดสเปกตรัมและกำลังขีดเริ่มของเลเซอร์ไอโอดีนแบบไม่มีกระจกสะท้อน

5. ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาการเรืองแสงของก๊าซไอโอดีน โดยเน้นนำผลการศึกษาในด้านสเปกตรัมการเรืองแสง ไปต่อยอดใช้ความยาวคลื่นของก๊าซไอโอดีนเป็นตัวแปรสอบเทียบกับสเปกโตรมิเตอร์ได้

2. ศึกษาการเกิดเลเซอร์ของก๊าซไอโอดีนแบบไม่มีกระจกสะท้อนเมื่อกระตุ้นด้วยเลเซอร์สีเขียว เพื่อหาค่ากำลังขีดเริ่มการเกิดเลเซอร์ซึ่งสามารถบ่งชี้การเป็นสารรวมแสงในอนาคตได้

6. ระเบียบวิธีวิจัย ระบุ ทฤษฎี กรอบแนวคิดที่นำมาใช้ในการวิจัย ขั้นตอนวิธีการวิจัย โดยละเอียด อุปกรณ์ เครื่องมือ และเทคโนโลยีที่นำมาใช้ในการวิจัย

ก๊าซไอโอดีนสามารถดูดกลืนแสงสีเขียวที่มีความยาวคลื่น 532 nm โดยจากชั้นพลังงานอิเล็กทรอนิกส์ $X^1\Sigma^+_g \rightarrow B^3\Pi^+_{ou}$ และสามารถเรืองแสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 600 nm โดยจากชั้นพลังงานอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกกระตุ้น B ไปสู่ชั้น vibrational states ของชั้น X [7]

การศึกษาการกระตุ้นก๊าซไอโอดีนในโครงการวิจัยนี้ได้ตีกรอบการศึกษาเป็นสองแนวทางคือ การกระตุ้นก๊าซไอโอดีนเพื่อให้เกิดการเรืองแสงซึ่งสามารถทำได้โดยใช้เลเซอร์พอยเตอร์ที่มีลำแสงสีเขียว ซึ่งในปัจจุบันมีจำหน่ายตามท้องตลาด และการกระตุ้นก๊าซไอโอดีนเพื่อให้เกิดเลเซอร์ในแบบไม่มีกระจกสะท้อน โดยในกรณีนี้ไม่สามารถใช้เลเซอร์พอยเตอร์ทั่วไปได้ เนื่องจากการเกิดเลเซอร์นั้นจำเป็นต้องใช้กำลังเลเซอร์สีเขียวที่มีค่าสูงกว่าเลเซอร์พอยเตอร์ นอกจากข้อจำกัดของเลเซอร์พอยเตอร์ในเรื่องกำลังแสงเลเซอร์ที่มีค่าต่ำแล้ว เลเซอร์พอยเตอร์ยังมีข้อด้อยในเรื่องของความเสถียรของกำลังเลเซอร์ เนื่องจากเลเซอร์พอยเตอร์ไม่ได้มีวัตถุประสงค์ในการทำงานอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน ดังนั้นการทดลองการเกิดเลเซอร์แบบไม่มีกระจกสะท้อนจำเป็นต้องใช้เลเซอร์สีเขียวที่มีกำลังสูงในระดับ 100 mW

ด้วยเหตุดังกล่าวระเบียบวิธีวิจัยของโครงการวิจัยนี้ จึงแบ่งออกเป็นสองกรณี โดยสรุปคือการเกิดการเรืองแสงและเลเซอร์แบบไม่มีกระจกสะท้อน

6.1 การเรืองแสงของก๊าซไอโอดีนกระตุ้นด้วยเลเซอร์พอยเตอร์

6.1.1 การวัดความยาวคลื่นของเลเซอร์พอยเตอร์สีเขียว

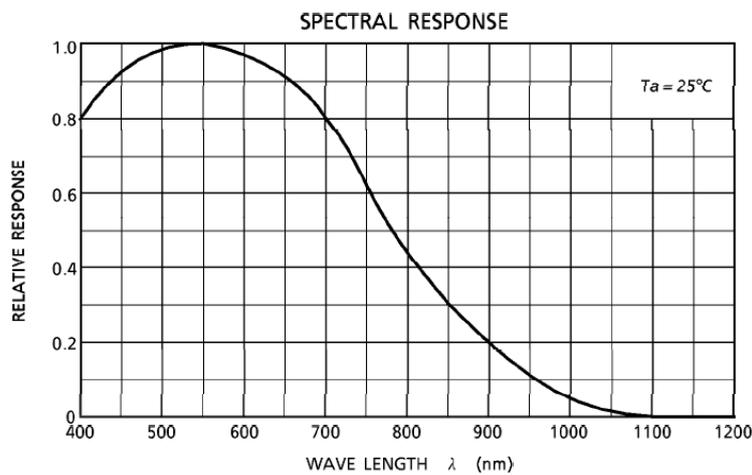
ขั้นตอนแรกที่ได้ดำเนินการในโครงการวิจัย คือการวัดสเปกตรัมในย่านมองเห็นได้ของเลเซอร์พอยเตอร์สีเขียวสีเขียว โดยใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ SM442 compact CCD spectrometer



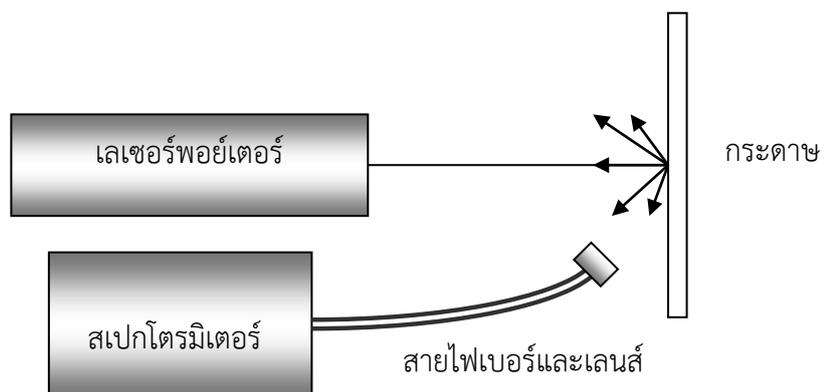
ภาพที่ 1 สเปกโตรมิเตอร์ใช้ในการวัดความยาวคลื่นของเลเซอร์พอยเตอร์สีเขียว

เครื่องสเปกโตรมิเตอร์นี้มีการตอบสนองในย่านการตอบสนองในช่วง 400-1100 nm ดังภาพที่ 2 ซึ่งชี้ชัดว่าโดยสเปกโตรมิเตอร์นี้จะสามารถวัดความยาวคลื่นสีเขียวของเลเซอร์พอยเตอร์ซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ที่ 532 nm ได้เป็นอย่างดี

การจัดวางการทดลองแสดงได้ดังภาพที่ 3 โดยสเปกโตรมิเตอร์จะเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ซึ่งแสดงผลจากการวัดความยาวคลื่น การนำเลเซอร์พอยเตอร์ยิงไปที่จุดรับแสงซึ่งเป็นใยแก้วนำแสง โดยตรงนั้นเป็นสิ่งที่ไม่ควรกระทำ เนื่องจากสเปกโตรมิเตอร์มีความตอบสนองสูงต่อแสงสีเขียวและอาจเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นแสงเลเซอร์ได้ถูกนำไปยิงใส่กระดาษและแสงบางส่วนที่กระเจิงจากกระดาษ จะตกกระทบไปที่สายใยแก้วนำแสงของสเปกโตรมิเตอร์ คอมพิวเตอร์จะทำการเก็บและประมวลผลแสดงความยาวคลื่นที่ได้รับจากเลเซอร์พอยเตอร์ ถึงแม้ว่าเป้าหมายของโครงการวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการนำเลเซอร์พอยเตอร์สีเขียวไปใช้ประโยชน์ การทดลองการวัดสเปกตรัมนี้ยังรวมถึงการวัดสเปกตรัมของเลเซอร์พอยเตอร์สีแดงซึ่งมีจำหน่ายอยู่อย่างแพร่หลายเช่นกัน



ภาพที่ 2 การตอบสนองของสเปกโตรมิเตอร์ใช้ในการวัดความยาวคลื่นของเลเซอร์พอยเตอร์สีเขียว

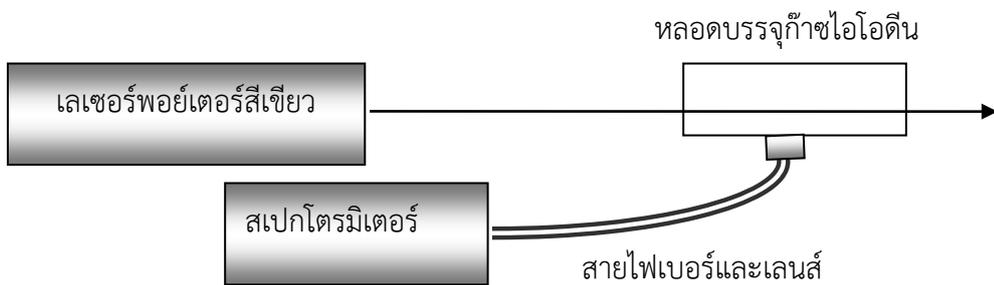


ภาพที่ 3 การทดลองวัดความยาวคลื่นของเลเซอร์พอยเตอร์สีเขียว

6.1.2. การทดสอบเบื้องต้นการเรืองแสงของก๊าซไอโอดีนกระตุ้นโดยเลเซอร์พอยเตอร์สีเขียว

หลังจากการวัดแสงเลเซอร์พอยเตอร์สีเขียวและสีแดงแล้ว ผลการทดลอง (หัวข้อ 7.2.1) สามารถนำไปสอบเทียบกับสเปกโตรมิเตอร์เพื่อประโยชน์ในการอ้างอิงความเที่ยงตรงของความยาวคลื่น การทดลองขั้นถัดไปคือการวัดการเรืองแสงของก๊าซไอโอดีนเมื่อถูกกระตุ้นด้วยเลเซอร์สีเขียว การจัดวางการทดลองแสดงได้ดังภาพที่ 4

เลเซอร์พอยเตอร์สีเขียวซึ่งมีกำลังแสงเลเซอร์ประมาณ 3 mW ได้ถูกยิงส่งเข้าผ่านโดยตรงหลอดบรรจุก๊าซไอโอดีนที่มีขนาดความยาว 10 cm และการวัดการเรืองแสงได้ทำการวัดการเรืองแสงทางด้านข้าง เพื่อหลีกเลี่ยงแสงเลเซอร์สีเขียวที่เข้ากระตุ้น ด้วยเหตุที่แสงเลเซอร์สีเขียวที่กระตุ้นก๊าซไอโอดีนนั้นจะมีความเข้มมากกว่าการเรืองแสงมาก



ภาพที่ 4 การทดลองวัดความยาวคลื่นของเลเซอร์พอยเตอร์สีเขียว

6.2 การทดสอบการเกิดเลเซอร์แบบไม่มีกระจกสะท้อนของก๊าซไอโอดีนกระตุ้นโดยเลเซอร์สีเขียว

เลเซอร์พอยเตอร์สีเขียวทั่วไป มีแสงสีเขียวจริงอยู่ประมาณ 1-5 mW (ฉลากบอกกำลังของเลเซอร์พอยเตอร์ตามท้องตลาดอาจมีค่าสูง 100 mW ซึ่งอาจเป็นกรณีที่ทำการวัดลำแสงอินฟราเรดรวมอยู่ด้วย, กรุณาพิจารณาผลการทดลองในหัวข้อ 7.1) ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะทำให้เกิดสถานะเลเซอร์ขึ้นได้

ขั้นตอนการทำงานวิจัยในขั้นต่อไปคือการสร้างเลเซอร์ไอโอดีน โดยใช้เลเซอร์สีเขียวในการกระตุ้น โดยนักวิจัยได้สังเกตเห็นถึงความสำคัญในการสร้างองค์ความรู้ในการพัฒนาเลเซอร์ของแข็งที่กระตุ้นด้วยเลเซอร์ไดโอดที่ความยาวคลื่น 808 nm ร่วมกับการสร้างเลเซอร์ชนิดก๊าซไอโอดีน จึงได้พยายามการสร้างเลเซอร์สีเขียวกำลังสูงในระดับ 100 mW โดยเลเซอร์สีเขียวกำลังสูงที่ได้สร้างขึ้นในโครงการวิจัยนี้แสดงได้ดังภาพที่ 5 โดยมีองค์ประกอบคือ

1. เลเซอร์ไดโอดกำลังสูง ที่ความยาวคลื่น 808 nm
2. เลเซอร์ชนิดนีโอดีเมียมแยก ที่ความยาวคลื่น 1064 nm
3. ผลึก KTP สำหรับการเปลี่ยนความยาวคลื่นจาก 1064 nm ไปสู่ความยาวคลื่น 532 nm

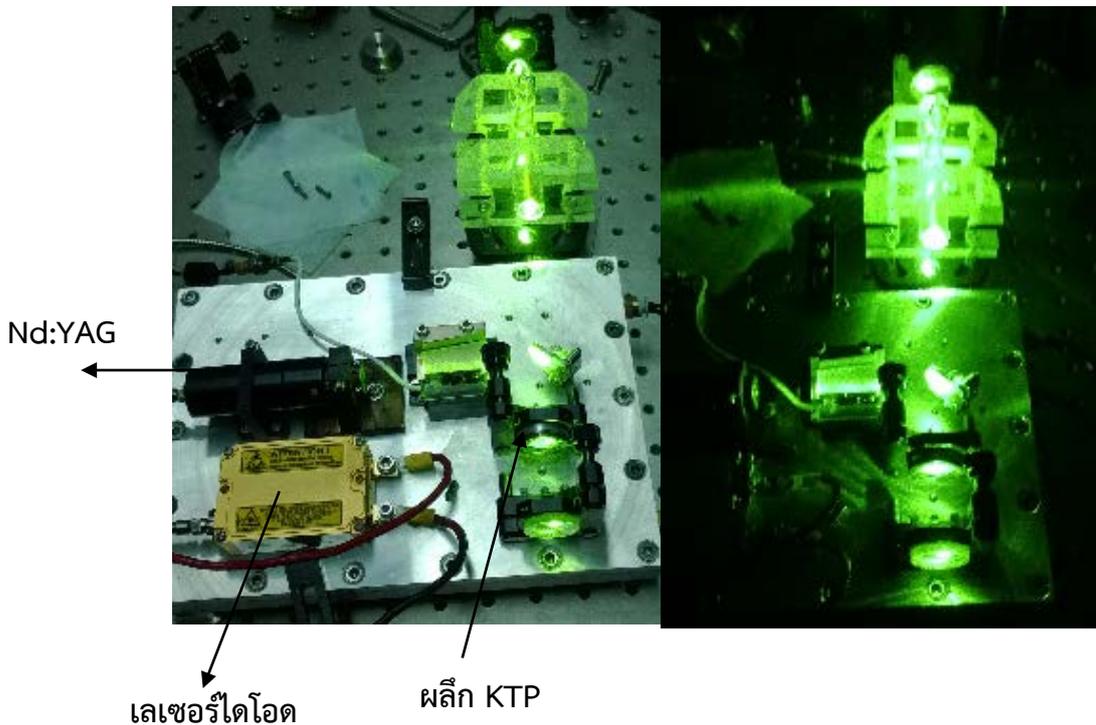
หลักการเกิดแสงเลเซอร์สีเขียวที่ความยาวคลื่น 532 nm สามารถอธิบายอย่างง่ายก็คือ เลเซอร์ไดโอดกำลังสูงที่มีกำลังประมาณ 20 W ถูกส่งเข้ากระตุ้นเลเซอร์ชนิดนีโอดีเมียมแยกทำให้เกิดความยาวคลื่นที่ 1064 nm หลังจากนั้นแสงที่ความยาวคลื่นนี้ได้ถูกส่งผ่านผลึก KTP และด้วยกระบวนการทัศนศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นชนิดฮาร์โมนิกที่สอง ทำให้เกิดแสงเลเซอร์สีเขียวที่ความยาวคลื่น 532 nm



ภาพที่ 5 การออกแบบการสร้างเลเซอร์สีเขียวกำลังสูง

การสร้างระบบเลเซอร์สีเขียวกำลังสูง เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยที่จำเป็นต้องใช้งบประมาณที่สูงกว่างบประมาณของโครงการวิจัย เพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยจึงได้ใช้ระบบเลเซอร์ไดโอดที่ได้รับบริจาคจากโรงพยาบาลจังหวัดนครปฐมและเลเซอร์ชนิดนีโอดีเมียมแย็ก รวมถึงผลึก KTP จากชุดทดลองเลเซอร์ ของภาควิชาฟิสิกส์อุตสาหกรรมและอุปกรณ์การแพทย์เข้าร่วมประกอบการสร้างเลเซอร์สีเขียว ทั้งนี้งบประมาณของโครงการวิจัยนี้ได้นำไปใช้กับอุปกรณ์ทางทัศนศาสตร์ อาทิเช่น เลนส์, กระจก, แผ่นกรองแสง (Filter) และที่ยึดจับอุปกรณ์ทัศนศาสตร์

โดยระบบเลเซอร์สีเขียวที่สร้างเสร็จแล้วแสดงได้ดังภาพที่ 6 กำลังของเลเซอร์สีเขียวนี้สามารถวัดได้ถึง 400 mW

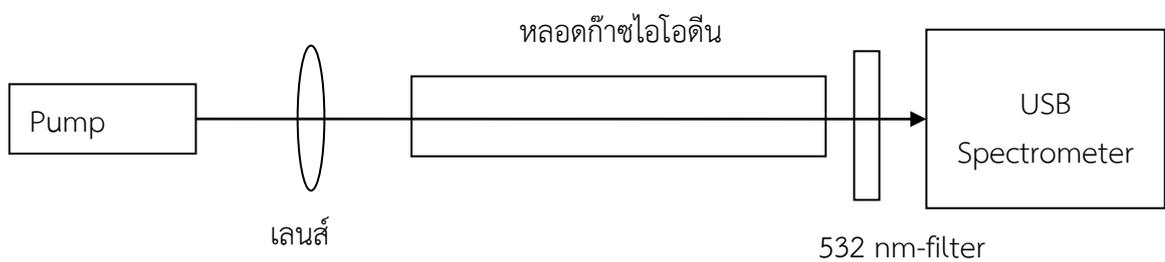


ภาพที่ 6 ระบบเลเซอร์สีเขียวขนาด 400 mW ที่ประกอบสร้างขึ้น (ทางซ้ายมือ: การทดลองเบื้องต้น และ ทางขวามือ: การทดลองในขณะห้องมือ)

แต่ทว่าจากการทดสอบการเรืองแสงของก๊าซไอโอดีนเบื้องต้นพบว่าความเสถียรเชิงความยาวคลื่นของเลเซอร์สีเขียวที่ประกอบขึ้นเองนั้น ยังไม่สามารถอยู่ในระดับการใช้งานในการกระตุ้นก๊าซไอโอดีนให้เกิดสถานะเลเซอร์ได้ (สังเกตได้จากการกระพริบของการเรืองแสงของก๊าซไอโอดีน) หากยังจำเป็นต้องมีการเพิ่มระบบควบคุมการเสถียรของเลเซอร์ ซึ่งการทำเช่นนั้นจะทำให้เกินขอบเขตและงบประมาณของการวิจัย

ด้วยความอนุเคราะห์จาก ดร.มลฤดี เรณูสวัสดิ์และคณะวิจัย, ห้องปฏิบัติการความยาวคลื่นฝ่ายมาตรวิทยามิติ, สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ เป็นผู้ซึ่งได้ให้ความเอื้อเฟื้อในการใช้สถานที่และระบบเลเซอร์ที่มีความเสถียรสูง ในการดำเนินงานวิจัยต่อไป

ดังนั้นขั้นตอนการสร้างเลเซอร์ไอโอดีน (แบบไม่มีกระจกสะท้อน) กระตุ้นโดยเลเซอร์สีเขียว ได้ดำเนินการที่สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ซึ่งการทดลองนั้นแสดงได้ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 เลเซอร์ไอโอดีนกระตุ้นโดยเลเซอร์สีเขียวกำลังสูง

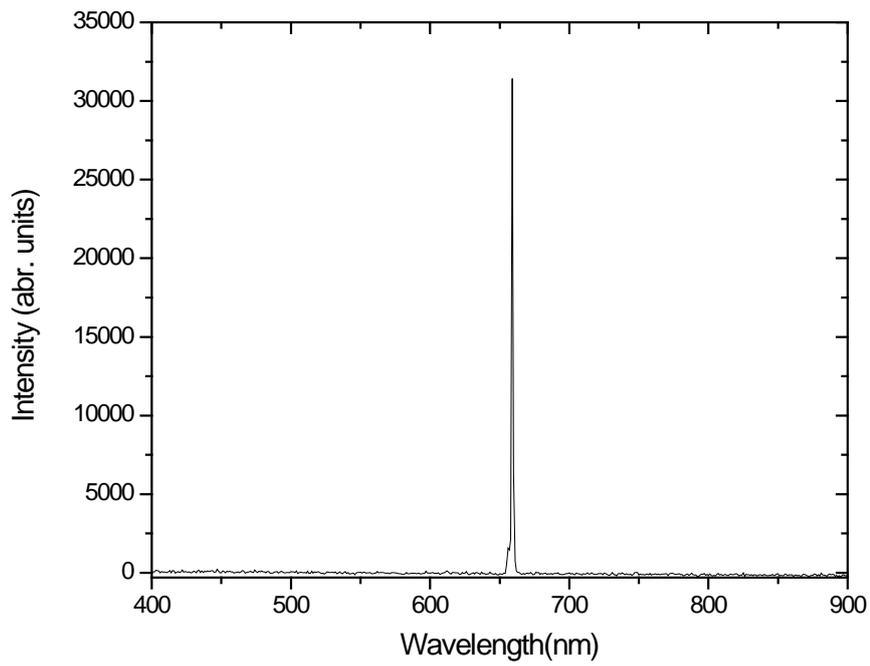
โดยหลอดไอโอดีนมีความยาว 40 cm, เลนส์มีความยาวโฟกัส 20 cm และเลเซอร์กระตุ้น (Pump laser) มีกำลังสูงสุดที่ 100 mW

7. ผลการวิจัย ในส่วนนี้ขอให้แสดงผลที่ได้จากการทดลอง การวิเคราะห์ผลการทดลอง การประมวลผล พร้อมทั้งการอภิปรายผลการทดลอง การยอมรับสมมติฐาน (ถ้ามี)

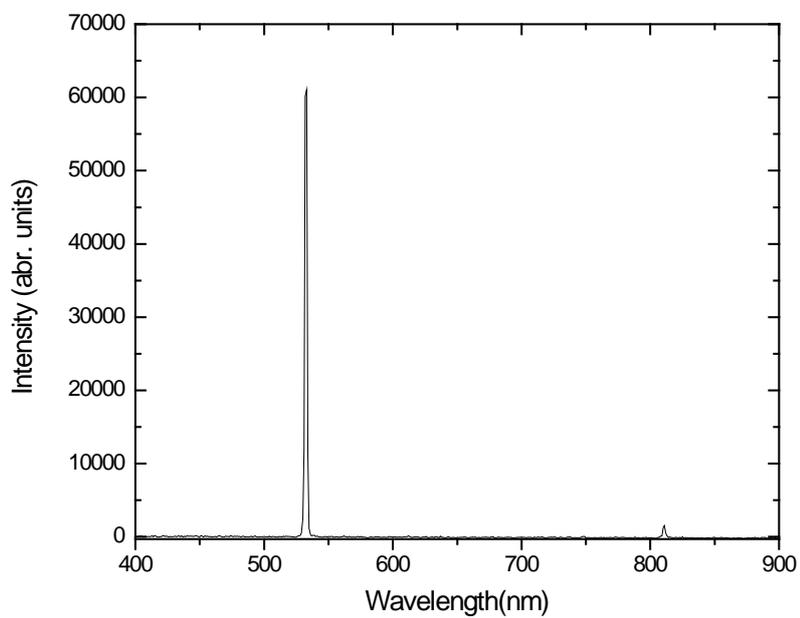
7.1 ผลการวัดการเรืองแสงของก๊าซไอโอดีนกระตุ้นด้วยเลเซอร์พอยเตอร์

จากการทดลอง หากพิจารณาสเปกตรัมของเลเซอร์พอยเตอร์ทั้งสองชนิดพบว่า แสงสีแดงและแสงสีเขียวมันอยู่ในย่าน 650 nm และ 532 nm (ภาพที่ 8 และ 9 ตามลำดับ) ซึ่งอยู่ในช่วงที่มองเห็นได้

จากผลการทดลองของภาพที่ 8 ซึ่งแสดงความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์พอยเตอร์สีแดงพบว่า เลเซอร์พอยเตอร์นั้นมีความยาวคลื่นอยู่ที่ประมาณ 655 nm โดยค่าความยาวคลื่นดังกล่าวอยู่ในช่วงที่ระบุไว้ที่ 650 ± 10 nm และไม่มีมีความยาวคลื่นอื่นๆ ปรากฏออกมา ซึ่งหากใช้เลเซอร์พอยเตอร์สีแดงในสถานศึกษาและกำหนดให้กำลังของเลเซอร์ดังกล่าวมีค่าน้อยกว่า 1 mW เลเซอร์พอยเตอร์นั้นสามารถใช้ได้อย่างปลอดภัย

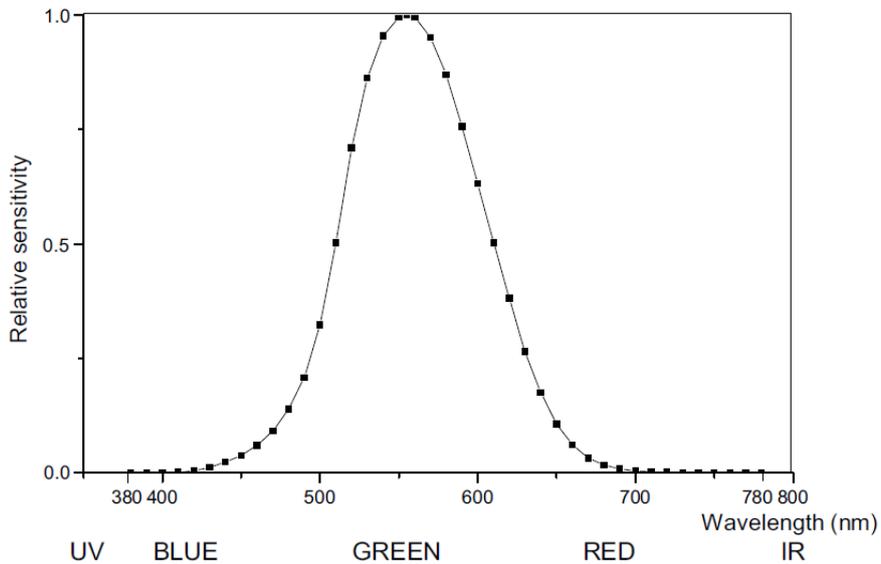


ภาพที่ 8 ผลการทดลองการวัดสเปกตรัมของเลเซอร์พอยเตอร์สีแดง

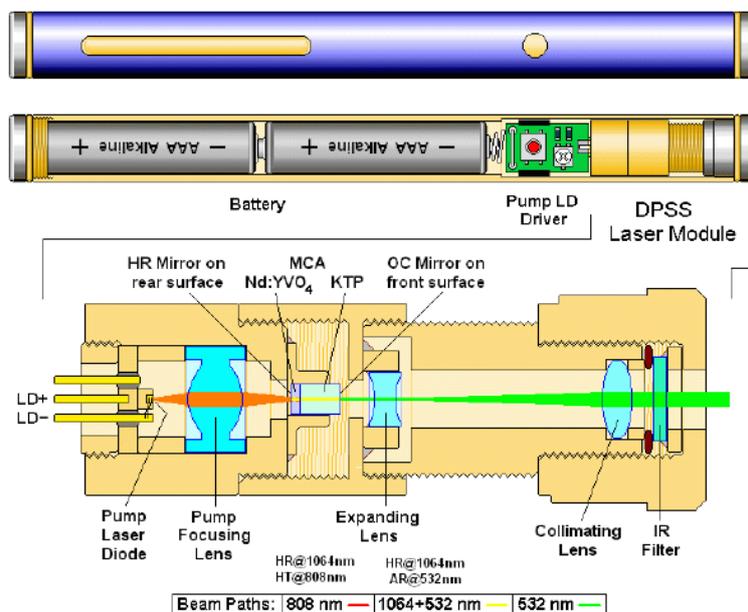


ภาพที่ 9 ผลการทดลองการวัดสเปกตรัมของเลเซอร์พอยเตอร์สีเขียว

แต่ทว่าสเปกตรัมของเลเซอร์พอยเตอร์สีเขียวแสดงได้ดังภาพที่ 9 นอกจากแสงเลเซอร์สีเขียวที่ตรวจพบที่ความยาวคลื่น 532 nm แล้ว ยังมีการตรวจพบแสงที่ความยาวคลื่น 808 nm ซึ่งเป็นความยาวคลื่นในย่านอินฟราเรดไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า โดยช่วงการมองเห็นของมนุษย์อยู่ในช่วง 400-700 nm แสดงได้ดังภาพที่ 10 ซึ่งแสดงการตอบสนองหรือการมองเห็นของมนุษย์ที่ความยาวคลื่นต่างๆ



ภาพที่ 10 การมองเห็นของมนุษย์ที่ความยาวคลื่นต่างๆ



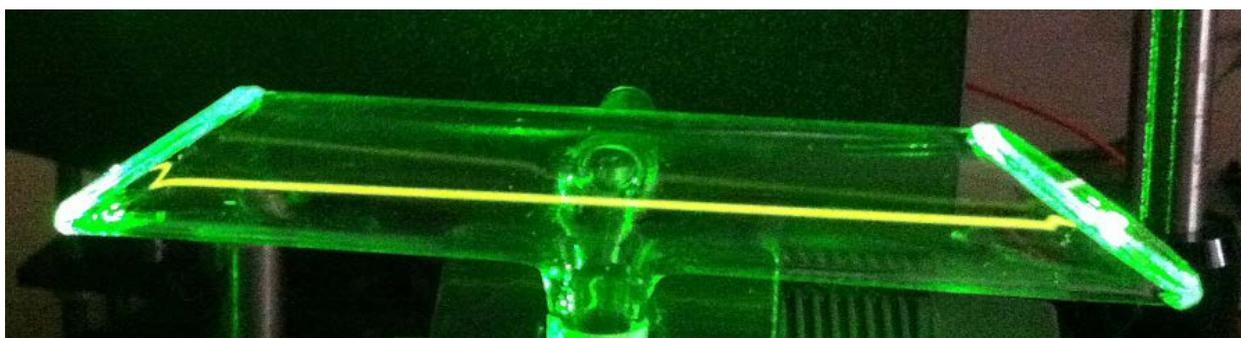
ภาพที่ 11 องค์ประกอบภายในของเลเซอร์พอยเตอร์สีเขียว [นำมาจาก Jemellie Galang, Alessandro Restelli, Edward W. Hagley and Charles W. Clark, A Green Laser Pointer Hazard, National Institute of Standards and Technology Technical NOTE 1668, 2010.]

ดังนั้นความยาวคลื่นที่ 808 nm จึงเป็นอันตรายต่อผู้ใช้งาน หากเราจะกลับไปถึงสาเหตุการตรวจพบความยาวคลื่น จะพบว่าเป็นแสงที่รั่วออกมาจากเลเซอร์ไดโอดที่ใช้ในการกระตุ้นผลึก KTP (แสดงในภาพที่ 11 ซึ่งแสดงองค์ประกอบของเลเซอร์พอยเตอร์สีเขียว) และยังมีแนวโน้มว่าแสงที่ความยาวคลื่น 1064 nm ซึ่งใช้กระตุ้นเลเซอร์ไดโอด อาจมีการรั่วออกมาจากเลเซอร์พอยเตอร์เช่นเดียวกับความยาวคลื่น 808 nm ซึ่งการทดลองในโครงการนี้สามารถเสนอแนะว่า หากจะใช้เลเซอร์สีเขียวในระบบของโครงการวิจัยนี้จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์การลดทอนแสง (Filter) จะพบว่าการลดทอนลำแสงอินฟราเรดที่ความยาวคลื่น 808 nm และ 1064 nm สามารถทำได้โดยการออกแบบอุปกรณ์การลดทอนแสง หรือเปลี่ยนวิถีของแสงอินฟราเรดที่ออกมาจากเลเซอร์พอยเตอร์ โดยใช้ปริซึมหรืออุปกรณ์ทางทัศนศาสตร์อื่นๆ

7.2 ผลการเรืองแสงของก๊าซไอโอดีนกระตุ้นโดยเลเซอร์พอยเตอร์

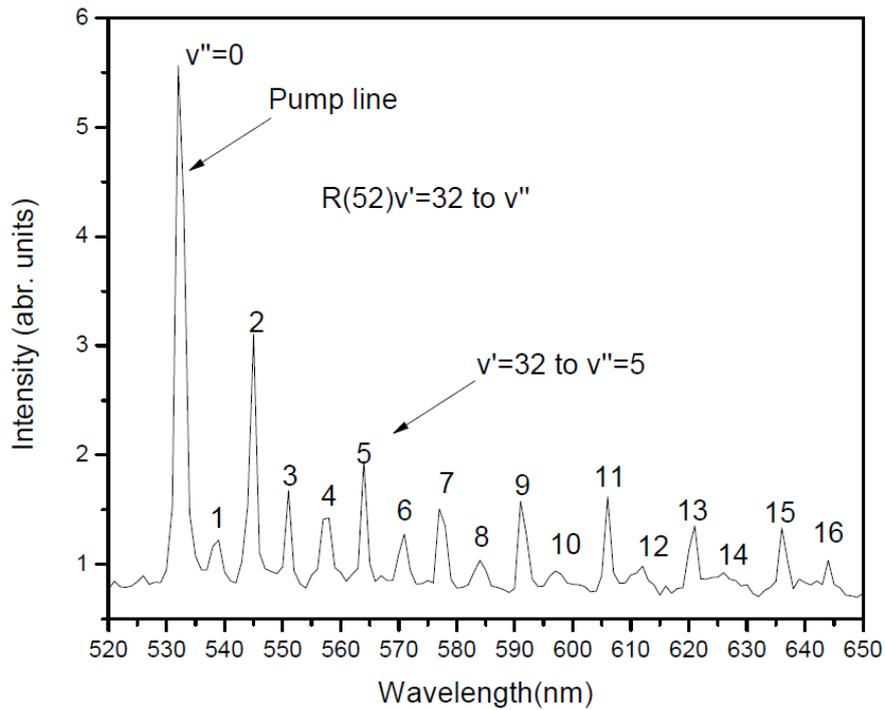
หลังจากการทำการวัดสเปกตรัมของแสงเลเซอร์พอยเตอร์สีเขียว ได้มีการทดลองเบื้องต้นในการนำเลเซอร์พอยเตอร์สีเขียวนำไปส่องผ่านหลอดบรรจุก๊าซไอโอดีนที่อุณหภูมิห้อง แล้วซึ่งพบการเรืองแสงของไอโอดีนเมื่อถูกกระตุ้นนั้นมีสีส้ม ดังภาพที่ 12

โดยจากการสังเกตเบื้องต้นพบว่าแม้อุณหภูมิของก๊าซไอโอดีนจะอยู่ที่อุณหภูมิห้อง ก็สามารถสังเกตเห็นการเรืองแสงได้ชัดเจนด้วยตาเปล่า โดยความดันไอของโมเลกุลไอโอดีนที่อุณหภูมิห้องมีค่าประมาณ 0.2 torr หรือมีจำนวนประชากรในสถานะพื้นประมาณ 7.4×10^{15} molecules/cm² ซึ่งการเรืองแสงของก๊าซไอโอดีนเมื่อถูกกระตุ้นมีอัตราที่มากจนไม่ต้องใช้อุปกรณ์ทางทัศนศาสตร์ช่วยถึงแม้ว่าถูกกระตุ้นที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นการสร้างอุปกรณ์ทดลองเรืองแสงจากก๊าซไอโอดีนจึงไม่จำเป็นในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความดัน ดังนั้นการทดลองเรืองผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการเรืองแสงจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจึงได้ยกเลิกไปและแทนที่โดยการใช้อยุขน์จากการเรืองแสงในการใช้เป็นอุปกรณ์ในการสอบเทียบ (Calibration) เครื่องสเปกโตรมิเตอร์



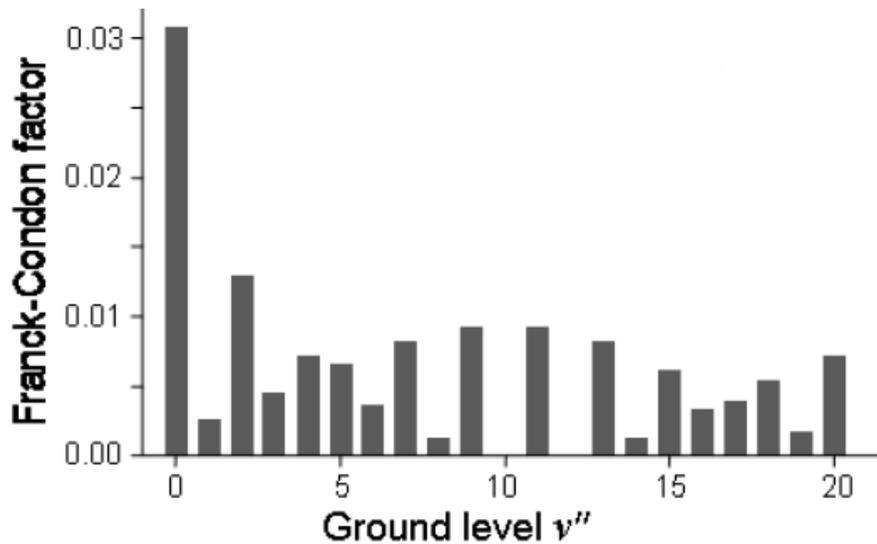
ภาพที่ 12 การเรืองแสงของก๊าซไอโอดีนซึ่งถูกกระตุ้นโดยเลเซอร์พอยเตอร์

ผลการวัดสเปกตรัมของการเรืองแสงของก๊าซไอโอดีนแสดงได้ดังภาพที่ 13 ซึ่งเมื่อทำการพิจารณาพบได้มีความยาวคลื่นหลากหลายความยาวคลื่นที่ถูกตรวจพบ โดยก๊าซไอโอดีนได้ทำการดูดกลืนแสงสีเขียวที่เส้นสเปกตรัม R56(32-0) จากนั้นการเรืองแสงได้เกิดขึ้นหลากหลายกว่า 10 เส้นสเปกตรัม การนิยามชื่อของแต่ละเส้นสเปกตรัมโดยใช้ค่าแฟกเตอร์ Frank-Condon ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 13 เส้นสเปกตรัมของการเรืองแสงของก๊าซไอโอดีน

จากภาพที่ 13 การกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 532 เกิดขึ้นที่เส้นสเปกตรัม R56(32-0) และการเกิดการเรืองแสงเกิดขึ้นที่เส้นสเปกตรัม R56(32-1) ถึง R56(32-16) การเรืองแสงของก๊าซไอโอดีนนี้จึงสามารถนำมาใช้ในการสอบเทียบเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ได้ โดยค่าประมาณของความยาวคลื่นของการแสงของก๊าซไอโอดีน สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1



ภาพที่ 14 ค่าคงที่ Frank-Condon ของก๊าซไอโอดีน ของเส้นสเปกตรัม R56 (32-v'')

ตารางที่ 1 ค่าความยาวคลื่นของการเรืองแสงของก๊าซไอโอดีนในเส้นสเปกตรัมR56 (32-v'')

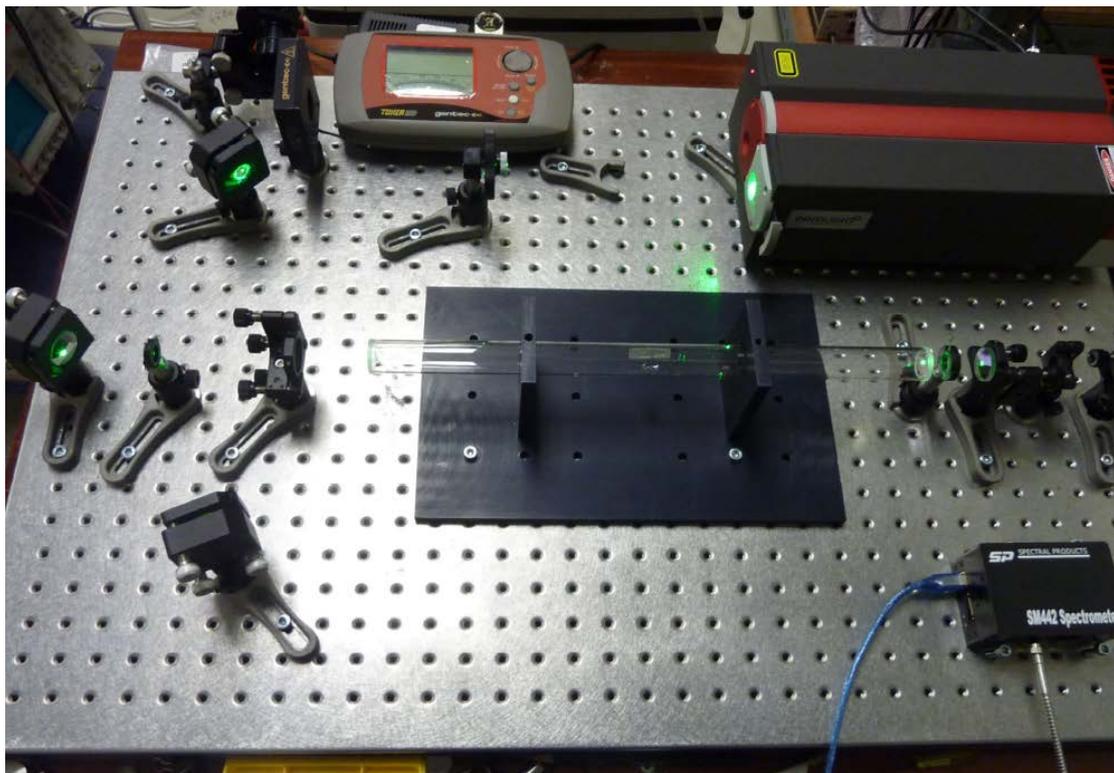
v''	ความยาวคลื่น(λ) nm
0	532.2
1	538.3
2	544.6
3	550.9
4	557.3
5	563.8
6	570.5
7	577.3
8	584.2
9	591.2
10	598.3
11	605.6
12	613.0
13	620.6
14	628.3
15	636.1
16	644.1

จากผลการทดลองการเรืองแสงจากโครงการวิจัยนี้โดยใช้ก๊าซไอโอดีนเป็นสารเรืองแสงและเลเซอร์พอยเตอร์สีเขียวเป็นแหล่งกระตุ้น อัตราการเรืองแสงนั้นมีปริมาณมากพอที่จะเห็นได้ด้วยตาเปล่า ที่อุณหภูมิห้อง การค้นพบนี้สามารถสร้างเครื่องมือการทดลองฟิสิกส์อย่างง่าย ไม่ยุ่งยาก และมีราคาถูกลงได้ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในสถานศึกษาในระดับประถม-ปริญญาตรีได้ นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ต่อยอดแนวความคิดในการใช้เลเซอร์พอยเตอร์สีเขียวและหลอดแก้วบรรจุไอโอดีนในการสอบเทียบเครื่องสเปกโตรมิเตอร์แบบพกพา โดยใช้ข้อได้เปรียบในเรื่องความง่ายและไม่ยุ่งยากต่อการใช้งานสอบเทียบ

7.3 ผลการทดลองการสร้างระบบเลเซอร์ (แบบไม่มีกระจกสะท้อน) ก๊าซไอโอดีนกระตุ้นโดยเลเซอร์สีเขียว

ด้วยความไม่เสถียรของความยาวคลื่นของระบบเลเซอร์สีเขียวที่ได้สร้างขึ้น ได้ทำให้เกิดปัญหาในการนำไปใช้กระตุ้นก๊าซไอโอดีน แต่ด้วยความอนุเคราะห์จาก ดร. มลฤดี เรณูสวัสดิ์, สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ จึงทำให้โครงการวิจัยนี้ดำเนินการต่อไปได้

เลเซอร์กระตุ้นที่ใช้ทดลองเป็นเลเซอร์สีเขียวที่มีความยาวคลื่น 532 nm ขนาด 100 mW (Innolight: Prometheus 50 NE) ซึ่งได้ถูกออกแบบให้มีความเสถียรสูง (Ultrastable) โดยลำแสงเลเซอร์ดังกล่าวได้ถูกเข้าไปที่หลอดก๊าซไอโอดีนขนาดความยาว 40 cm (ดังภาพที่ 7) และภาพที่ 15 แสดงการจัดวางการทดลอง



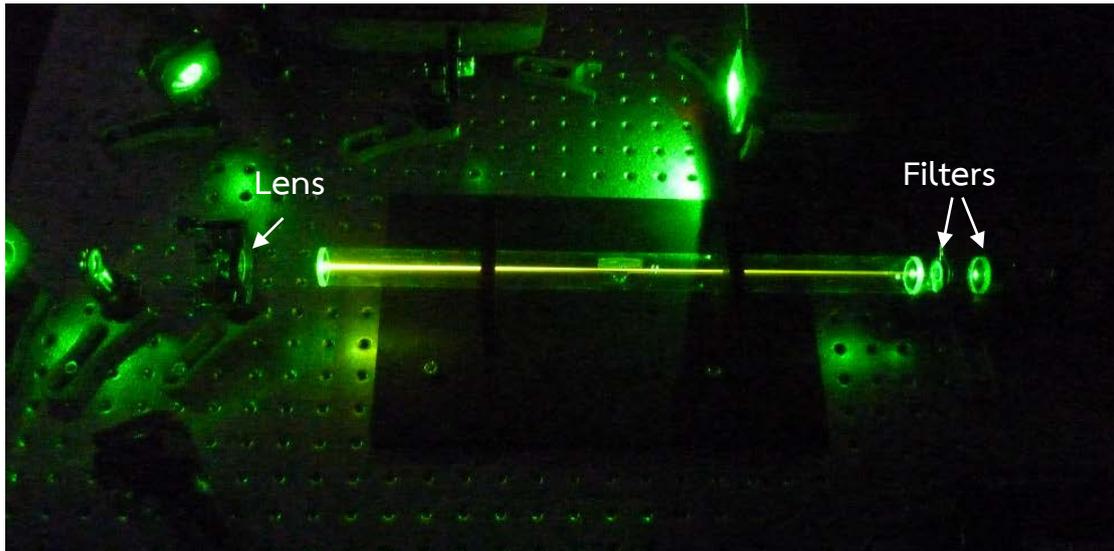
ภาพที่ 15 การทดลองการเกิดลำแสงเลเซอร์แบบไม่มีกระจกสะท้อน

การทดลองในขั้นตอนนี้คือการทดลองหาการดูดกลืนของก๊าซไอโอดีนที่อุณหภูมิห้อง (19 °C) โดยทำการวัดโดยใช้กำลังของเลเซอร์อยู่ในช่วง 10-70 mW และพบว่ามี การดูดกลืนแสงเลเซอร์

ของก๊าซไอโอดีน มีค่าประมาณ 18% ของความยาวของหลอดก๊าซไอโอดีนที่ 40 cm โดยกำลังเลเซอร์ในช่วงระหว่าง 10-70 mW และรัศมีลำแสงเฉลี่ยที่ 0.5 mm ไม่อยู่ในระดับที่ทำให้ก๊าซไอโอดีน เกิดการอิมพัลส์

จากผลการทดลองดังกล่าวชี้ชัดว่าการดูดกลืนลำแสงเลเซอร์สีเขียวของก๊าซไอโอดีนที่อุณหภูมิห้องนั้น มีค่ามากพอโดยไม่จำเป็นต้องมีการเปลี่ยนความดันหรืออุณหภูมิของก๊าซไอโอดีน

ลำดับถัดไปคือการทดลองเพื่อแสดงสภาวะการเกิดลำแสงเลเซอร์แบบไม่มีกระจกสะท้อน ซึ่งการสังเกตปรากฏการณ์นี้แสดงได้ดังภาพที่ 16

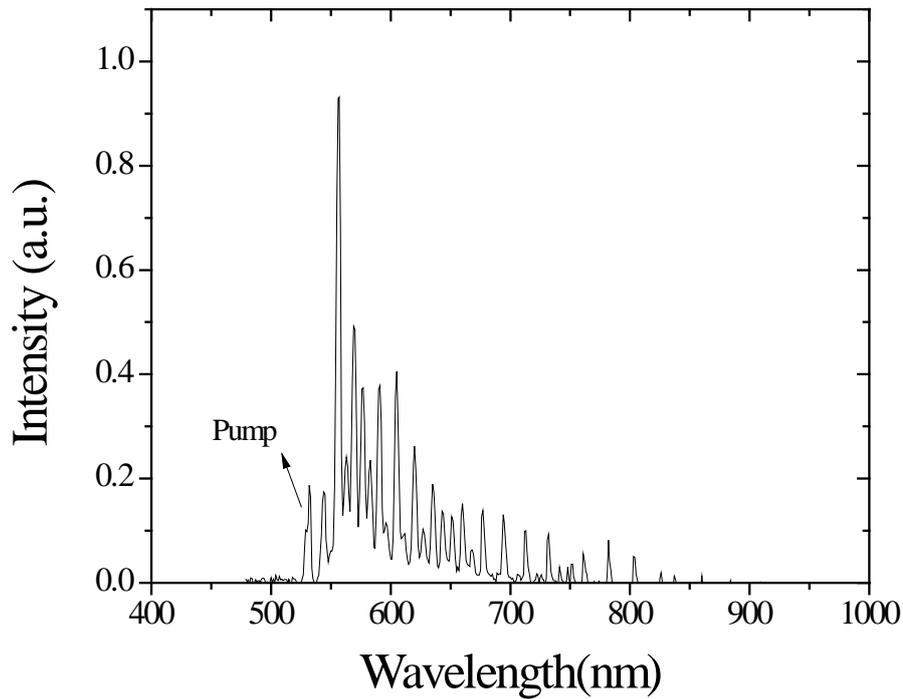


ภาพที่ 16 การเกิดเลเซอร์แบบไม่มีกระจกสะท้อนของก๊าซไอโอดีน

จากการทดลองเบื้องต้นพบว่าการตรวจวัดการเกิดเลเซอร์ทำได้ยากลำบากเนื่องจากความเข้มของลำแสงกระตุ้นมีค่าที่สูงมากเมื่อเทียบกับการแสงเลเซอร์ที่เกิดขึ้น การแก้ปัญหาคือการใช้ Filter ถึงสองชั้น (ดังภาพที่ 16) ในการลดทอนลำแสงเลเซอร์กระตุ้น ในอยู่ในระดับของแสงเลเซอร์จากก๊าซไอโอดีนและภาพที่ 17 แสดงการวัดสเปกตรัมของแสงเลเซอร์จากก๊าซไอโอดีนที่กระตุ้นโดยเลเซอร์สีเขียว ซึ่งทำการวัดโดยรับแสงเลเซอร์ห่างจากระบบ Filter ประมาณ 30 cm

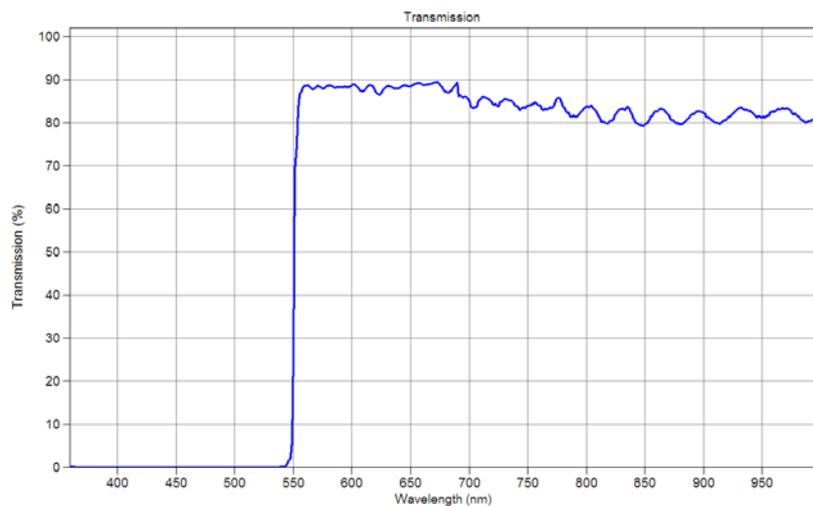
ภาพที่ 17 แสดงสเปกตรัมของเลเซอร์ชนิดก๊าซไอโอดีนจากการทดลอง โดย pump หมายถึงความยาวคลื่นของเลเซอร์กระตุ้นที่มีความยาวคลื่น 532 nm ซึ่งได้ถูกลดทอนแล้วจากระบบ Filter ภาพที่ 17 มีความคล้ายคลึงกับการทดลองการเรืองแสงที่ผ่านมา ยกเว้นบางเส้นสเปกตรัมที่อยู่ในช่วงการลดทอนของ Filter อันได้แก่ R56 (32-1) ในขณะที่ R56 (32-3) ไม่เกิดขึ้นเนื่องจากค่าคงที่ Frank-Condon มีค่าต่ำเมื่อเทียบกับ R56 (32-2) และ R56 (32-4) ซึ่งเป็นระดับชั้นพลังงานรอบข้าง (พิจารณาภาพที่ 14) เป็นเหตุให้ R56 (32-3) มีศักยภาพน้อยต่อการแย่งชิงประชากรในขณะที่เกิดสภาวะประชากรผกผัน (Population inversion)

นอกจากนี้ ภาพที่ 17 ยังชี้ชัดว่าการเกิดเลเซอร์เกิดขึ้นได้มากที่สุดในการแลกเปลี่ยนพลังงานของ R56 (32-4) อย่างไรก็ตาม หากพิจารณา ค่าคงที่ Frank-Condon, R56 (32-2) อาจเป็นเส้นสเปกตรัมที่ความเข้มมากที่สุด หากแต่ถูกลดทอนบางส่วนด้วยระบบ Filter ในการทดลอง (พิจารณาภาพที่ 18)



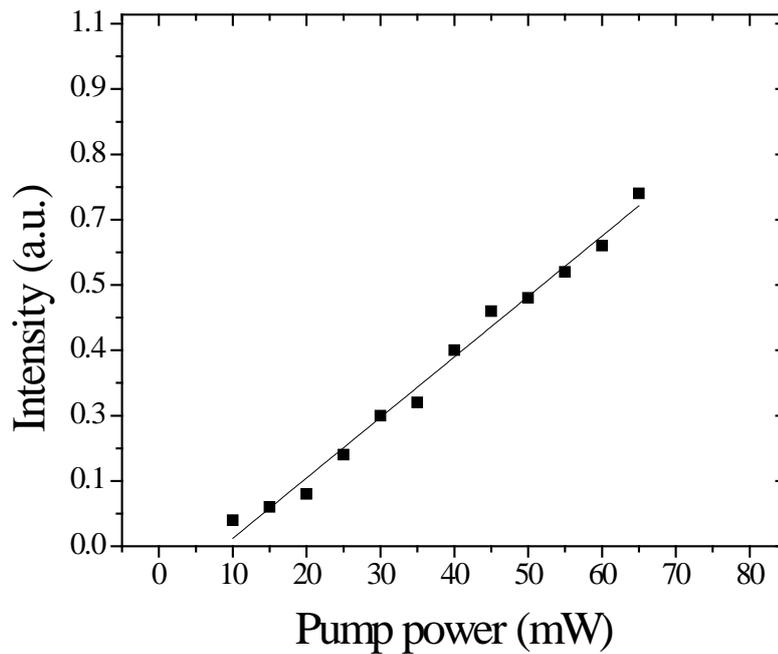
ภาพที่ 17 สเปกตรัมของเลเซอร์ชนิดก๊าซไอโอดีนแบบไม่มีกระจกสะท้อนซึ่งกระตุ้นโดยเลเซอร์สีเขียวที่มีความยาวคลื่น 532 nm

การแสดงผลการเกิดเลเซอร์ของก๊าซไอโอดีนเมื่อถูกกระตุ้นด้วยเลเซอร์สีเขียวแบบลำแสงต่อเนื่องในโครงการวิจัยนี้ถือว่าผลงานที่สำคัญเนื่องจากการเกิดเลเซอร์ในสถานะไม่มีกระจกสะท้อน ซึ่งโดยปกติเกิดขึ้นได้ยากจากสารเลเซอร์ที่เป็นก๊าซทั่วไป การทดลองขั้นสุดท้ายคือการศึกษากำลั้งขีดเริ่มของการเกิดเลเซอร์ของก๊าซไอโอดีนในสถานะไม่มีกระจกสะท้อน เพื่อระบุกำลังของเลเซอร์ที่เข้ากระตุ้นรวมถึงความเป็นไปได้ของการเป็นสารรวมแสงในอนาคต



ภาพที่ 18 การส่งผ่านแสงของระบบ Filter

การทดลองการหาค่ากำลังขีดเริ่มได้ทำโดยการเปลี่ยนกำลังเลเซอร์กระตุ้นให้อยู่ในช่วงระหว่าง 10-65 mW เพื่อวัดกำลังของเลเซอร์โดยใช้เส้นสเปกตรัม R56 (32-4) เป็นจุดอ้างอิงจนกระทั่งกำลังของเส้นสเปกตรัม R56 (32-4) อยู่ในระดับของสัญญาณรบกวนในระบบการวัด (Signal to Noise Ratio) ภาพที่ 19 แสดงผลการทดลอง ซึ่งสามารถระบุถึงกำลังขีดเริ่มของเลเซอร์กระตุ้นได้ที่ 10 mW ซึ่งถือว่าเป็นกำลังกระตุ้นที่น้อยมาก (แต่อย่างไรก็ตามก็ไม่อยู่ในระดับของเลเซอร์พอยเตอร์ทั่วไป) เป็นนัยยะที่สำคัญต่อการพัฒนาขั้วเลเซอร์ชนิดนี้ เป็นแหล่งรวมแสงเลเซอร์



ภาพที่ 19 ผลการวัดกำลังขีดเริ่มของเลเซอร์ชนิดก๊าซไอโอดีนแบบไม่มีกระจกสะท้อน

8. สรุปผล โดยสรุปประเด็นสำคัญที่ได้จากงานวิจัยครั้งนี้ ชี้ให้เห็นว่าการวิจัยได้ก่อให้เกิด ผลงานอย่างใด เป็นไปตามวัตถุประสงค์หรือไม่ ผลงานที่เกิดขึ้นสามารถวัดได้ เช่น เป็นต้นแบบ วิธีการใหม่ หรือ ผลิตภัณฑ์ใหม่ อย่างไร และงานวิจัยนี้จะได้รับการเผยแพร่ในรูปแบบใดบ้าง รวมถึงการประยุกต์ใช้ผลงานวิจัยด้วย

ผู้วิจัยสามารถสรุปประเด็นสำคัญที่ได้จากงานวิจัยมีดังต่อไปนี้

1. เลเซอร์พอยเตอร์สีเขียวมีความยาวคลื่นที่ 532 nm และมีลำแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 808 nm รั่วออกมา ซึ่งเป็นแสงที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ทำให้การใช้แสงเลเซอร์พอยเตอร์สีเขียว ต้องมีความระมัดระวังเป็นพิเศษ เมื่อเปรียบเทียบกับเลเซอร์พอยเตอร์สีแดง ซึ่งประเด็นดังกล่าวถูกนำไปเผยแพร่ต่อการอบรมครูมัธยมศึกษาวิชาฟิสิกส์จำนวน 69 คน ในโครงการอบรมครูวิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์ คอมพิวเตอร์ โลก-ดาราศาสตร์ และอวกาศ ตามคำสั่งคณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ที่

383/2555 ซึ่งผู้วิจัยได้ทำหน้าที่ในการอบรมวิชาฟิสิกส์ ในหัวข้อ เสียงและแสง เมื่อวันที่ 4 มิ.ย. 2555 ณ คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

โดยครุมัธยมสาขาวิชาฟิสิกส์จำนวน 69 คน มาจากโรงเรียนต่างๆดังต่อไปนี้

1. โรงเรียนนนทบุรีพิทยาคม จ.นนทบุรี
2. โรงเรียนสุนารีวิทยา จ.นครราชสีมา
3. โรงเรียนผินแจ่มวิชาสอน จ.ชลบุรี
4. โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการ นนทบุรี
5. โรงเรียนภูวิทยา จ.นครราชสีมา
6. โรงเรียนจระเข้หินสังขิกวิทยา จ.นครราชสีมา
7. โรงเรียนเทพศิรินทร์ จ.นนทบุรี
8. โรงเรียนนวมินทราชินูทิศ หอวัง นนทบุรี
9. โรงเรียนสามัคคี จ.นครราชสีมา
10. โรงเรียนสมเด็จพระธีรญาณมุนี จ.นครราชสีมา
11. โรงเรียนบุญเหลือวิทยานุสรณ์ จ.นครราชสีมา
12. โรงเรียนพิมาย จ.นครราชสีมา

ซึ่งผลการวิจัยดังกล่าว สามารถนำไปกระตุ้นเตือนครุมัธยมให้ระมัดระวังการใช้เลเซอร์พอยเตอร์สีเขียวในการสอนและการใช้ในการทดลองในระดับมัธยมปลาย

2. การเรืองแสงของก๊าซไอโอดีนมากพอที่จะทำให้เกิดเรืองแสงที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นการค้นพบนี้เป็นข้อดีในการประยุกต์ใช้ก๊าซไอโอดีนเป็นอุปกรณ์การเรืองแสงที่ไม่มีอุปกรณ์ใดๆเป็นตัวช่วย ซึ่งสร้างความง่ายและกระชับในการใช้งาน

3. ผลการทดลองการเรืองแสงเบื้องต้นนำไปสู่มุมมองการใช้ก๊าซไอโอดีนและเลเซอร์พอยเตอร์สีเขียวในการสอบเทียบ(Calibration) สเปกโตรมิเตอร์แบบ USB ซึ่งมีขนาดกระทัดรัดที่สามารถพกพาไปใช้งานภาคสนามได้ง่าย แต่ทว่าสเปกโตรมิเตอร์แบบ USB ต้องการการสอบเทียบบ่อยครั้ง ดังนั้นการใช้เลเซอร์พอยเตอร์และก๊าซไอโอดีนจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการเป็นเครื่องมือในการสอบเทียบในอนาคต

4. การสร้างและพัฒนาระบบเลเซอร์สีเขียวที่มีความยาวคลื่น 532 nm ซึ่งถึงแม้ในปัจจุบันไม่สามารถนำไปกระตุ้นก๊าซไอโอดีนได้ แต่ยังสามารถนำมาเป็นสื่อการสอนในวิชาเทคโนโลยีเลเซอร์, แสงประยุกต์, โฟโตนิกส์ 1, โฟโตนิกส์ 2 และปฏิบัติการฟิสิกส์ขั้นสูง ในระดับปริญญาตรีและปริญญาโทของภาควิชาฟิสิกส์อุตสาหกรรมและอุปกรณ์การแพทย์, คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

5. งานวิจัยนี้สามารถสร้างระบบเลเซอร์ก๊าซไอโอดีนแบบไม่มีกระจกสะท้อนได้ ซึ่งถือว่าเป็นสถานะที่เกิดขึ้นได้ยากโดยเฉพาะการกระตุ้นด้วยเลเซอร์แบบลำแสงต่อเนื่อง การค้นพบดังกล่าวสามารถนำไปสู่การต่อยอดสร้างระบบรวมแสงได้ในอนาคต ผลงานนี้ได้ถูกนำเสนอในการประชุมวิชาการฟิสิกส์วิศวกรรม (1 st Engineering Physics Conference), ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ในหัวข้อ Optically pumped molecular iodine mirrorless laser ตามเอกสารที่แนบมาด้วย

6. จากปัญหาของงานวิจัยในเรื่องความเสถียรของเลเซอร์สีเขียวที่ได้สร้างขึ้นได้รับไปสู่การร่วมมือของการทำวิจัยร่วมระหว่างผู้วิจัยและนักวิจัยของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ซึ่งถือว่าเป็นการเริ่มต้นที่ดี

ของการสร้างเครือข่ายของบุคลากรที่มีความรู้ทางด้านเลเซอร์ ในการร่วมมือพัฒนางานวิจัยเพื่อพัฒนาประเทศต่อไป

9. ปัญหาและอุปสรรค เสนอแนะแนวทางที่จะแก้ไขปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้นจากการวิจัย ในครั้งนี้ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัยในอนาคต

ประเด็นของเรื่องเวลาเป็นปัญหาและอุปสรรคในการทำงานในโครงการวิจัยนี้ ซึ่งหากข้อมูลในส่วนนี้จะมีประโยชน์ต่อทุนวิจัยและนักเรียนทุนต่อไปในอนาคต ผู้วิจัยขออธิบายถึงเหตุผลที่สะท้อนต่อความคลาดเคลื่อนของเรื่องเวลาในการทำโครงการวิจัยนี้

โครงการวิจัยนี้เป็นโครงการวิจัยแรกของผู้วิจัยที่เกิดขึ้นในประเทศไทย ที่ได้รับความกรุณาจากศูนย์ประสานงานนักเรียนทุนรัฐบาลทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และเมื่อได้รับทุนวิจัย ผู้วิจัยได้ขอพื้นที่วิจัยซึ่งเป็นห้องเก็บของในภาควิชาฟิสิกส์อุตสาหกรรมและอุปกรณ์การแพทย์เพื่อทำโครงการวิจัยนี้ ในเริ่มต้นนั้นผู้วิจัยมีเพียงห้องเก็บของที่ว่างเปล่าที่เคยเป็นที่เก็บของซากเครื่องคอมพิวเตอร์เก่ากว่า 100 เครื่องและเครื่องปรับอากาศในห้องนั้นไม่สามารถใช้งานได้เนื่องจากถูกปิดเพื่อทำห้องเก็บของมานานกว่า 10 ปี (ภายหลังห้องดังกล่าวได้ถูกพัฒนาและขยายให้เป็นห้องปฏิบัติการเลเซอร์ฟิสิกส์ในปัจจุบัน) และต้องทำการจัดหาวัสดุวิจัย จากเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ชำรุดหรือที่ซ่อนตัวอยู่ในลิ้นชักของภาควิชา นอกจากนี้ผู้วิจัยยังต้องเผชิญต่อภาระการสอนที่โดยเฉลี่ยประมาณ 30 ชั่วโมงต่อสัปดาห์ (นับเฉพาะภาระการสอนโดยเฉลี่ยในรอบ 3 ปี) ซึ่งเป็นไปได้ยากในการทำวิจัยในช่วงปีแรกเนื่องจากความไม่พร้อมทั้งในเรื่องเวลาและสถานที่ซึ่งเหตุผลดังกล่าวเป็นอุปสรรคต่อการวิจัยและเป็นเหตุหนึ่งของความล่าช้าในการดำเนินการวิจัย แต่ทว่าหากจะย้อนกลับไปได้ในวันที่ผู้วิจัยขอรับทุนวิจัยนี้ ผู้วิจัยคงต้องทำเช่นเดิม เพราะจากวันนั้นจนถึงวันนี้ แม้งานวิจัยนี้จะจบลงด้วยระยะเวลากว่า 3-4 ปี แต่ก็ทำให้ผู้วิจัยได้เรียนรู้และมีโอกาสริเริ่มทำงานวิจัยและก่อตั้งห้องปฏิบัติการเลเซอร์ฟิสิกส์ที่สามารถทำการสอนนักศึกษาเกินกว่า 50 คนต่อปีทั้งในระดับปริญญาตรีและปริญญาโทได้ นอกจากนี้ห้องปฏิบัติการเลเซอร์ฟิสิกส์ยังเป็นหนึ่งในสามของห้องวิจัยของกลุ่มวิจัยเลเซอร์และทัศนศาสตร์ (LANDOS) ในปัจจุบันที่เพาะบ่มนักวิจัยรุ่นใหม่เพื่อช่วยพัฒนาประเทศต่อไป

นอกจากอุปสรรคทางด้านสถานที่และภาระการสอนแล้ว ปัญหาเชิงเทคนิคของโครงการวิจัยนี้คือ การจัดหาวัสดุและอุปกรณ์ที่สอดคล้องกับปัญหาวิจัย ที่ใช้ระยะเวลาในการสั่งซื้อ (ไม่นับรวมกับระยะเวลาการรอรับเงินวิจัยที่ผ่านเข้ามายังมหาวิทยาลัย ซึ่งโดยปกติมหาวิทยาลัยจะเบิกจ่ายงบประมาณวิจัยที่ถูกจัดสรรเป็นเวลานาน 2-3 เดือน) ซึ่งทำให้เกิดประเด็นในเรื่องปัญหาของระยะเวลาและการวางแผนทำการวิจัยโดยตรง (ในส่วนนี้เกี่ยวข้องกับภาระการสอนที่มาก จนทำให้ผู้วิจัยมีโอกาสทำวิจัยจริงๆ ในช่วงสอบลกลางภาค, ปลายภาคเรียนและปิดเทอม แต่หากอุปกรณ์และเครื่องมือยังไม่พร้อมหรือไม่มีการสั่งซื้อ หมายความว่าต้องรอในช่วงเวลาถัดไป)

ปัญหาทั้งหมดนั้นในปัจจุบันได้ดูเหมือนว่าได้ทุเลาลง มิใช่เกิดจากการแก้ปัญหาในส่วนองภาวะแวดล้อม แต่เกิดจากการปรับตัวของนักวิจัยเอง ซึ่งได้เรียนรู้จากทุนวิจัยนี้ นั่นคือการมีอุปกรณ์และเครื่องมือที่พร้อมก่อนที่จะเสนอขอทุนวิจัย (หรือแม้กระทั่งการทำการทดลองนำร่องไปก่อนเพื่อให้เกิดความเชื่อมั่นที่จะทำงานวิจัยได้ในกรอบระยะเวลา)

อย่างไรก็ตาม ในฐานะของนักเรียนทุนที่ได้รับโอกาสจากทุนรัฐบาลทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเสมอมาในระหว่างการศึกษาและการทำงานในระยะเริ่มแรก ยังมีความเห็นว่าทุนวิจัยมีความจำเป็นอย่างยิ่งกับนักเรียนทุน เพราะทุนวิจัยนี้เปรียบเสมือนการจุดประกายให้นักเรียนทุนได้มีโอกาสใช้ชีวิตการเป็นนักวิจัยในสภาวะของความไม่พร้อมของประเทศไทย และเป็นบทเรียนที่มีค่าในการดำเนินชีวิตของนักวิจัยต่อไป

10. บรรณานุกรม ระบุรายชื่อเอกสารอ้างอิง เรียงลำดับอักษร โดยแยกเป็นเอกสารภาษาไทย และภาษาอังกฤษ

- [1] J. T. Verdeyen, "Laser electronics", Printice Hall, 1995
- [2] J. C. Williamson, "Teaching the rovibronic spectroscopy of molecular iodine", J. Chemical Education, 84, 1355, 2007.
- [3] A. Arie and R. L. Byer, " Absolute frequency stabilization of diode-pumped Nd:YAG lasers", Laser Physics, 4, 387,1994.
- [4] J. Tellinghuisen, "Laser-induced fluorescence in Gaseous I₂ excited with a green laser pointer" J. Chemical Education, 84, 336, 2007.
- [5] A. Ratanavis, N. Campbell, and W. Rudolph, "Feasibility study of optically pumped molecular lasers with small quantum defect" J. Opt. Commun. 283:1075, 2010.
- [6] A. Ratanavis, N. Campbell, A. V. V. Nampoothiri, and W. Rudolph, "Performance and spectral tuning of optically overtone pumped molecular lasers" IEEE J. Quant. Electron. 45, 488, 2009.
- [7] R. L. Byer, R. L. Herbst , H. Kildal, and M. D. Levenson " Optically pumped molecular Iodine vapor-phase laser", Appl. Phys. Lett, 20, 11, 1972.

11. ภาคผนวก ระบุประวัติย่อ ที่อยู่ของคณะผู้วิจัย

รวมทั้ง รายละเอียดข้อมูลที่ต้องการแสดงประกอบเพิ่มเติมนอกเหนือจาก ส่วนผลการวิจัย เช่น ข้อมูลผลการทดลอง ผลการวิเคราะห์ ข้อมูล และค่าสถิติ แบบสอบถาม

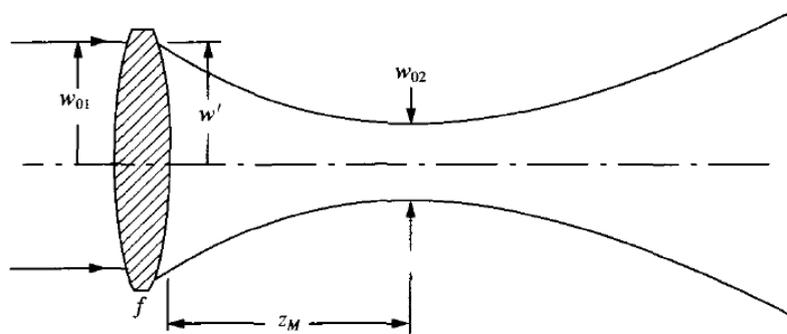
ภาคผนวก ก. ประวัติคณะผู้วิจัย

- ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นายอมรินทร์ รัตนะวิศ
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr. Amarin Ratanavis
- เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3 1201 00041 403
- ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์
- หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail)
ภาควิชาฟิสิกส์อุตสาหกรรมและอุปกรณ์การแพทย์, คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 1518 ถนนประชากรราษฎร์สาย
1 วงศ์สว่าง บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
- ประวัติการศึกษา
Ph.D., Optical science and Engineering, 2010
University of New Mexico, Albuquerque, New Mexico, USA
M.S., Optical science and Engineering, 2007
University of New Mexico, Albuquerque, New Mexico, USA
M.S., Physics, 2003
New Mexico State University, Las Cruces, New Mexico, USA
M.S., Physics, 2002
King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand
B.S. (hons), Industrial Physics and Medical Instrumentation, 1999
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Bangkok,
Thailand
- สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
เทคโนโลยีเลเซอร์และโฟโตนิกส์, เลเซอร์กำลังสูง, ทัศนศาสตร์แบบเชิงเส้น
และไม่เชิงเส้น, การทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยเลเซอร์, ทัศนศาสตร์ระดับไมโครและ
นาโน, ทัศนศาสตร์ควอนตัม, และเลเซอร์สเปกโตรสโคปี

ภาคผนวก ข. การโฟกัสลำแสงเลเซอร์สี่เหลี่ยมเพื่อทำให้ก๊าซไอโอดีนเกิดสถานะเลเซอร์แบบไม่มีกระจกสะท้อน

ลำแสงเลเซอร์สี่เหลี่ยมที่มีความยาวคลื่น 532 nm มีลักษณะเป็นลำแสงขนาน ในการกระตุ้นก๊าซไอโอดีน จำเป็นต้องโฟกัสลำแสง เพื่อเพิ่มลำแสงเลเซอร์ที่เข้ากระตุ้น ดังนั้นลักษณะและวิธีการการโฟกัสลำแสงจึงข้อคำนึงที่สำคัญและไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ การออกแบบระบบการโฟกัสลำแสงเลเซอร์ได้ใช้ทฤษฎีทางเลเซอร์ฟิสิกส์ ซึ่งกล่าวถึงการโฟกัสลำแสง

หากกำหนดให้ลำแสงที่ออกมาจากเลเซอร์ไดโอดมีขนาดรัศมี w_{01} ซึ่งเป็นลำแสงขนานและมีรัศมีความโค้งของหน้าคลื่นเป็นอินฟินิตี้ (∞) เมื่อลำแสงขนานผ่านเลนส์ที่มีความยาวโฟกัส f ลำแสงเลเซอร์จะถูกโฟกัสในตำแหน่ง z_M แสดงได้ดังภาพที่ 20 ซึ่งในตำแหน่งนี้ ลำแสงมีขนาดรัศมี w_{02} ซึ่งมีขนาดเล็กที่สุด และเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมในการกระตุ้นก๊าซไอโอดีน



ภาพที่ 20 การโฟกัสลำแสงเลเซอร์

จากหลักการทฤษฎีทางลำแสงเลเซอร์แบบเกาส์เซียน (Gaussian beam) เมตริกซ์ ABCD สามารถเขียนได้

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{z}{f} & z \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}$$

โดย z คือระยะทางหลังจากเลนส์และ f คือความยาวโฟกัสของเลนส์ ซึ่งเมตริกซ์เป็นผลคูณระหว่างเมตริกซ์ของที่ว่างในอากาศและเมตริกซ์ของเลนส์บาง

ที่ตำแหน่ง $z = 0, R_1 = \infty$ ค่าส่วนกลับของตัวแปรเชิงซ้อน (complex beam parameter) สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{1}{q_1} = -j \frac{\lambda}{\pi w_{01}^2} = -j \frac{1}{z_0}$$

และที่ตำแหน่ง z ใดๆ ค่าส่วนกลับของตัวแปรเชิงซ้อน สามารถเขียนได้คือ

$$\begin{aligned}
\frac{1}{q_2} &= \frac{1}{R_2} - j \frac{\lambda}{\pi \omega_2^2} = \frac{C + D/q_1}{A + B/q_1} \\
&= \frac{-\frac{1}{f} + \frac{1}{q_1}}{1 - \frac{z}{f} + \frac{z}{q_1}} = \frac{-\frac{1}{f} - \frac{j}{z_0}}{\left(1 - \frac{z}{f}\right) - j \frac{z}{z_0}} \\
&= \frac{-\left(\frac{1}{f} + \frac{j}{z_0}\right) \left(\left(1 - \frac{z}{f}\right) + j \frac{z}{z_0}\right)}{\left(1 - \frac{z}{f}\right)^2 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2} \\
&= \frac{-\left[\frac{1}{f}\left(1 - \frac{z}{f}\right) + j \frac{z}{f z_0} + \frac{j}{z_0}\left(1 - \frac{z}{f}\right) - \frac{z}{z_0^2}\right]}{\left(1 - \frac{z}{f}\right)^2 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2}
\end{aligned}$$

ซึ่งพบว่าค่าตัวแปรเชิงซ้อนประกอบด้วยจำนวนจริงและจำนวนเชิงซ้อน

$$\frac{1}{q_2} = \frac{-\left[\frac{1}{f}\left(1 - \frac{z}{f}\right) - \frac{z}{z_0^2} + j\left(\frac{1}{z_0}\left(1 - \frac{z}{f}\right) + \frac{z}{z_0 f}\right)\right]}{\left(1 - \frac{z}{f}\right)^2 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2}$$

และสามารถจัดรูปของค่าตัวแปรเชิงซ้อนในรูปแบบที่ง่ายขึ้น

$$\frac{1}{q_2} = \frac{-\frac{1}{f}\left(1 - \frac{z}{f}\right) + \frac{z}{z_0^2} - j \frac{1}{z_0}}{\left(1 - \frac{z}{f}\right)^2 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2}$$

ดังนั้นจากสมการของค่าตัวแปรเชิงซ้อน

$$\frac{1}{q_2} = \frac{1}{R_2} - j \frac{\lambda}{\pi \omega_2^2}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างหน้าคลื่นและขนาดลำแสงที่ตำแหน่ง z ใดๆ สามารถเขียนได้คือ

$$\frac{1}{R(z)} = \frac{\frac{z}{z_0^2} - \frac{1}{f} \left(1 - \frac{z}{f}\right)}{\left(1 - \frac{z}{f}\right)^2 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2}$$

และ

$$\frac{\lambda_0}{\pi \omega^2(z)} = \frac{\frac{1}{z_0}}{\left(1 - \frac{z}{f}\right)^2 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2}$$

จากผลของสมการดังกล่าว นำไปสู่ความสนใจในการหาตำแหน่งที่ขนาดรัศมีมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งสามารถทำได้โดย กำหนดให้ $z = z_M$ เป็นระยะที่มีขนาดของลำแสงเลเซอร์ต่ำที่สุด

$$\omega^2(z) = \left(\frac{\left(1 - \frac{z}{f}\right)^2 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2}{\frac{1}{z_0}} \right) \frac{\lambda_0}{\pi}$$

และทำการอนุพันธ์ค่าของรัศมีลำแสงกำลังสอง เทียบกับระยะทางและให้ผลจากการอนุพันธ์ดังกล่าว ให้มีค่าเท่ากับศูนย์

$$\begin{aligned} \frac{d\omega^2(z)}{dz} &= \left(\frac{2 \left(1 - \frac{z}{f}\right) \left(-\frac{1}{f}\right) + \frac{2z}{z_0^2}}{\frac{1}{z_0}} \right) \frac{\lambda_0}{\pi} = 0 \\ &= -\frac{2}{f} \left(1 - \frac{z}{f}\right) + \frac{2z}{z_0^2} = 0 \\ &= -\frac{2}{f} + \frac{2z}{f^2} + \frac{2z}{z_0^2} = 0 \\ &= -\frac{1}{f} + z \left(\frac{1}{f^2} + \frac{1}{z_0^2} \right) = 0 \end{aligned}$$

ดังนั้นเมื่อแก้สมการดังกล่าว

$$z = z_M = \frac{\frac{1}{f}}{\frac{1}{f^2} \left(1 + \frac{f^2}{z_0^2}\right)}$$

จะได้ตำแหน่งที่ขนาดลำแสงมีค่าน้อยที่สุด

$$z_M = \frac{f}{1 + \left(\frac{f}{z_0}\right)^2}$$

ซึ่งจะพบว่า

ถ้า

$$z_0 \gg f \quad z_M = f$$

โดยที่ค่าเรย์เลย์

$$z_0 = \frac{\pi \omega_0^2 n}{\lambda_0}$$

ดังนั้นขนาดของลำแสงเลเซอร์ ณ ตำแหน่ง z_M

$$\omega^2(z_M) = \frac{\left(\left(1 - \frac{z_M}{f}\right)^2 + \left(\frac{z_M}{z_0}\right)^2 \right) \frac{\lambda_0}{\pi n}}{\frac{1}{z_0}}$$

และในกรณีของ

$$z_M \approx f$$

ทำให้

$$\omega^2(z_M) = \frac{\lambda_0 f^2}{\pi n z_0}$$

และจากความสัมพันธ์

$$z_0 = \frac{\pi n \omega_{01}^2}{\lambda_0}$$

$$\omega^2(z_M) = \frac{\lambda_0 f^2}{\pi n \frac{\pi n \omega_{01}^2}{\lambda}}$$

ดังนั้นขนาดลำแสงที่น้อยที่สุดจึงมีค่าเท่ากับ

$$\omega(z_M) = \frac{\lambda_0 f}{\pi n \omega_{01}}$$

จากระบบเลเซอร์สี่เหลี่ยมที่ทำการทดลองในโครงการวิจัยนี้ มีคุณลักษณะดังต่อไปนี้

รัศมีลำแสงที่กระทบเลนส์

$$\omega_{01} = 0.5 \text{ mm}$$

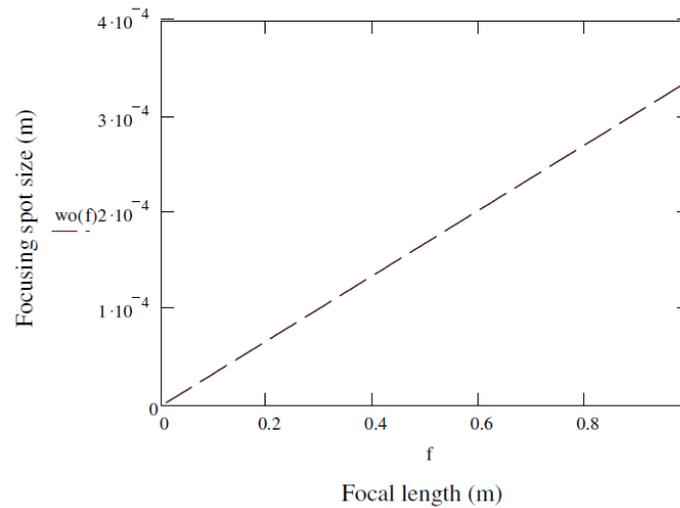
ความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ในสุญญากาศ

$$\lambda_0 = 532 \text{ nm}$$

ดัชนีหักเหของอากาศ

$$n = 1$$

ภาพที่ 21 แสดงการคำนวณค่าของลำแสงโฟกัสที่ความยาวโฟกัสของเลนส์ต่างๆ



ภาพที่ 21 ขนาดลำแสงโฟกัสที่ความยาวโฟกัสของเลนส์ต่างๆ

ภาคผนวก ค. ผลงานการเผยแพร่

ผลงานวิจัยนี้ได้ถูกนำเสนอแบบ oral presentation ในงานประชุมวิชาการฟิสิกส์วิศวกรรม ครั้งที่ (1 st Engineering Physics Conference) เมื่อวันที่ 25 ก.ค. 57 และเอกสารที่แนบมานี้ (อยู่ในหน้าถัดไป) เป็นผลงานตีพิมพ์ใน proceeding ของการประชุมวิชาการดังกล่าว