

ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์ไอรูบิเดียม ณ เส้นพลังงานD₂
ศึกษาโดยใช้เทคนิคการดูดกลืนพลังงานสองโฟตอน

EFFECT OF TEMPERATURE ON RUBIDIUM VAPOR CELL D₂ LINE
STUDIED BY TWO-PHOTON ABSORPTION SPECTROSCOPY

ณัฐ ธานบูรณ์รุ่งโรจน์
NUT THANABOONRUNGROCH

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2562

KMITL-2019-SC-M-030-017

ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์ไอรูบิเดียม ณ เส้นพลังงานD₂
ศึกษาโดยใช้เทคนิคการดูดกลืนพลังงานสองโฟตอน

EFFECT OF TEMPERATURE ON RUBIDIUM VAPOR CELL D₂ LINE
STUDIED BY TWO-PHOTON ABSORPTION SPECTROSCOPY

ณัฐ ธานบูรณ์รุ่งโรจน์
NUT THANABOONRUNGROCH

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2562

KMITL-2019-SC-M-030-017

EFFECT OF TEMPERATURE ON RUBIDIUM VAPOR CELL D₂ LINE
STUDIED BY TWO-PHOTON ABSORPTION SPECTROSCOPY

NUT THANABOONRUNGROCH

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS

DEPARTMENT OF PHYSICS

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2019

KMITL-2019-SC-M-030-017

COPYRIGHT 2019

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์ไอรูบิเดียม ณ เส้นพลังงาน D_2 ศึกษาโดยใช้เทคนิคการดูดกลืนพลังงานสองโฟตอน
Effect of temperature on rubidium vapor cell D_2 line studied by two-photon absorption spectroscopy

ชื่อนักศึกษา

นายณัฐ ธนบูรณ์รุ่งโรจน์

รหัสประจำตัว

59605080

ปริญญา

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชา

ฟิสิกส์

พ.ศ.

2561

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประธาน บุณศิริ

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดกลืนของไอรูบิเดียม ณ เส้นพลังงาน D_2 โดยใช้เทคนิคการดูดกลืนพลังงานแบบสองโฟตอน เซลล์ไอรูบิเดียมที่ใช้ในงานวิจัยคือเป็นรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวมีค่าเท่ากับ 25.65 มิลลิเมตร และ 82.12 มิลลิเมตร ตามลำดับ อุณหภูมิของเซลล์ไอรูบิเดียมจะมีค่าที่แตกต่างกันตั้งแต่อุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส โดยใช้แผ่นเพลเทียร์เป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนแก่เซลล์ไอรูบิเดียม และใช้เลเซอร์ไดโอดที่ความยาวคลื่น 778 นาโนเมตร เป็นแหล่งกำเนิดแสงสำหรับการดูดกลืนพลังงานสองโฟตอนของอะตอมรูบิเดียม สเปกตรัมการดูดกลืนของอะตอมรูบิเดียม ณ เส้นพลังงาน D_2 จะถูกบันทึกในช่วง 200-1100 นาโนเมตร ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียมที่อุณหภูมิสูงจะสามารถดูดกลืนพลังงานได้ดีกว่าอะตอมรูบิเดียมที่อุณหภูมิต่ำ

คำสำคัญ : เซลล์ไอรูบิเดียม เทคนิคการดูดกลืนพลังงานสองโฟตอน แผ่นเพลเทียร์
สเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม

Thesis Title	Effect of temperature on rubidium vapor cell D_2 line studied by two-photon absorption spectroscopy
Student Name	Mr.Nut Thanaboonrungrach
Student ID	59605080
Degree	Master of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Year	2018
Thesis Advisor	Dr.Witton Yindeesuk
Thesis Co-advisor	Asst.Dr.Prathan Buranasiri

Abstract

In this research, the effect of temperature on the absorption of rubidium vapor D_2 line was studied by Two-photon absorption spectroscopy. The diameter and length of cylindrical rubidium vapor cell used in this research are 25.65 mm and 82.12 mm, respectively. The temperature of rubidium was varied from room temperature to approximately 80 °C using a peltier-thermoelctric module. The laser diode at 778 nm was used as a light source for two-photon absorption spectroscopy. The absorption spectra of rubidium D_2 hyperfine transitions were recorded in the range of 200-1100 nm .The results show that the absorption peak at high temperature is higher than that of lower temperature.

Keywords : Rubidium vapor cell, Two-photon absorption technique, Peltier-thermoelctric, Rubidium spectra absorption line

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์เป็นอย่างดีจาก อาจารย์ ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาให้คำแนะนำและความรู้ รวมถึงความช่วยเหลือด้านต่างๆ รวมทั้งแนวทางการแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้น ในการทำวิทยานิพนธ์ เรื่อง “ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์โอรูบิเดียม ณ เส้นพลังงาน D₂ ศึกษาโดยใช้เทคนิคการดูดกลืนพลังงานสองโฟตอน” และ ขอขอบคุณ คำแนะนำทางด้านอุปกรณ์ทางแสงและการติดตั้งระบบการทดลองทางแสงจาก ผศ.ดร.ประธาน บุรณะศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ทำให้ข้าพเจ้าได้รับความรู้ ประสบการณ์เพิ่มเติมที่ดียิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ศ.ดร.พิเชษฐ ลิมสุวรรณ์ ให้คำปรึกษา อีกทั้งให้ความรู้และช่วยเหลือในการหาแนวทางการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ โครงการพัฒนากำลังคนทางด้านวิทยาศาสตร์ (ทุนเรียนดีวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย) สำหรับค่าใช้จ่ายในชีวิตประจำวัน ทุนการศึกษา งบประมาณในการดำเนินงานวิจัย งบประมาณการจัดอบรมทางวิชาการ

ขอขอบพระคุณหน่วยงานบัณฑิตศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับการสนับสนุนและอำนวยความสะดวกในด้านงานเอกสาร

ขอขอบพระคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกๆท่านของภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความรู้ในการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ข้าพเจ้านำความรู้พร้อมทั้งหลักการคิดวิเคราะห์ การแก้ปัญหาต่างๆ ตลอดระยะเวลา 2 ปีที่ผ่านมา เพื่อใช้ให้เกิดประโยชน์มากที่สุดแก่ตนเองและผู้อื่น

สุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และบุคคลในครอบครัวที่คอยให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้าน และให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าเสมอมา รวมถึงเพื่อนๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี

นายณัฐ ธนบุรณ์รุ่งโรจน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขต	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 หลักการและการทำงานของเลเซอร์ไดโอด.....	6
2.2 เทคนิคการดูดกลืนพลังงานสองโฟตอน(Two-photon Absorption Spectroscopy)9	9
2.3 การดูดกลืนและคายพลังงานของอะตอมรูบิเดียม.....	10
2.4 หลักการทำงานของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer).....	13
2.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	17
3.1 ศึกษาสมบัติของเซลล์ไอรูบิเดียม (Rubidium Vapor Cell).....	17
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	22
3.3 การติดตั้งและจัดระบบการทดลอง.....	29
3.4 ขั้นตอนการทดลองการศึกษาพฤติกรรมการดูดกลืนแสงเนื่องจากอุณหภูมิที่มีต่อ เซลล์ไอรูบิเดียม ณ เส้นพลังงาน D ₂	32
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	34
4.1 การควบคุมอุณหภูมิของเซลล์ไอรูบิเดียมจากแผ่นให้ความร้อนเพลเทียร์.....	34
4.2 ผลของสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานของไอรูบิเดียม ณ เส้นพลังงาน D ₂	35
4.3 ผลของความเข้มแสงของลำแสงจากการดูดกลืนพลังงานของไอรูบิเดียม ณ เส้นพลังงาน D ₂	40
4.4 ภาพแสดงการคายพลังงานของอะตอมรูบิเดียม เมื่ออะตอมรูบิเดียมมีการดูดกลืน พลังงาน ณ อุณหภูมิต่างๆ.....	52
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	54
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	54
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	55

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.3 งานวิจัยในอนาคต.....	56
เอกสารอ้างอิง	57
ภาคผนวก.....	59
ภาคผนวก ก	60
ประวัติผู้เขียน.....	68

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ลำดับและขั้นตอนการดำเนินงานช่วงที่ 1 ระหว่างเดือนมกราคม 2560 ถึงเดือน ธันวาคม 2560.....	3
1.2 ลำดับและขั้นตอนการดำเนินงานช่วงที่ 2 ระหว่างเดือนมกราคม 2561 ถึงเดือน ธันวาคม 2561.....	4
3.1 แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของธาตุรูบิเดียม.....	17
3.2 แสดงคุณสมบัติกายภาพของธาตุรูบิเดียม.....	18
3.2.1 แสดงคุณสมบัติกายภาพของธาตุรูบิเดียม (Rubidium 85).....	19
3.2.2 แสดงคุณสมบัติกายภาพของธาตุรูบิเดียม (Rubidium 87).....	19
3.3 แสดงการเปลี่ยนคุณสมบัติทางแสงของธาตุรูบิเดียม(Rubidium 85) ณ เส้นพลังงาน $D_2 (5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{3/2})$	20
3.4 แสดงการเปลี่ยนคุณสมบัติทางแสงของธาตุรูบิเดียม(Rubidium 87) ณ เส้นพลังงาน $D_2 (5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{3/2})$	20
3.5 แสดงคุณสมบัติอะตอมของธาตุรูบิเดียม.....	21
4.1 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมที่ให้แก่อานเพลเทียร์ ณ อุณหภูมิต่างๆ.....	34
4.2 แสดงความเข้มแสงจากระบบวัดการดูดกลืนพลังงานของไอรูบิเดียมที่อุณหภูมิ 23 °C.....	41
4.3 แสดงความเข้มของลำแสงที่ถูกดูดกลืนจากอะตอมรูบิเดียมที่อุณหภูมิ 23 °C.....	41
4.4 แสดงความเข้มแสงจากระบบวัดการดูดกลืนพลังงานของไอรูบิเดียมที่อุณหภูมิ 30 °C.....	42
4.5 แสดงความเข้มของลำแสงที่ถูกดูดกลืนจากอะตอมรูบิเดียมที่อุณหภูมิ 30 °C.....	42
4.6 แสดงความเข้มแสงจากระบบวัดการดูดกลืนพลังงานของไอรูบิเดียมที่อุณหภูมิ 40 °C.....	43
4.7 แสดงความเข้มของลำแสงที่ถูกดูดกลืนจากอะตอมรูบิเดียมที่อุณหภูมิ 40 °C.....	43
4.8 แสดงความเข้มแสงจากระบบวัดการดูดกลืนพลังงานของไอรูบิเดียมที่อุณหภูมิ 50 °C.....	44
4.9 แสดงความเข้มของลำแสงที่ถูกดูดกลืนจากอะตอมรูบิเดียมที่อุณหภูมิ 50 °C.....	45
4.10 แสดงความเข้มแสงจากระบบวัดการดูดกลืนพลังงานของไอรูบิเดียมที่อุณหภูมิ 60 °C.....	45
4.11 แสดงความเข้มของลำแสงที่ถูกดูดกลืนจากอะตอมรูบิเดียมที่อุณหภูมิ 60 °C.....	46
4.12 แสดงความเข้มแสงจากระบบวัดการดูดกลืนพลังงานของไอรูบิเดียมที่อุณหภูมิ 70 °C.....	47
4.13 แสดงความเข้มของลำแสงที่ถูกดูดกลืนจากอะตอมรูบิเดียมที่อุณหภูมิ 70 °C.....	47
4.14 แสดงความเข้มแสงจากระบบวัดการดูดกลืนพลังงานของไอรูบิเดียมที่อุณหภูมิ 80 °C.....	48
4.15 แสดงความเข้มของลำแสงที่ถูกดูดกลืนจากอะตอมรูบิเดียมที่อุณหภูมิ 80 °C.....	48
4.16 แสดงผลต่างเฉลี่ยของความเข้มของลำแสงก่อนผ่านและหลังผ่านเข้าสู่เซลล์ไอ รูบิเดียมกับอุณหภูมิของเซลล์ไอรูบิเดียม ณ อุณหภูมิต่างๆ.....	49

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กลไกสเปกโตรเมทรีการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของอะตอมหรือโมเลกุล.....	7
2.2 องค์ประกอบสำคัญของเลเซอร์.....	8
2.3 โครงสร้างภายในของเลเซอร์ไดโอด.....	8
2.4 ลักษณะหัวของเลเซอร์ไดโอด.....	9
2.5 แผนภาพระดับชั้นพลังงานของอะตอมรูบิเดียม(ซ้าย) และแผนภาพระดับชั้นพลังงานไอโซโทปของรูบิเดียม ⁸⁵ Rb และ ⁸⁷ Rb (ขวา).....	10
2.6 แสงที่ตกกระทบกับวัสดุ.....	11
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืน (Absorbance) กับ ค่าการส่องผ่าน (Transmittance)....	12
2.8 ปริมาณแสงที่ฉายผ่านมายังวัสดุและปริมาณแสงที่ถูกส่องผ่านออกมา.....	12
2.9 แสดงส่วนประกอบของสเปกโตรมิเตอร์ รุ่น Avantes Avaspec-EDU.....	13
2.10 แสดงระบบการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ (Detector).....	14
3.1 ลักษณะของธาตุรูบิเดียม.....	17
3.2 ก. สเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer).....	22
3.2 ข. สายใยแก้วนำแสง.....	22
3.3 หัวเลเซอร์ไดโอด.....	22
3.4 ระบบความร้อนควบคุมความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอด.....	23
3.5 มิเตอร์วัดกำลังความเข้มแสง (Power meter).....	23
3.6 กระจกสะท้อนแสง (Mirror).....	24
3.7 ก. ตัวแยกลำแสง (Beam Splitter).....	24
3.7 ข. ทิศทางเมื่อลำแสงผ่านเข้าไปในตัวแยกลำแสง.....	24
3.8 กล้องดิจิทัล (Digital Camera).....	25
3.9 แผ่นโพลาไรเซอร์ (Polarizer).....	25
3.10 ก. แผ่นสะท้อนรังสีอินฟราเรด.....	26
3.10 ข. ช่วงการดูดกลืนและการปล่อยพลังงานของแผ่นสะท้อนรังสีอินฟราเรด.....	26
3.11 เซลล์ไอรูบิเดียม (Rubidium Vapor Cell).....	26
3.12 ก. ระบบให้ความร้อนแก่เซลล์ไอรูบิเดียม.....	27
3.12 ข. แผ่นเพลเทียร์ (Peltier).....	27
3.13 โมดูลควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller).....	27
3.14 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply).....	28
3.15 อุปกรณ์นำความร้อน.....	28
3.16 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermometer).....	29
3.17 แสดงการจัดอุปกรณ์การทดลองเพื่อพฤติกรรมการณ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์ไอรูบิเดียม ณ เส้นพลังงาน D ₂	30
3.18 แสดงแผนภาพการจัดอุปกรณ์การทดลองเพื่อพฤติกรรมการณ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์ไอรูบิเดียม ณ เส้นพลังงาน D ₂ ดังแสดงในรูปที่ 3.17.....	30

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม ณ อุณหภูมิ 23 °C.....	35
4.2 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม ณ อุณหภูมิ 30 °C.....	36
4.3 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม ณ อุณหภูมิ 40 °C.....	36
4.4 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม ณ อุณหภูมิ 50 °C.....	37
4.5 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม ณ อุณหภูมิ 60 °C.....	37
4.6 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม ณ อุณหภูมิ 70 °C.....	38
4.7 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม ณ อุณหภูมิ 80 °C.....	38
4.8 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม ณ อุณหภูมิ 23, 30, 40, 50, 60, 70 และ 80 °C.....	39
4.9 แสดงจุดสูงสุดของการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียมที่ไอโซโทป 85 (⁸⁵ Rb) และไอโซโทป 87 (⁸⁷ Rb) กับอุณหภูมิต่างๆ.....	40
4.10 แสดงค่าเฉลี่ยของความเข้มของลำแสงก่อนผ่านและหลังผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียม กับอุณหภูมิของเซลล์ไอรูบิเดียม ณ อุณหภูมิต่างๆ.....	50
4.11 แสดงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม ณ อุณหภูมิต่างๆ.....	51
4.12 เซลล์ไอรูบิเดียมที่อุณหภูมิ 23 °C (ไม่มีการคายพลังงานของอะตอมรูบิเดียม).....	52
4.13 การคายพลังงานของอะตอมรูบิเดียมที่ อุณหภูมิ 23 °C.....	52
4.14 การคายพลังงานของอะตอมรูบิเดียมที่ อุณหภูมิ 30 °C.....	52
4.15 การคายพลังงานของอะตอมรูบิเดียมที่ อุณหภูมิ 40 °C.....	52
4.16 การคายพลังงานของอะตอมรูบิเดียมที่ อุณหภูมิ 50 °C.....	53
4.17 การคายพลังงานของอะตอมรูบิเดียมที่ อุณหภูมิ 60 °C.....	53
4.18 การคายพลังงานของอะตอมรูบิเดียมที่ อุณหภูมิ 70 °C.....	53
4.19 การคายพลังงานของอะตอมรูบิเดียมที่ อุณหภูมิ 80 °C.....	53
5.1 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม ณ อุณหภูมิ 23, 30, 40, 50, 60, 70 และ 80 °C.....	54

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในด้านต่างๆ ได้มีการพัฒนาและมีบทบาทสำคัญอย่างมากในชีวิตประจำวัน การพัฒนาองค์ความรู้และเทคโนโลยีใหม่นั้น ยังคงต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับความรู้พื้นฐานของศาสตร์นั้นๆ ให้ลึกซึ้ง หากจะกล่าวถึงเทคโนโลยีของเลเซอร์ เลเซอร์ได้มีการพัฒนาเป็นอย่างมากทำให้เลเซอร์นั้นมีราคาถูกและมีคุณภาพดีขึ้น เมื่อเลเซอร์มีคุณภาพดีแล้วนั้น จึงนำคุณสมบัติเฉพาะตัวของเลเซอร์มาประยุกต์ด้านต่างๆ มากมาย เช่น การใช้เลเซอร์ด้านการแพทย์ เลเซอร์ถูกนำมาใช้ในการผ่าตัดและรักษาทางด้านการแพทย์และจักษุ การใช้เลเซอร์ด้านสื่อสารโทรคมนาคม การใช้เลเซอร์ด้านการสร้างภาพสามมิติ การใช้เลเซอร์ในการวัด นับ ทดสอบ ตรวจสอบการควบคุม ทั้งในกระบวนการผลิตและในงานวิทยาศาสตร์ แต่เลเซอร์ยังมีข้อจำกัดบางประการคือ ความยาวคลื่นแสงที่ออกมาจากของเลเซอร์นั้นยังไม่มีควมเสถียรดังนั้น การรักษาเสถียรภาพความยาวคลื่นของเลเซอร์ให้มีความคงที่และแม่นยำได้นั้น จะต้องอาศัยหลักการพื้นฐานทางฟิสิกส์มาเป็นส่วนประกอบของการพัฒนา ส่วนประกอบที่สำคัญของการควบคุมความเสถียรภาพความยาวคลื่นของเลเซอร์ คือ เซลล์ไอของธาตุต่างๆ ซึ่งเซลล์ไอของธาตุแต่ละชนิดนั้นจะเป็นตัวที่ควบคุมความยาวคลื่นที่ออกมาจากเลเซอร์ เพราะมีสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานที่กำหนดไว้อย่างชัดเจนและเซลล์ไอของธาตุแต่ละชนิดนั้นจะมีการดูดกลืนความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน เสถียรภาพความยาวคลื่นของเลเซอร์นั้นมีประโยชน์ในหลายด้าน เช่น ด้านมาตรวิทยา ด้านทางการแพทย์ ด้านเทคโนโลยีระบบสารสนเทศ ด้านการวิเคราะห์โครงสร้างของอะตอมหรือโมเลกุล

หากจะกล่าวถึง การวิเคราะห์โครงสร้างของอะตอมหรือโมเลกุล เพื่อที่จะทราบปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับธาตุนั้น เทคนิคทางแสงที่ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์ คือ เทคนิคการดูดกลืนพลังงานแบบอิ่มตัว (Saturated Absorption Spectroscopy) เป็นเทคนิคทางกรวัดที่มีความละเอียดสูง แต่มีข้อบกพร่องบางส่วน คือ ในส่วนของการนำมาใช้ในการกระตุ้นอะตอมของธาตुरुบิเดียมให้มีการดูดกลืนพลังงาน และปล่อยแสงออกมานั้น ต้องใช้เลเซอร์ 2 ตัว ที่มีความยาวคลื่น 776 nm และ 780 nm ในการกระตุ้น และต้องใช้ตัวแปลงสัญญาณที่แปลงสัญญาณทางแสงเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า (Detector) และแสดงผลสเปกตรัมของการดูดกลืนพลังงานโดยเครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) เทคนิคนี้มีการใช้อุปกรณ์ทางแสงที่มาก ทำให้การใช้เทคนิคนี้มีราคาที่สูง ถัดมาซึ่งเป็นเทคนิคที่พัฒนาขึ้นมาจากการดูดกลืนพลังงานแบบอิ่มตัว เพื่อให้ผลการวัดมีความละเอียดดียิ่งขึ้น คือ เทคนิคการดูดกลืนพลังงานแสงสองโฟตอน เทคนิคนี้การกระตุ้นอะตอมของธาตुरुบิเดียมให้มีการดูดกลืนพลังงาน และปล่อยแสงออกมานั้น สามารถใช้ความยาวคลื่น 778 nm เพียงความยาวคลื่นเดียว ซึ่งผู้วิจัยได้ดัดแปลงเทคนิค

การดูดกลืนพลังงานแสงสองโฟตอน ให้มีความเหมาะสมกับห้องทดลอง และเทคนิคนี้มีราคาที่ถูกลง

สำหรับวิทยานิพนธ์เรื่องนี้จะศึกษาถึง ปรากฏการณ์การดูดกลืนพลังงานแสงของเซลล์ไอของธาตुरुบิเดียม ณ เส้นพลังงาน D_2 รูบิเดียมจะดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 778 nm โดยความยาวคลื่นนี้สามารถกระตุ้นได้ถึง 2 ระดับชั้นพลังงาน และทำการปล่อยแสงออกมาที่ความยาวคลื่น 420 nm โดยจะทำการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่เซลล์ไอรูบิเดียม โดยจะให้อุณหภูมิตั้งแต่ อุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 80

องศาเซลเซียส ซึ่งจะทำการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนของเซลล์โอรูบิเดียม ณ เส้นพลังงาน D_2 โดยใช้เทคนิคการดูดกลืนพลังงานแสงสองโฟตอน จากการศึกษาจะทำให้ทราบถึงผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อปรากฏการณ์การดูดกลืนพลังงานและได้ทราบถึงความรู้พื้นฐานของธาตุรูบิเดียมให้ดียิ่งขึ้น เพื่อที่จะนำไปพัฒนาความเสถียรภาพความยาวคลื่นของเลเซอร์ให้มีประสิทธิภาพดีที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติและลักษณะทางกายภาพของเซลล์โอรูบิเดียม
- 1.2.2 เพื่อศึกษาเทคนิคการวัดแบบการดูดกลืนพลังงานแสงสองโฟตอน (Two-photon Absorption Spectroscopy) จากเลเซอร์ไดโอด
- 1.2.3 เพื่อศึกษาปรากฏการณ์การดูดกลืนพลังงานแสงเนื่องจากอุณหภูมิที่มีผลต่อเซลล์โอรูบิเดียม ณ เส้น พลังงาน D_2

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาค้นคว้า ทบทวนบทความวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการดูดกลืนพลังงานแสง เนื่องจากอุณหภูมิที่มีผลต่อเซลล์โอรูบิเดียม ณ เส้นพลังงาน D_2
- 1.3.2 วัดการดูดกลืนพลังงานแสงเนื่องจากอุณหภูมิที่มีผลต่อเซลล์โอรูบิเดียม ณ เส้นพลังงาน D_2 โดย วิธีการวัดแบบเทคนิคการดูดกลืนพลังงานแสงสองโฟตอน (Two-photon Absorption Spectroscopy) จาก เลเซอร์ไดโอดในย่านความยาวคลื่น อินฟราเรดที่ความยาวคลื่นประมาณ 778 nm
- 1.3.3 ตรวจสอบการดูดกลืนพลังงานแสงของเซลล์โอรูบิเดียม ณ เส้นพลังงาน D_2 ที่ถูกกระตุ้นจากเลเซอร์ไดโอด โดยใช้เครื่องวัดสเปกโทรมิเตอร์ และมิเตอร์วัดกำลังของแสง และการคายพลังงานปล่อยแสงของเซลล์โอรูบิเดียมจากกล้องดิจิตอล

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ลำดับและขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยนั้นได้ถูกนำมาเรียบเรียงลำดับเหตุการณ์สำคัญในลักษณะของตาราง ซึ่งแสดงดังตารางที่ 1.1 และ 1.2 ด้านล่างนี้

ตารางที่ 1.1 ลำดับและขั้นตอนการดำเนินงานช่วงที่ 1 ระหว่างเดือนมกราคม 2560 ถึงเดือนธันวาคม 2560

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลาการดำเนินงานปี 2560											
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
1. กำหนดเค้าโครงวิทยานิพนธ์พร้อมแลกเปลี่ยนข้อคิดเห็น	■	■										
2. ค้นคว้าในส่วนของทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการดูดกลืนพลังงานแสงของรูบิเดียม และคุณสมบัติทางกายภาพของธาตุรูบิเดียม		■	■									
3. ค้นคว้าเทคนิควิธีการวัดคุณสมบัติของธาตุด้วยวิธีการทางแสง คือ เทคนิคการวัดแบบการดูดกลืนพลังงานแสงสองโฟตอน (Two-photon Absorption Spectroscopy)				■	■							
4. สร้างและติดตั้งระบบการวัดแบบการดูดกลืนพลังงานแสงสองโฟตอน (Two-photon Absorption Spectroscopy)					■	■	■					
5. ค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงเนื่องจากอนุกรมของเซลล์ไอรูบิเดียม ณ เส้นพลังงาน D ₂							■	■				
6. สร้างระบบให้ความร้อนแก่เซลล์ไอรูบิเดียม								■	■	■		
7. ทดสอบระบบให้ความร้อนแก่เซลล์ไอรูบิเดียม										■	■	
8. นำระบบให้ความร้อนแก่เซลล์ไอรูบิเดียมติดตั้งกับระบบการวัดแบบการดูดกลืนพลังงานแสงสองโฟตอน												■

ตารางที่ 1.2 ลำดับและขั้นตอนการดำเนินงานช่วงที่ 2 ระหว่างเดือนมกราคม 2561 ถึงเดือนธันวาคม 2561

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลาการดำเนินงานปี 2561					
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค. - พ.ย.	ธ.ค.
1.เสนอหัวข้อและเค้าโครงวิทยานิพนธ์	■					
2.วัดสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงของไอรูบิเดียม ณ เส้นพลังงาน D ₂ ที่อุณหภูมิ 23, 30, 40, 50, 60, 70 และ 80 °C		■	■			
3.วัดกำลังของแสงทั้ง 5 จุด ที่กำหนดในการทดลอง		■	■			
4.วิเคราะห์ผลสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงเนื่องจากอุณหภูมิของไอรูบิเดียม ณ เส้นพลังงาน D ₂			■	■		
5.วิเคราะห์ผลกำลังของแสงทั้ง 5 จุด			■	■		
6.นำเสนอผลงานวิจัยในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ				■		
7.สรุปผลการดำเนินวิจัย					■	
8.สอบวิทยานิพนธ์						■

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

- 1.5.1 สามารถอธิบายสมบัติและลักษณะทางกายของไอรูบิเดียมได้
- 1.5.2 สามารถอธิบายหลักการเทคนิคการวัด และการติดตั้งอุปกรณ์การทดลองแบบการดูดกลืนพลังงานแสงสองโฟตอน (Two-photon Absorption Spectroscopy)
- 1.5.3 สามารถอธิบายถึงสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงเนื่องจากอนุกรมที่มีผลต่อไอรูบิเดียม ณ เส้นพลังงาน D_2 ได้
- 1.5.4 สามารถออกแบบการทดลอง เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่มีประสิทธิภาพ
- 1.5.5 สามารถนำผลการทดลองที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับงานอื่นๆได้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

การศึกษาพฤติกรรมการดูดกลืนแสงเนื่องจากอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์โอรูบิเดียม ณ เส้นพลังงาน D_2 ศึกษาโดยใช้เทคนิคการดูดกลืนพลังงานสองโฟตอน จะเกี่ยวข้องกับทฤษฎีต่างๆ ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังนี้

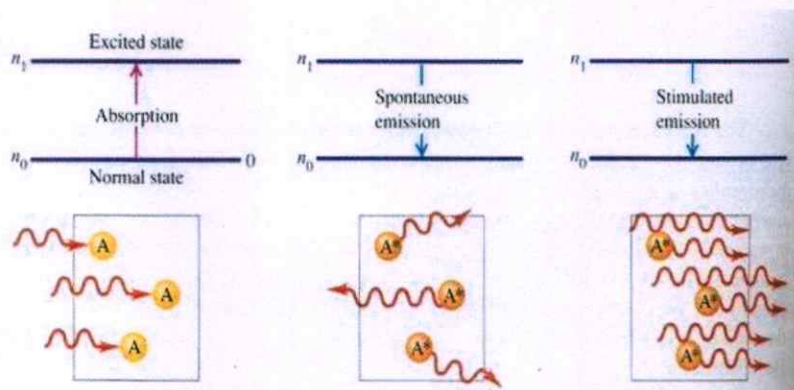
1. หลักการและการทำงานของเลเซอร์ไดโอด
2. เทคนิคการดูดกลืนพลังงานสองโฟตอน (Two-photon Absorption Spectroscopy)
3. การดูดกลืนและคายพลังงานของอะตอมรูบิเดียม
4. หลักการทำงานของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer)

2.1 หลักการและการทำงานของเลเซอร์ไดโอด

"เลเซอร์" เป็นคำทับศัพท์ จากภาษาอังกฤษ คือ ซึ่งเป็นคำย่อของ "LASER" "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" มีความหมายว่า การแผ่รังสีของการเปล่งแสงแบบถูกเร้า ด้วยการขยายสัญญาณแสง กลไกสำคัญของเลเซอร์ มี 2 กลไกสำคัญคือ การเปล่งแสงแบบถูกเร้า และการขยายสัญญาณแสง กลไกทั้งสองนี้ เป็นสาเหตุที่ทำให้เลเซอร์มีคุณสมบัติพิเศษต่างๆ ในส่วนของเลเซอร์ไดโอดนั้นเป็นเลเซอร์ประเภทหนึ่งที่มีโครงสร้างแบบไดโอด ซึ่งหลักการการเกิดแสงของเลเซอร์ไดโอดจะมีลักษณะคล้ายกับการเกิดแสงของไดโอดเปล่งแสง แต่เลเซอร์ไดโอดจะเกิดขึ้นได้จากการฉีดกระแสไฟฟ้าเข้าไป เลเซอร์ไดโอดเป็นเลเซอร์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ ซึ่งทำจากสารประกอบ เช่น GaAs (แกลเลียมอาร์เซไนด์) GaAlAs (แกลเลียมอะลูมิเนียมอาร์เซไนด์) ซึ่งจะมีค่าแถบพลังงานต่างกัน จึงเป็นตัวกำหนดค่าความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์

หลักการการทำงานของเลเซอร์ไดโอด

กลไกปฏิกิริยาการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของอะตอมหรือโมเลกุลหลายๆที่ทำให้เกิดเลเซอร์ได้ มีทั้งหมด 3 กลไก คือ 1. การดูดกลืนแสง (Absorption) 2. การเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง (Spontaneous Emission) 3. การเปล่งแสงแบบถูกเร้า (Stimulated Emission) แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กลไกปฏิกิริยาการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของอะตอมหรือโมเลกุล

กลไกนี้จะเกี่ยวข้องกับชั้นพลังงานของระบบอะตอมหรือโมเลกุล โดยที่ชั้นพลังงานที่เกี่ยวข้องจะมี 2 ชั้นพลังงานคือ ชั้นพลังงานต่ำ หรือชั้นพลังงานระดับสถานะพื้น (E_1) และอีกชั้นหนึ่งคือ ชั้นพลังงานสถานะการกระตุ้น (E_2) โดยปกติทั่วไปอะตอมจะอยู่ที่ชั้นพลังงานระดับสถานะพื้น เพราะเป็นชั้นพลังงานที่มีความเสถียรภาพ กลไกแรกเริ่มจากปรากฏการณ์การดูดกลืนแสง เป็นปรากฏการณ์ที่มีการให้พลังงานแก่อะตอม หรือโมเลกุล โดยที่พลังงานที่ให้ไปนั้นมีค่าระหว่างผลต่างของชั้นพลังงานสถานะพื้นกับสถานะการกระตุ้น ($E_2 - E_1$) เมื่ออะตอมหรือโมเลกุล ถูกกระตุ้นขึ้นไปยังชั้นพลังงานสถานะการกระตุ้น เมื่อเวลาผ่านไปอะตอมหรือโมเลกุล จะตกลงมายังชั้นพลังงานสถานะเช่นเดิม เนื่องจากชั้นพลังงานสถานะการกระตุ้นเป็นชั้นพลังงานที่ไม่เสถียรภาพ การตกลงมาของอะตอมหรือโมเลกุล จะเกิดการคายพลังงานแสงออกมาหรือเปล่งแสง ซึ่งจะมีค่าเท่ากับพลังงานที่อะตอมหรือโมเลกุลมีการดูดกลืนตั้งแต่ครั้งแรก การเปล่งแสงเช่นนี้เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติของอะตอม และโมเลกุลนั้นๆ การเปล่งแสงออกมานี้จะเรียกว่า ปรากฏการณ์การเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง (Spontaneous Emission)

การเปล่งแสงแบบถูกเร้า (Stimulated Emission) ซึ่งเป็นกลไกหลักของการเกิดเลเซอร์ จะเป็นการนำกลไกของการดูดกลืนและการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเองมาประยุกต์ แต่กลไกนี้จะแตกต่างจากจากกลไกที่กล่าวมาแล้วข้างต้น คือ ซึ่งจะเริ่มต้นจากการดูดกลืนแสง เพื่อให้อะตอมหรือโมเลกุล ถูกกระตุ้นให้ขึ้นไปสู่ชั้นพลังงานสถานะการกระตุ้น แทนที่จะให้อะตอมหรือโมเลกุลตกลงมาเอง จะมีการกระตุ้นด้วยการฉายแสงเข้าไปในอะตอมหรือโมเลกุล โดยแสงที่ฉายเข้าไบนั้นจะมีพลังงานเท่ากับผลต่างของชั้นพลังงานสถานะพื้นกับสถานะการกระตุ้น ($E_2 - E_1$) ซึ่งอะตอมหรือโมเลกุลจะไม่ดูดกลืนแสงเหล่านี้ เพียงแค่จะกระตุ้นให้อะตอมหรือโมเลกุลคายพลังงานออกมาก่อนเวลา แสงที่กระตุ้นและแสงที่เปล่งออกมาจากอะตอมหรือโมเลกุลจะออกมาพร้อมกัน มีพลังงานเท่ากัน ทั้งทิศทางเคลื่อนที่และเฟสของคลื่นแสง

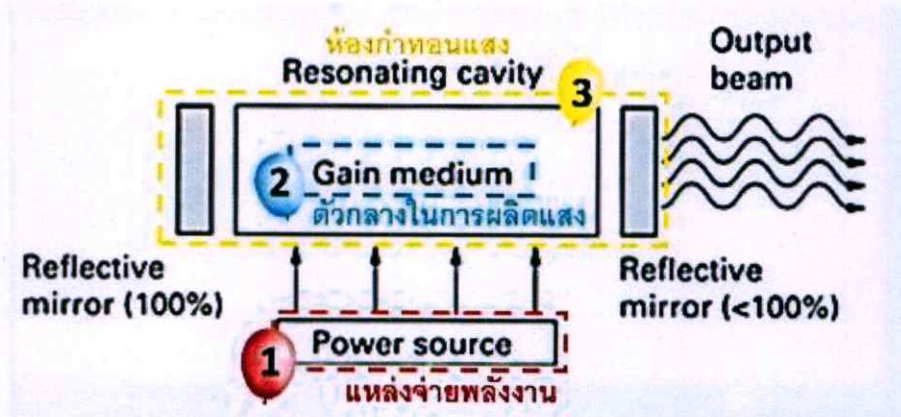
การขยายสัญญาณแสง (Light Amplification)

เมื่อแสงที่ใช้ในการกระตุ้นมาเร้าในเนื้อวัสดุที่ใช้ในการเกิดเลเซอร์ โดยอะตอมหรือโมเลกุลของเนื้อวัสดุนั้นจะถูกเล้าให้อยู่ในสถานะกระตุ้น (Excited States) เมื่อแสงหรือที่เรียกว่า โฟตอน นั้นผ่านเข้ามาให้เนื้อวัสดุมากขึ้น จะเร้าให้เนื้อวัสดุมีการคายแสงมากขึ้น ความเข้มก็จะมากขึ้นตามลำดับ

องค์ประกอบของเลเซอร์

เลเซอร์โดยทั่วไปประกอบด้วยองค์ประกอบสำคัญ 3 ส่วน แสดงดังรูปที่ 2.2 ได้แก่

1. การปั๊มพลังงานให้แก่เนื้อวัสดุที่เป็นตัวกลางเลเซอร์ให้มีสภาพถูกกระตุ้น (Energy Pumping)
2. เนื้อวัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางเลเซอร์ (Laser Medium) เนื้อวัสดุนี้จะเป็นตัวกำหนดความยาวคลื่นแสงที่ออกมาจากเลเซอร์ ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดจะให้ความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน
3. แควิตี้แสงเพื่อขยายสัญญาณแสง การขยายสัญญาณแสงเพื่อที่จะทำให้จำนวนโฟตอนนั้นเพิ่มขึ้น โดยที่จะให้แสงวิ่งสะท้อนกลับไปกลับมาผ่านเนื้อวัสดุ การสะท้อนนั้นจะใช้กระจก 2 ชั้นที่วางขนานกัน แสงจะวิ่งสะท้อนไปมาจนมีจำนวนโฟตอนหรือความเข้มของแสงมากพอ ที่จะเกิดเกน (Gain) เอาชนะความสูญเสีย (Loss) ของระบบ และได้ลำแสงเลเซอร์พุ่งออกทางด้านกระจก ที่มีการสะท้อนแสงไม่ถึง 100 %

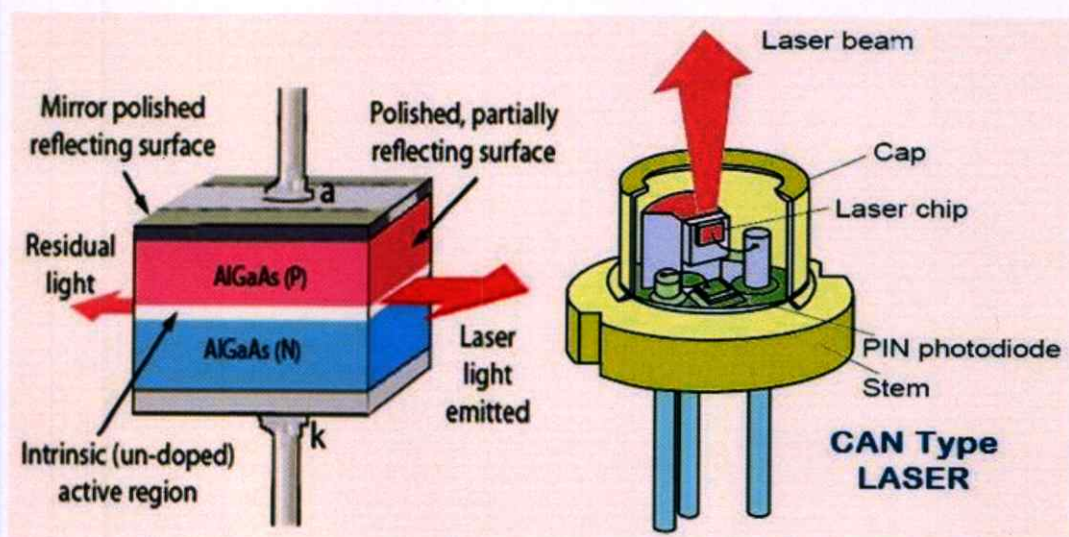


รูปที่ 2.2 องค์ประกอบสำคัญของเลเซอร์

โครงสร้างของเลเซอร์ไดโอด

เลเซอร์ไดโอดถูกสร้างจากการเจือสารกระตุ้น (Doping) จากสาร 2 ชนิด คือ สารชนิด n และสารชนิด p จะเป็นชั้นบางๆ ที่บนพื้นผิวของแผ่นเวเฟอร์ของผลึก ผลจากการเจือจะทำให้เกิดรอยต่อของสาร p-n หรือไดโอดนั่นเอง

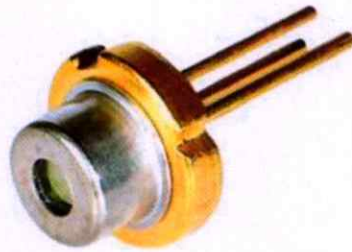
เลเซอร์ไดโอดแบบสารกึ่งตัวนำรอยต่อ p-n การไบแอสกระแสไฟฟ้าไปข้างหน้าข้ามผ่านเลเซอร์ไดโอดจะทำให้เกิดประจุไฟฟ้า 2 ชนิด คือ อิเล็กตรอนและโฮล ซึ่งจะ "ถูกฉีต" จากฝั่งของรอยต่อ โดยที่ทั้งสองตัวจะถูกฉีตคนละฝั่งของรอยต่อ p-n (โฮลจะถูกฉีตจากบริเวณของสารกึ่งตัวนำที่เป็นสารเจือชนิด P และอิเล็กตรอนจากบริเวณของสารเจือชนิด n) หลังจากนั้นจะเข้ามาในบริเวณเขตการพ่อง (บริเวณของการพ่องปราศจากประจุสื่อผ่านทางไฟฟ้าใด ๆ ในรูปแบบที่เป็นผลมาจากความแตกต่างทางความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิด n (n-type) และสารชนิด p (p-type)) การใช้การฉีตของประจุในการสร้างกำลังแก่เลเซอร์ไดโอดมากที่สุด



รูปที่ 2.3 โครงสร้างภายในของเลเซอร์ไดโอด

สำหรับโครงสร้างของเลเซอร์ไดโอดแสดงได้ดังรูปที่ 2.3 จะแสดงถึงส่วนประกอบภายในของ

เลเซอร์ประเภทนี้ ซึ่งประกอบด้วยส่วนหลักๆ คือ 1.แหล่งกำเนิดแสงของเลเซอร์ไดโอด (Laser Chip) ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ซึ่งแหล่งกำเนิดที่ต่างชนิดกันจะให้ความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่แตกต่างกัน 2.กระจกสะท้อนแสง ทำหน้าที่เพิ่มจำนวนโฟตอนหรือความเข้มแสง 3.ตัวถังภายนอก (Stem) เป็นส่วนฐานของหัวเลเซอร์ไดโอด 4.ตัวครอบแหล่งกำเนิดแสง (Cap) และรูปที่ 2.4 แสดงถึงหัวของเลเซอร์ไดโอดที่ใช้กันในปัจจุบัน



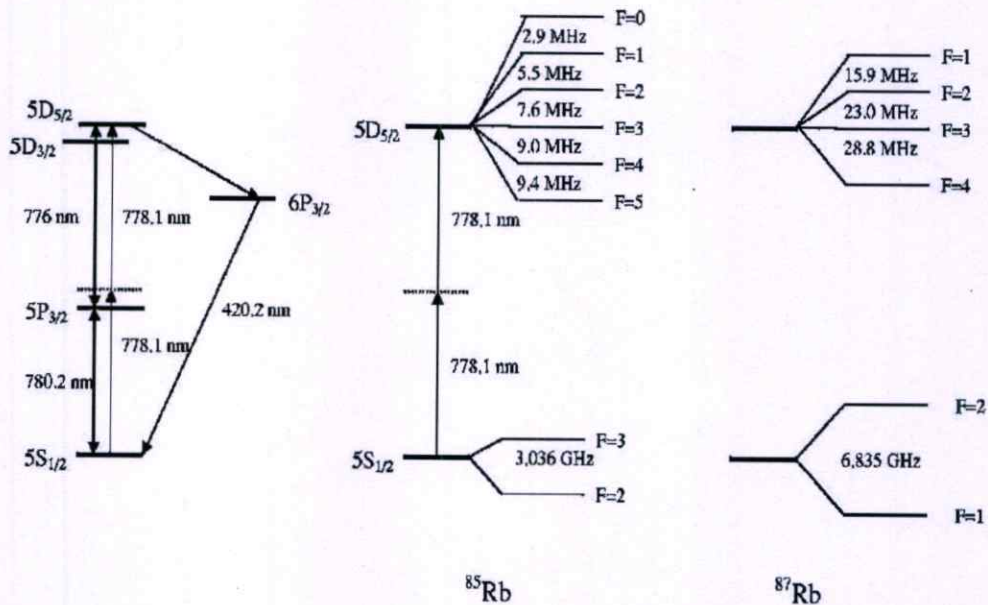
รูปที่ 2.4 ลักษณะหัวของเลเซอร์ไดโอด

เลเซอร์ไดโอด จะมีช่วงความกว้างของเส้นที่ต่ำกว่า 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งมีความแม่นยำเหมาะสมสำหรับการวัดค่าทางสเปกโทรสโคปี เลเซอร์ไดโอดมีเอาต์พุตของคลื่นแบบต่อเนื่อง มีประสิทธิภาพด้านไฟฟ้าและออปติคอลสูงประมาณ 35% เลเซอร์ไดโอดมีประสิทธิภาพและง่ายต่อการปรับแต่งช่วงความยาวคลื่น สามารถปรับความยาวคลื่นได้ช่วงความกว้างประมาณ 10-15 นาโนเมตร การเปลี่ยนความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอด สามารถปรับเปลี่ยนได้จากตัวแปรของกระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ให้แก่วัสดุแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ การเปลี่ยนกระแสไฟที่ฉีด จะทำการเปลี่ยนดัชนีการหักเหของวัสดุในพื้นที่การกระตุ้น เส้นทางของแสงในแควิตีที่มีก็จะการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย และอีกตัวแปรหนึ่งที่จะปรับเปลี่ยนความยาวคลื่นแสงได้ คือ อุณหภูมิมีผลต่อความยาวเส้นทางแสงของแควิตีและเส้นโค้งรับของวัสดุเซมิคอนดักเตอร์

2.2 ศึกษาเทคนิคการดูดกลืนพลังงานสองโฟตอน (Two-photon Absorption Spectroscopy)

การดูดกลืนพลังงานสองโฟตอน คือ การดูดกลืนโฟตอนที่มีความถี่เดียวกันหรือต่างกันเพื่อกระตุ้นอะตอมหรือโมเลกุลจากสถานะสถานะหนึ่ง (โดยทั่วไปคือสถานะพื้น) ให้เป็นสถานะถูกกระตุ้นที่มีพลังงานสูงขึ้น ความแตกต่างระหว่างระดับพลังงานของอะตอมหรือโมเลกุลที่สถานะพื้นและระดับสถานะถูกกระตุ้น จะเท่ากับผลรวมของพลังงานโฟตอนทั้งสองตัว การดูดกลืนพลังงานสองโฟตอนเป็นกระบวนการลำดับที่สอง เป็นกระบวนการดูดกลืนพลังงานแบบไม่เชิงเส้น และส่วนของกระบวนการที่มากกว่าลำดับที่สองจะมีขนาดการดูดกลืนพลังงานที่อ่อนกว่าการดูดกลืนพลังงานแบบเชิงเส้นที่ความเข้มแสงน้อย ความแตกต่างระหว่างการดูดกลืนพลังงานสองโฟตอนกับการดูดกลืนพลังงานแบบเชิงเส้น ตรงที่การดูดกลืนพลังงานสองโฟตอนขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงอะตอมเนื่องจากการดูดกลืนพลังงานสองโฟตอนขึ้นอยู่กับรากที่สองของความเข้มแสง และสามารถมีอิทธิพลมากกว่าการดูดกลืนพลังงานแบบเชิงเส้นที่ความเข้มสูง

เทคนิคการดูดกลืนพลังงานสองโฟตอน ส่วนมากจะถูกใช้ในการทำให้ความยาวคลื่นมีความเสถียรภาพและใช้ในการศึกษาถึงสมบัติทางกายภาพของอะตอม เทคนิคการดูดกลืนพลังงานสองโฟตอนที่นำมาใช้กับอะตอมรูบิเดียม คือ โดยปกติในการจะให้อะตอมของรูบิเดียมถูกดูดกลืนและปล่อยแสงออกมาได้นั้นจะต้องใช้ความยาวคลื่นสองความยาวคลื่น คือ 776 กับ 780 นาโนเมตร โดยที่ความยาวคลื่น 776 นาโนเมตร จะดูดกลืนพลังงานจากสถานะพื้น $5S_{1/2}$ สู่ระดับชั้นพลังงานสถานะการกระตุ้น $5P_{3/2}$ และใช้ความยาวคลื่น 780 นาโนเมตร ในการกระตุ้นจากระดับชั้นพลังงาน $5P_{3/2}$ สู่ระดับชั้นพลังงาน $5D_{5/2}$ แต่หากใช้เทคนิคการดูดกลืนพลังงานสองโฟตอนแบบที่มีความถี่เดียว จะใช้ความยาวคลื่นแค่ความยาวคลื่นเดียว คือ 778 นาโนเมตร ในการดูดกลืนสองระดับชั้นพลังงาน จากระดับชั้นพลังงานสถานะพื้น $5S_{1/2}$ สู่ระดับชั้นพลังงาน $5D_{5/2}$ เมื่ออะตอมอยู่ในระดับชั้นพลังงาน $5D_{5/2}$ ระดับพลังงานชั้นนี้จะเป็นชั้นที่ไม่เสถียร อะตอมจะตกลงสู่ระดับชั้นพลังงาน $6P_{3/2}$ และตกลงสู่ระดับพลังงานสถานะพื้นเป็นระดับต่อไป ซึ่งระดับพลังงานชั้นนี้จะเปล่งแสงที่มีความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แผนภาพระดับชั้นพลังงานของอะตอมรูบิเดียม (ซ้าย) และแผนภาพระดับชั้นพลังงานไอโซโทปของรูบิเดียม ^{85}Rb และ ^{87}Rb .

2.3 การดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม

กลไกการดูดกลืนแสง คือ กระบวนการที่พลังงานของแสงที่ถูกถ่ายเทไปยัง อะตอม หรือ โมเลกุล การดูดกลืนแสงของวัสดุจะมีการดูดกลืนได้ต้องมีพลังงานที่ทำให้อะตอมหรือโมเลกุล เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะจากสถานะปกติหรือสถานะพื้น (Ground State) ไปยังสถานะที่มีระดับพลังงานสูงกว่าหรือ สถานะกระตุ้น (Excited State) เรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ว่า การเปลี่ยนแปลงสถานะหรือการทรานสิชัน (Transition) การเปลี่ยนระดับพลังงานของอะตอมหรือโมเลกุลได้นั้น จะต้องใช้พลังงานที่น้อยที่สุดที่มีค่าเท่ากับ ผลต่างของระดับพลังงานระหว่างสถานะพื้นและสถานะกระตุ้น ($\Delta E = E_2 - E_1$) ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ ค่าคงที่ของพลังค์ (h) คูณกับ ความถี่ของแสงที่ใช้ในการกระตุ้น

(v) และเขียนได้ดังสมการที่ 2.1 ระดับชั้นพลังงานของอะตอมรูบิเดียมประกอบด้วย $5S_{1/2}$, $5P_{3/2}$, $5D_{5/2}$ และ $6P_{3/2}$. การดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียมจะเริ่มจากสถานะพื้น คือ $5S_{1/2}$ จะถูกกระตุ้นให้มีการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 778.1 นาโนเมตร อะตอมรูบิเดียมจะถูกกระตุ้นไปยังชั้นพลังงานสถานะสูงกว่า คือ ชั้น $5D_{5/2}$ พลังงานชั้นนี้จะไม่มีความเสถียรภาพ ดังนั้น เมื่อเวลาผ่านไปอะตอมจะตกมายังชั้นพลังงาน $6P_{3/2}$ และตกลงสู่ชั้นพลังงานสถานะพื้น ซึ่งการตกจากชั้นพลังงาน $6P_{3/2}$ ไปยัง $5S_{1/2}$ จะมีการคายพลังงานออกมาในรูปของแสงที่มีความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร ซึ่งสามารถดูระดับชั้นพลังงานจากที่กล่าวมาข้างต้นได้จากรูปที่ 2.5 และจากที่กล่าวมาข้างต้น การดูดกลืนพลังงานของอะตอมจะเป็นการกระตุ้นการดูดกลืนไปสองระดับชั้นพลังงานในการใช้เลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นเดียว ดังนั้นสมการผลต่างของระดับพลังงานระหว่างสถานะพื้นและสถานะกระตุ้น จะเขียนได้เป็นสมการที่ 2.2

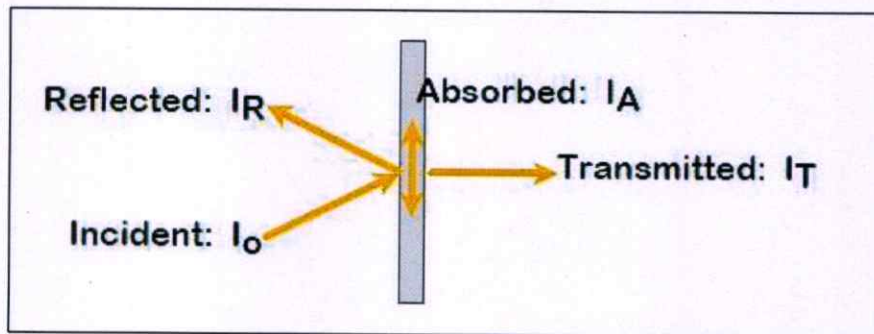
$$\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu \quad (2.1)$$

$$\Delta E = E_2 - E_1 = 2h\nu \quad (2.2)$$

เมื่อแสงมาตกกระทบที่วัสดุ (Incident) แสงจะมีการแยกออกได้เป็น 3 ส่วน การสะท้อน (Reflection) การดูดกลืน (Absorption) และ การส่องผ่าน (Transmission) ดังรูปที่ 2.6 และสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.3 และ 2.4 เมื่อแสงทั้ง 3 ส่วนรวมกันแล้วจะมีค่าเท่ากับแสงที่วัสดุตกกระทบของวัสดุ

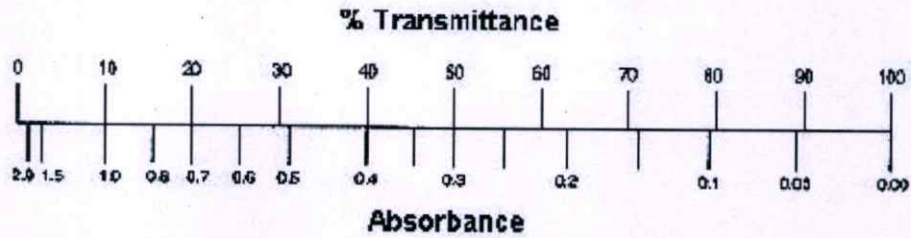
$$I_o = I_R + I_A + I_T \quad (2.3)$$

$$\frac{I_R}{I_o} + \frac{I_A}{I_o} + \frac{I_T}{I_o} = R + A + T = 1 \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.6 แสงที่ตกกระทบกับวัสดุ

การวิเคราะห์ถึงการดูดกลืนแสงที่ผ่านเข้ามาภายในวัสดุได้มากหรือน้อยเพียงใดนั้น ซึ่งเป็นไปตามกฎ เบียร์-แลมเบิร์ต (Lambert-Beer) ดังสมการที่ 2.5 สมการนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแสงที่ฉายผ่านมายังวัสดุและปริมาณแสงที่ถูกส่องผ่านออกมา และยังแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและค่าการส่องผ่าน ค่าทั้งสองนี้จะแปรผกผันซึ่งกันและกัน ดังแสดงในรูปตัวอย่างที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืน (Absorbance) กับ ค่าการส่องผ่าน (Transmittance)

$$A = \log \frac{I_{out}}{I_{in}} = -\log T \quad (2.5)$$

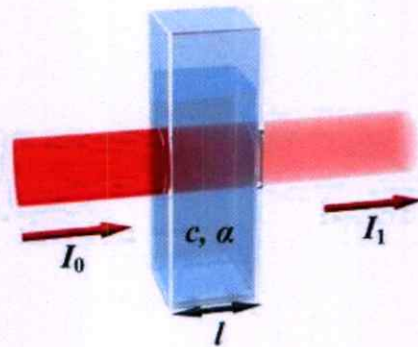
โดยที่ A คือ ค่าการดูดกลืนแสงของวัสดุ (Absorbance)

I_{out} คือ ปริมาณแสงที่ผ่านออกจากวัสดุ

I_{in} คือ ปริมาณแสงที่ผ่านเข้าไปในวัสดุ

T คือ ค่าการส่องผ่านของแสง (Transmittance)

หลังจากลำแสงเลเซอร์ผ่านวัสดุที่ดูดซับแสงได้ดี พบว่าจะมีการลดจำนวนของโฟตอน เนื่องจากการดูดกลืนแสงที่ความถี่สั่นพ้อง (Resonant) ความเข้มของลำแสงจะเป็นสัดส่วนกับจำนวนของโฟตอน ความเข้มของลำแสงที่ผ่านออกจากวัสดุจะขึ้นอยู่กับตัวแปร ความยาว (l) และสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสงของวัสดุ (α) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสงของวัสดุจะแปรผันกับฟังก์ชันของอุณหภูมิ (T) และความถี่ (ν) ความเข้มของลำแสงที่ผ่านออกจากวัสดุนั้นการลดลงจะเป็นการลดลงแบบฟังก์ชันเอกซโพเนนเชียล ตามที่ระบุไว้ในสมการที่ 2.6 และ 2.7 และจะยังคงเป็นไปตามกฎ เบียร์-แลมเบิร์ต (Lambert-Beer) เช่นเดิม



รูปที่ 2.8 ปริมาณแสงที่ฉายผ่านมายังวัสดุและปริมาณแสงที่ถูกส่องผ่านออกมา

$$I_1 = I_0 \exp[-\alpha(\nu, T)l] \quad (2.6)$$

$$\frac{n_1}{n_0} = \exp[-\alpha(\nu, T)l] \quad (2.7)$$

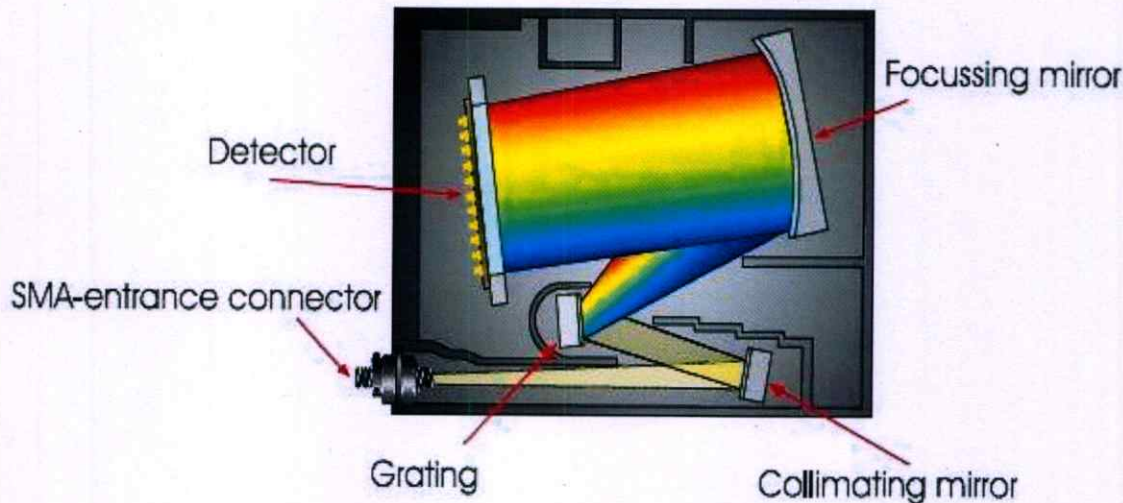
โดยที่ n_1 และ n_0 คือ จำนวนของโฟตอนหลังผ่านวัสดุและก่อนผ่านวัสดุตามลำดับ และถ้า หนึ่งอะตอมดูดกลืนพลังงานได้เพียงหนึ่งอะตอม จำนวนโฟตอนที่ถูกดูดกลืนจะสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.8

$$\Delta n = n_0 - n_1 \quad (2.8)$$

และเมื่อถึงจุดๆหนึ่งที่ จำนวนโฟตอนที่ถูกดูดกลืนมีค่ามากที่สุด อะตอมที่มีอยู่ทั้งหมดในวัสดุจะดูดกลืนโฟตอนและทำให้แสงไม่สามารถดูดกลืนเพิ่มได้อีก หรือที่เรียกว่าการอิ่มตัว

2.4 ศึกษาการทำงานของสเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer)

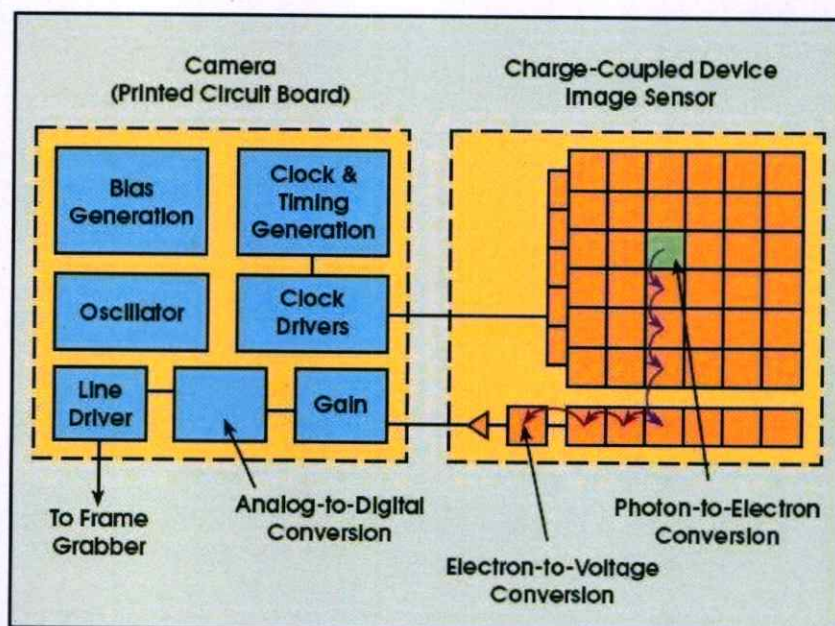
สเปกโตรมิเตอร์ คือเครื่องมือวัดเชิงแสงชนิดหนึ่ง สามารถใช้ในการตรวจสอบ หรือตรวจวัดคุณสมบัติเฉพาะของแสงได้แก่ สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยส่วนมากนำไปใช้ในการวิเคราะห์สเปกตรัม เพื่อระบุองค์ประกอบหรือชนิดของสสาร โดยส่วนใหญ่จะเกิดจากความเข้มของแสงที่แตกต่างกัน จะทำให้ผลการวัดที่แตกต่างกัน แต่บางทีก็อาจเกิดจากปรากฏการณ์โฟลาริชก็ได้ ตัวแปรอิสระได้แก่ ความยาวคลื่นของแสง ในการระบุหน่วยนั้นจะระบุเป็นหน่วยย่อยของเมตร เช่น นาโนเมตร ไมโครเมตร เป็นต้น หรือบางครั้งจะระบุเป็นสัดส่วนของพลังงานโฟตอน เช่น หมายเลขคลื่นหรือ อิเล็กตรอนโวลต์ และจะมีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่น เราใช้สเปกโตรมิเตอร์ในกระบวนการวิเคราะห์สเปกโทรสโกปี โดยสร้างเส้นสเปกตรัมขึ้น และตรวจวัดความยาวคลื่นกับความเข้ม สามารถวัดความยาวคลื่นได้ตั้งแต่น่านรังสีแกมมาถึงย่านรังสีอินฟราเรด ถ้าย่านความถี่ของคลื่นที่สนใจตกอยู่ในย่านของสเปกตรัมที่ตามองเห็น จะเรียกการศึกษาเช่นนั้นว่า Spectrophotometry สเปกโตรมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นสเปกโตรมิเตอร์รุ่น Avantes Avaspec-EDU มีส่วนประกอบหลักดังนี้ ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงส่วนประกอบของสเปกโตรมิเตอร์ รุ่น Avantes Avaspec-EDU

1. SMA-entrance Connector ทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างเส้นใยแก้วนำแสงที่จะนำแสงเข้าสู่เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ ชนิดหัวต่อเอสเอ็มเอ เป็นหัวน็อตหกเหลี่ยม
2. กระจกรวมแสง (Collimating Mirror) เป็นกระจกที่ทำหน้าที่รวมแสงที่มาจาก SMA-entrance Connector เพื่อสะท้อนเข้าสู่เกรตติง

3. เกรตติง (Grating) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบความยาวคลื่นของสเปกตรัมแสงโดยอาศัยคุณสมบัติการแทรกสอดของคลื่น ลักษณะของเกรตติงจะเป็นแผ่นกระจกที่ถูกแบ่งออกเป็นช่องขนานซึ่งอยู่ชิดกันมาก โดยมีขนาด 1 เซนติเมตร จะแบ่งออกเป็น 10,000 ช่อง
4. Focusing Mirror เป็นกระจกโฟกัสแสง
5. อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ (Detector) ทำหน้าที่ในการวัดความเข้มของลำแสงที่ถูกดูดกลืน โดยการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า Detector จะมีลักษณะเป็นวงจรรวม หรือที่เรียกว่า “ชิป” ซึ่งชิปเซ็นเซอร์นี้จะเป็นอุปกรณ์ Charge - Couple Devices หรือ CCD ซึ่งผลิตด้วยเทคโนโลยี Integrated Circuit Wafer ภายในจะประกอบด้วย Photosite ขนาดเล็กซึ่งมีความไวต่อแสงทำหน้าที่เป็นตัวรับแสง เมื่อแสงตกลงมาจะเกิดอิเล็กตรอนที่ผิวหน้า อิเล็กตรอนจะถูกดึงไปที่ Read Out Register แล้วส่งไปยัง Amplifier เพื่อขยายสัญญาณ จากนั้นจะถูกส่งไปยัง A/D Converter เพื่อแปลงสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นข้อมูลดิจิทัล การอ่านสัญญาณไฟฟ้าของ CCD จะอ่านทีละแถว โดยเริ่มจากแถวที่ใกล้กับ Read Out Register ก่อน เมื่ออ่านค่าเสร็จจะมีการลบข้อมูลของแถวนั้นแล้วอ่านของแถวลำดับต่อไป โดยอิเล็กตรอนจะกระโดดข้ามมาที่แถวเพื่อเข้าสู่ Read Out Register ที่แสดงดังภาพที่ 2.10 ชิปเซ็นเซอร์ CCD แต่วงจรจะมีหน้าที่รับแสงเพียงอย่างเดียว CCD จะมีอัตราส่วนสัญญาณต่อการรบกวนสูงกว่า ซึ่งก็คือมีสัญญาณรบกวนน้อย และจะทำให้มีความผิดพลาดในการอ่านค่าของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณมีประสิทธิภาพดีขึ้น CCD มีช่วงการรับแสงที่กว้าง คือสามารถรับแสงได้ตั้งแต่แสงเหนือม่วง (Ultraviolet - UV) ไปจนถึงแสงใต้แดง (Infrared - IR)



รูปที่ 2.10 แสดงระบบการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ (Detector)

2.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในหัวข้อนี้สรุปถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความเป็นมาของการนำเซลล์ไอรูบิเดียมมาศึกษาในรูปแบบต่าง ซึ่งจะสรุปได้ดังนี้

ในปี ค.ศ. 1993 Seung-Sub Kim และคณะ ได้มีการนำเลเซอร์ไดโอดที่ความยาวคลื่น 780.1 นาโนเมตร มาศึกษาเส้นสเปกตรัมโครงสร้างของอะตอมรูบิเดียม (^{85}Rb) ณ เส้นพลังงาน D_2 โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขต่างๆ คือ เซลล์รูบิเดียมที่ใช้จะหุ้มด้วยวัสดุที่ป้องกันสนามแม่เหล็กโลก และอีกชนิดหนึ่งคือ เซลล์รูบิเดียมที่ใช้จะไม่มีการหุ้มด้วยวัสดุที่ป้องกันสนามแม่เหล็กโลก โดยใช้เทคนิคการดักกลืนแสงแบบอิมมิตัว ผลการทดลองที่ได้คือเซลล์รูบิเดียมที่หุ้มด้วยวัสดุที่ป้องกันสนามแม่เหล็กโลก ณ เส้นพลังงาน D_2 พบว่าสเปกตรัมการดักกลืนแสงแบบอิมมิตัวมีผลการวิเคราะห์ที่ตรงตามทฤษฎี Nakayama ส่วนของเซลล์รูบิเดียมที่ไม่มีการหุ้มด้วยวัสดุที่ป้องกันสนามแม่เหล็กโลก จะพบถึงผลกระทบของสนามแม่เหล็กโลกเกิดขึ้นคือ จะทำให้การครอสโอเวอร์ และจุดสูงสุดของการสั่นพ้อง ของอะตอมมีการเปลี่ยนแปลง ส่วนของเส้นสเปกตรัมโครงสร้างของอะตอมรูบิเดียมมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องด้วยเหตุผลของ สนามแม่เหล็กโลกและกำลังของเลเซอร์ไดโอด

ในปี ค.ศ. 1996 Ho Seong Lee และคณะ ได้มีการศึกษาถึงสเปกตรัมการดักกลืนแสงแบบอิมมิตัวของอะตอมรูบิเดียม (^{87}Rb) โดยมีการประยุกต์ใส่สนามแม่เหล็กภายนอกให้แก่เซลล์รูบิเดียม สนามแม่เหล็กนั้นจะมีการใส่ให้แก่เซลล์รูบิเดียม 3 เงื่อนไขคือ 1. ไม่มีการใส่สนามแม่เหล็ก 2. ใส่สนามแม่เหล็กโลก 3. ใส่สนามแม่เหล็กภายนอก 10 G ซึ่งขนาดของสัญญาณการสั่นพ้องของรูบิเดียมที่ไอโซโทป ^{87}Rb จะถูกคำนวณโดยใช้การประยุกต์จากทฤษฎี Nakayama four-level ผลการทดลองสรุปว่า การวาดเส้นกราฟของสเปกตรัมการดักกลืนจะใกล้เคียงกับทฤษฎี และในส่วนของ การใส่สนามแม่เหล็กให้แก่เซลล์รูบิเดียมที่ขนาด 10 G พบว่าจะเกิดการแยกชั้นระดับพลังงานย่อยหรือที่เรียกว่า ปรากฏการณ์ซีมาน (Zeeman Splitting)

ในปี ค.ศ. 2000 Chris Leahy และคณะ ได้ทำการนำเซลล์ไอรูบิเดียมมาประยุกต์ในการใส่ อุณหภูมิให้แก่เซลล์ไอรูบิเดียม โดยการให้อุณหภูมิเพิ่มตั้งแต่ 25-120 องศาเซลเซียส และ ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อการดักกลืนของปรากฏการณ์ดอปเปอร์ในอะตอมรูบิเดียม ทั้งไอโซโทป ^{87}Rb และไอโซโทป ^{85}Rb โดยใช้เลเซอร์ไดโอดสเปกโทรมิเตอร์ ส่วนของ ไอโซโทป ^{87}Rb จะใช้เลเซอร์ที่ความยาวคลื่น 795 นาโนเมตร ในการกระตุ้นให้มีการดักกลืน โครงสร้าง $5^2S_{1/2}, F=1$ ถึง $5^2P_{1/2}, F=1$ และ 2 ในส่วนของไอโซโทป ^{85}Rb จะใช้เลเซอร์ที่ความยาวคลื่น 780 นาโนเมตร ในการกระตุ้นให้มีการดักกลืนโครงสร้าง $5^2S_{1/2}, F=2$ ถึง $5^2P_{3/2}, F=1, 2$ และ 3 ผลการทดลองพบว่า ความกว้างของเส้นสเปกตรัมการดักกลืนของปรากฏการณ์ดอปเปอร์ในอะตอมรูบิเดียมจะขึ้นอยู่กับรากที่สองของฟังก์ชันอุณหภูมิที่ให้แก่เซลล์ไอรูบิเดียม ซึ่ง สเปกตรัมที่ได้จากการทดลองจะมีความสอดคล้องกับทฤษฎีของการกระจายตัวของอะตอมของ Maxwell-Boltzmann

ในปี ค.ศ. 2006 Abraham J. Olson และคณะ ศึกษาวิธีการการเปลี่ยนแปลงระดับชั้น พลังงานของอะตอมรูบิเดียมโดยใช้เลเซอร์ไดโอดที่ความยาวคลื่น 778 นาโนเมตร ในการกระตุ้น ให้อะตอมรูบิเดียมมีการเปลี่ยนแปลงจากระดับชั้นพลังงานสถานะพื้น $5^2S_{1/2}$ สู่ระดับชั้นพลังงานที่สูงขึ้น $5^2D_{5/2}$ ซึ่งการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานนี้จะมีการเปลี่ยนไปสองระดับชั้นพลังงานโดยใช้เพียงเลเซอร์ความยาวคลื่นเดียว ซึ่งจะเรียกเทคนิคนี้ว่า การดักกลืนพลังงานสองโฟตอน และทำการ วิเคราะห์สเปกตรัมจากแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่ปล่อยออกจากอะตอมรูบิเดียม เพราะเมื่อมีการกระตุ้น

ถึงระดับชั้นพลังงาน $5^2D_{5/2}$ จะเป็นระดับชั้นพลังงานที่ไม่เสถียร อะตอมจะตกลงมายังระดับชั้นพลังงานที่ต่ำกว่าและทำการปล่อยแสงฟลูออเรสเซนซ์ออกมาด้วย รวมทั้งยังวิเคราะห์จากแสงที่ส่องผ่านจากเซลล์ไอรูบิเดียมด้วย และนำผลการวิเคราะห์จากแสงฟลูออเรสเซนซ์และแสงที่ส่องผ่านเปรียบเทียบกับเทคนิคเดิมคือ การดูคลื่นแสงแบบอ้อมตัว พบว่าการดูพลังงานสองโฟตอนมีผลที่ใกล้เคียงกับวิธีเดิมแต่ใช้อุปกรณ์ที่น้อยกว่า

ในปี ค.ศ. 2011 Lee Weller และคณะ มีการนำสนามแม่เหล็กภายนอกมาครอบกับเซลล์ไอรูบิเดียมในระบบปิดและทำการวิเคราะห์ผลโดยใช้สองเทคนิคคือ การดูคลื่นพลังงานสองโฟตอน และการดูคลื่นแสงแบบอ้อมตัว จากการดูคลื่นสองพลังงานจะเริ่มจากระดับชั้นพลังงาน $5S_{1/2}$ สู่ระดับชั้นพลังงาน $5D_{5/2}$ ส่วนการดูคลื่นแสงแบบอ้อมตัวเริ่มจากระดับชั้นพลังงาน $5S_{1/2}$ สู่ระดับชั้นพลังงาน $5P_{3/2}$ ซึ่งจะนำเทคนิคทั้งสองมาเปรียบเทียบกับ กฎการเลือกของขั้วไฟฟ้าของอะตอมจะถูกตรวจสอบจากการโพลาไรซ์เซชันจากเลเซอร์ และสเปกตรัมการดูคลื่นของอะตอมรูบิเดียม พบว่าทั้งสองเทคนิคให้ผลการทดลองที่ดี สอดคล้องกัน ไม่ว่าจะเป็นเทคนิคไหนก็สามารถใช้ด้วยกันได้ และการใช้เทคนิคนี้ยังสามารถทำให้เกิดความเข้าใจด้านกลศาสตร์ควอนตัมมากขึ้น

ในปี ค.ศ. 2011 A.M. Akulshim และคณะ ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานของอะตอมรูบิเดียม โดยการใช้เลเซอร์ไดโอดที่ความยาวคลื่น 780 และ 776 นาโนเมตร ในการกระตุ้นให้อะตอมรูบิเดียมมีการเปลี่ยนแปลงจากระดับชั้นพลังงานสถานะพื้น $5^2S_{1/2}$ สู่ระดับชั้นพลังงานที่สูงขึ้น $5^2P_{3/2}$ และกระตุ้นอีกระดับหนึ่งคือ $5^2P_{3/2}$ สู่ระดับชั้นพลังงาน $5^2D_{5/2}$ เมื่อรวมกันแล้วจะเป็นการกระตุ้นจากชั้นระดับพลังงาน $5^2S_{1/2}$ สู่ระดับชั้นพลังงาน $5^2D_{5/2}$ เทคนิคนี้ถึงแม้ว่าจะใช้สองความยาวคลื่นในการกระตุ้นอะตอมของรูบิเดียมก็ยังคงเรียก เทคนิคการดูคลื่นพลังงานสองโฟตอนเพราะมีการกระตุ้น 2 ครั้ง หลังจากนั้นอะตอมจะเริ่มคายพลังงานในรูปแบบการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์ออกมาที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร (จะเห็นเป็นสีฟ้า) จากระดับชั้นพลังงาน $6^2P_{3/2}$ สู่ระดับชั้นพลังงานสถานะพื้น $5^2S_{1/2}$ และทำการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่เซลล์ไอรูบิเดียมเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของแสงฟลูออเรสเซนซ์สีฟ้า โดยอุณหภูมิที่ให้แก่เซลล์นั้นเริ่มตั้งแต่ 10-70 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่า ขนาดการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์สีฟ้าแปรผันกับสัดส่วนผกผันกับรากที่สองของการปรับความถี่ และยังขึ้นอยู่กับฟังก์ชันของอุณหภูมิกับความหนาแน่นของอะตอมรูบิเดียม

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้ จะอธิบายถึงเครื่องมือและระบบที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย รวมถึงวิธีการดำเนินงานวิจัย โดยเนื้อหาแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อหลักต่อไปนี้

- 3.1 ศึกษาสมบัติของเซลล์ไอรูบิเดียม (Rubidium Vapor Cell)
- 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง
- 3.3 การติดตั้งและจัดระบบการทดลอง
- 3.4 ขั้นตอนการทดลองการศึกษาพฤติกรรมการดูดกลืนแสงเนื่องจากอนุกรมที่มีต่อเซลล์ไอรูบิเดียม ณ เส้นพลังงาน D_2

3.1 ศึกษาคุณสมบัติของเซลล์ไอรูบิเดียม

3.1.1 คุณสมบัติ




รูปที่ 3.1 ลักษณะของธาตुरुบิเดียม

รูบิเดียมเป็นธาตุโลหะอัลคาไลน์ (Alkaline) เป็นโลหะที่มีลักษณะที่อ่อนนุ่มและมีสีขาว สามารถเป็นของเหลวได้ที่อุณหภูมิห้อง สามารถติดไฟได้ในอากาศและทำปฏิกิริยารุนแรงเมื่อสัมผัสกับน้ำ เมื่อเผาธาตुरुบิเดียมจะพบว่ามีสีเหลืองค่อนข้างไปทางสีม่วง และต้องเก็บธาตุไว้ที่แห้ง ภายใต้น้ำมัน, สูญญากาศ, บรรยากาศที่มีแก๊สเฉื่อย รูบิเดียมก่อเกิดในรูปออกไซด์ได้ 4 ออกไซด์ : Rb_2O , Rb_2O_2 , Rb_2O_3 , Rb_2O_4

ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของธาตुरुบิเดียม

คุณสมบัติทั่วไป	
ชื่อ สัญลักษณ์ และเลขอะตอม	รูบิเดียม, Rb, 37
อนุกรมเคมี	โลหะแอลคาไลน์
หมู่ คาบและบล็อก	1 (โลหะแอลคาไลน์), 5, s
มวลอะตอมมาตรฐาน	85.4678
การจัดเรียงอิเล็กตรอน	$[Kr] 5s^1$

ตารางที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติกายภาพของธาตุรูบิเดียม

คุณสมบัติกายภาพ						
สถานะ	ของแข็ง					
โครงสร้างผลึก	รูปลูกบาศก์กลางตัว 					
ความหนาแน่น (25 °C)	1.532 g·cm ⁻³					
ความหนาแน่นของเหลวที่จุดหลอมเหลว	1.46 g·cm ⁻³					
ปริมาณในธรรมชาติ	⁸⁵ Rb = 72.17 % ⁸⁷ Rb = 27.83 %					
อายุของนิวเคลียส	⁸⁵ Rb = stable ⁸⁷ Rb = 4.88·10 ¹⁰ yr					
จุดหลอมเหลว	312.46 K, 39.31 °C, 102.76 °F					
จุดเดือด	961 K, 688 °C, 1270 °F					
จุดวิกฤต	(extrapolated) 2093 K, 16 MPa					
ความร้อนของการหลอมเหลว	2.19 kJ·mol ⁻¹					
ความร้อนของการกลายเป็นไอ	75.77 kJ·mol ⁻¹					
ความจุความร้อนโมลาร์	31.060 J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹					
ความเป็นแม่เหล็ก	พาราแมกเนติก					
สภาพนำไฟฟ้า	(20 °C) 128 nΩ·m					
สภาพนำความร้อน	58.2 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹					
มอดูลัสของยัง	2.4 GPa					
มอดูลัสของแรงบีบอัด	2.5 GPa					
ความดันไอ						
P (Pa)	1	10	100	1 k	10 k	100 k
ที่ T (K)	434	486	552	641	769	958

ตารางที่ 3.2.1 แสดงคุณสมบัติกายภาพของธาตุรูบิเดียม (Rubidium 85)

เลขอะตอม	Z	37
จำนวนนิวคลีออน	Z+N	85
จำนวนที่พบในธรรมชาติ	η (^{85}Rb)	72.17 %
อายุของนิวเคลียส	τ_n	Stable
มวลอะตอม	m	84.911 789 732 u $1.409\ 993\ 199 \cdot 10^{-25}$ kg
ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 25 °C	ρ_m	$1.53\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
จุดหลอมเหลว	T_M	39.30 °C
จุดเดือด	T_B	688 °C
ความจุความร้อนจำเพาะ	c_p	$0.363\ \text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
ความจุความร้อนโมลาร์	C_p	$31.060\ \text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
ความดันไอ ณ อุณหภูมิ 25 °C	P_v	$3.92 \cdot 10^{-7}$ torr
สปินนิวเคลียส	I	5/2
พลังงานไอออไนเซชัน	E_I	33 690.798 90 cm^{-1} 4.177 126 33 eV

ตารางที่ 3.2.2 แสดงคุณสมบัติกายภาพของธาตุรูบิเดียม (Rubidium 87)

เลขอะตอม	Z	37
จำนวนนิวคลีออน	Z+N	87
จำนวนที่พบในธรรมชาติ	η (^{85}Rb)	27.83 %
อายุของนิวเคลียส	τ_n	$4.88 \cdot 10^{10}$ yr
มวลอะตอม	m	84.911 789 732(14) u $1.409\ 993\ 199 \cdot 10^{-25}$ kg
ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 25 °C	ρ_m	$1.53\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
จุดหลอมเหลว	T_M	39.31 °C
จุดเดือด	T_B	688 °C
ความจุความร้อนจำเพาะ	c_p	$0.363\ \text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
ความจุความร้อนโมลาร์	C_p	$31.060\ \text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
ความดันไอ ณ อุณหภูมิ 25 °C	P_v	$3.0 \cdot 10^{-7}$ torr
สปินนิวเคลียส	I	5/2
พลังงานไอออไนเซชัน	E_I	33 690.8048 cm^{-1} 4.177 126 33 eV

ตารางที่ 3.3 แสดงการเปลี่ยนคุณสมบัติทางแสงของธาตุรูบิเดียม(Rubidium 85) ณ เส้นพลังงาน
 $D_2 (5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{3/2})$

ความถี่	ω_0	$2\pi \cdot 384.230\ 406\ 373\ \text{THz}$
การเปลี่ยนแปลงพลังงาน	$\hbar\omega_0$	1.589 049 139 eV
ความยาวคลื่น(สุญญากาศ)	λ	780.241 368 271 nm
ความยาวคลื่น(อากาศ)	λ_{air}	780.033 489 nm
เลขคลื่น(สุญญากาศ)	$k_L/2\pi$	12 816.546 784 96 cm^{-1}
เวลาการสลายตัว	τ	26.2348 ns
อัตราการสลายตัว	Γ	$38.117 \cdot 10^{-6}\ \text{s}^{-1}$
ความเร็วรีคอยล์	v_r	6.0230 mm/s
พลังงานรีคอยล์	ω_r	$2\pi \cdot 3.8597\ \text{kHz}$
อุณหภูมิรีคอยล์	T_r	370.47 nK
การเลื่อนของดอปเปลอร์	$\Delta \omega_d$	$2\pi \cdot 7.7194\ \text{kHz}$
อุณหภูมิดอปเปลอร์	T_D	145.57 μK

ตารางที่ 3.4 แสดงการเปลี่ยนคุณสมบัติทางแสงของธาตุรูบิเดียม(Rubidium 87) ณ เส้นพลังงาน
 $D_2 (5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{3/2})$

ความถี่	ω_0	$2\pi \cdot 384.230\ 484\ 468\ \text{THz}$
การเปลี่ยนแปลงพลังงาน	$\hbar\omega_0$	1.589 049 439 eV
ความยาวคลื่น(สุญญากาศ)	λ	780.241 209 686 nm
ความยาวคลื่น(อากาศ)	λ_{air}	780.032 00 nm
เลขคลื่น(สุญญากาศ)	$k_L/2\pi$	12 816.546 389 93 cm^{-1}
เวลาการสลายตัว	τ	26.24 ns
อัตราการสลายตัว	Γ	$38.11 \cdot 10^{-6}\ \text{s}^{-1}$
ความเร็วรีคอยล์	v_r	5.8845 mm/s
พลังงานรีคอยล์	ω_r	$2\pi \cdot 3.7710\ \text{kHz}$
อุณหภูมิรีคอยล์	T_r	361.96 nK
การเลื่อนของดอปเปลอร์	$\Delta \omega_d$	$2\pi \cdot 7.5419\ \text{kHz}$
อุณหภูมิดอปเปลอร์	T_D	146 μK

ตารางที่ 3.5 แสดงคุณสมบัติอะตอมของธาตุรูบิเดียม

คุณสมบัติอะตอม	
สถานะออกซิเดชัน	1 (strongly basic oxide)
อิเล็กโตรเนกาติวิตี	0.82 (Pauling scale)
พลังงานไอออไนเซชัน	ค่าที่ 1: $403 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ค่าที่ 2: $2632.1 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ค่าที่ 3: $3859.4 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$
รัศมีอะตอม	248 pm
รัศมีโควาเลนต์	220 ± 9 pm
รัศมีวานเดอร์วาลส์	303 pm

3.1.3 การใช้ประโยชน์

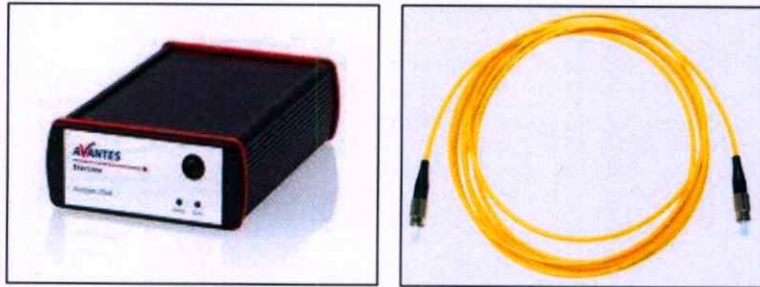
เนื่องจากรูบิเดียมสามารถเกาะติดได้ง่ายจึงได้มีการพิจารณาเพื่อใช้ใน "เครื่องยนต์ไอออน" สำหรับยานอวกาศ อย่างไรก็ตามซีเซียมมีประสิทธิภาพมากขึ้นสำหรับจุดประสงค์นี้ นอกจากนี้ยังมีข้อเสนอสำหรับใช้เป็นกังหันไอน้ำและสำหรับการใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้หลักการ แมกนีโตไฮโดรไดนามิกส์ (Magnetohydrodynamic) ซึ่งไอออนรูบิเดียมถูกสร้างด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงและผ่านเข้าสู่สนามแม่เหล็ก และทำหน้าที่เหมือนต้นกำเนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อสร้างกระแสไฟฟ้า รูบิเดียมถูกนำมาใช้เป็นตัวยึดในหลอดสุญญากาศและเป็นส่วนประกอบของโพโตเซลล์ถูกนำมาใช้ในการผลิตแวนตาชนิดพิเศษ และสุดท้ายยังใช้ด้านมาตรวิทยา คือ ใช้ในการรักษาเสถียรภาพของความยาวคลื่นที่ออกมาจากเลเซอร์

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองเพื่อศึกษา พฤติกรรมการดูดกลืนแสงเนื่องจากอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์โอรูบิเดียม ณ เส้นพลังงาน D_2 จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่มีความละเอียดสูงและคุณสมบัติของอุปกรณ์การทดลองที่ต้องสอดคล้องกับการทดลองนี้ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง มีดังต่อไปนี้

ระบบการวัดการดูดกลืนแสง

1. สเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer) และสายใยแก้วนำแสง



รูปที่ 3.2 ก. สเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer) (ซ้าย)

รูปที่ 3.2 ข. สายใยแก้วนำแสง (ขวา)

เครื่องมือวัดเชิงแสงที่ใช้ในการตรวจวัดคุณสมบัติเฉพาะของแสง เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยคือ Avantes-EDU ลักษณะดังรูปที่ 3.2 ก. และทำหน้าที่เป็นเครื่องมือวัดการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่น โดยสเปกโตรมิเตอร์จะมีหัววัดสัญญาณแสงเป็นสายใยแก้วนำแสง สายใยแก้วนำแสงมีขนาดความยาว 2 เมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 ไมโครเมตร รุ่น Avantes FC-UV200-2 ลักษณะดังรูปที่ 3.2 ข. โดยการวัดการดูดกลืนของพลังงานจะทำการวัดลำแสง 2 ลำ คือ ลำแสงอ้างอิง และ ลำแสงที่ผ่านเซลล์โอรูบิเดียม โดยใช้ซอฟต์แวร์ AvaSoft Avantes เวอร์ชัน 7.4 Basic

2. เลเซอร์ไดโอด (Laser Diode)



รูปที่ 3.3 หัวเลเซอร์ไดโอด

เป็นหัวเลเซอร์เลเซอร์ไดโอดแบบ can รุ่น THORLABS - L780P010 เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเลเซอร์ 5.6 มิลลิเมตร เป็นเลเซอร์ที่เกิดจากรอยต่อ p-n ของสารกึ่งตัวนำที่เกิดจากการที่ฉีดกระแสไฟฟ้าเข้าไปเลเซอร์ เลเซอร์ไดโอดให้ความยาวคลื่นในช่วง 775-785 นาโนเมตรและเป็นลำแสง

โพลาไรซ์ กำลังแสง 20 มิลลิวัตต์ อุณหภูมิที่ตอบสนองต่อการทำงานอยู่ที่ -10 ถึง 60 °C ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงในย่านอินฟราเรด

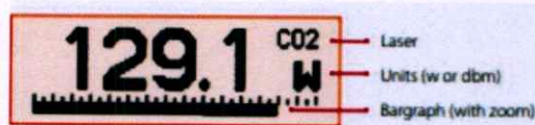
3. ระบบความร้อนควบคุมความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอด



รูปที่ 3.4 ระบบความร้อนควบคุมความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอด

เป็นอุปกรณ์ที่ครอบห้วเลเซอร์ไดโอด ขนาด กว้าง x ยาว x สูง เป็น 44.5 x 44.5 x 42.1 มิลลิเมตร รุ่น THORLABS – LDM21 ใช้ร่วมกับห้วเลเซอร์เลเซอร์ไอโอดแบบ can เส้นผ่านศูนย์กลางของห้วเลเซอร์ 5.6 มิลลิเมตร มีหน้าที่ใช้ควบคุมความร้อนของห้วเลเซอร์ไอโอด เพราะความร้อนของห้วเลเซอร์ไดโอดมีผลต่อความยาวคลื่นที่ห้วเลเซอร์ปล่อยออกมา ระบบนี้ช่วยให้ความยาวคลื่นของเลเซอร์เสถียรขึ้นโดยการจับอุณหภูมิไว้ที่ 0.002 °C โดยใช้เซนเซอร์ ชนิด 10 kΩ NTC Thermistor สามารถปรับอุณหภูมิได้ 20 - 30 °C และระบบความร้อนควบคุมความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดจะถูกควบคุมโดยกระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ให้กับห้วเลเซอร์ไดโอด เพื่อให้ได้ความยาวคลื่นที่ต้องการ โดยมีคอมพิวเตอร์เป็นศูนย์กลางควบคุมทั้งกระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิของห้วเลเซอร์

4. มิเตอร์วัดกำลังความเข้มแสง (Power Meter)



รูปที่ 3.5 มิเตอร์วัดกำลังความเข้มแสง (Power meter)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดกำลังความเข้มของลำแสงขนาดกว้าง x ยาว x สูง เป็น 205 x 95 x 39 มิลลิเมตร. รุ่น Ophir 7Z01500 Nova-Handheld แสดงผลด้วยจอ LCD พร้อมด้วย electroluminescent backlight ขนาด 32 x 122 พิกเซล หน้าจอมี Large 12 mm digits. ความต่างศักย์ขาออกเป็น RS232 and analog output 1V. การรีเฟรชหน้าจอ 15 times / sec. มิเตอร์จะทำงานร่วมกับเซนเซอร์ thermopile, pyroelectric, และ photodiode. มิเตอร์วัดกำลังความเข้มแสงใช้ในการตรวจสอบ ลำแสง pump และ ลำแสง probe ซึ่งเป็นลำแสงที่ใช้ในการวัดการดูดกลืนของเซลล์โอรูบิเดียม และใช้ในการวัดกำลังความเข้มแสงก่อนผ่านและหลังผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียม ณ อุณหภูมิต่างๆ

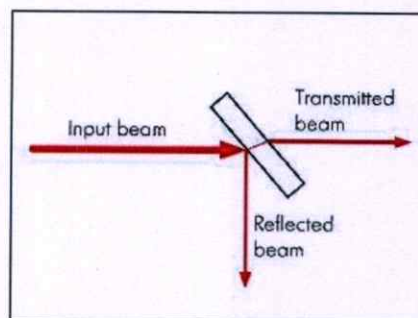
5. กระจกสะท้อนแสง (Mirror)



รูปที่ 3.6 กระจกสะท้อนแสง (Mirror)

กระจกสะท้อนแสง THORLABS รุ่น BB03-E03 มีลักษณะเป็นวงกลม ผิวเรียบและเงา มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว ตอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่น 700-1100 นาโนเมตร ทำหน้าที่หักเหลำแสง เพื่อให้ลำแสงที่สะท้อนและทะลุผ่านเข้าไปในเซลล์โอรูบิเดียม

6. ตัวแยกลำแสง (Beam Splitter)



รูปที่ 3.7 ก. ตัวแยกลำแสง (Beam Splitter) (ซ้าย)

รูปที่ 3.7 ข. ทิศทางเมื่อลำแสงผ่านเข้าไปในตัวแยกลำแสง (ขวา)

มีลักษณะเป็นลูกบาศก์ ขนาดกว้าง x ยาว x สูง เป็น 25 x 25 x 25 มิลลิเมตร เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แบ่งลำแสงออกเป็น 2 ลำ หลังจากทีลำแสงผ่านเข้าไปในตัวแยกลำแสงจะมีการแบ่งลำแสง 2 ลำคือ ลำแสงสะท้อน และ ลำแสงส่องผ่าน ลำแสงทั้งสองจะมีค่าความเข้มเท่ากันแต่จะมีความเข้มเป็น

ครึ่งหนึ่งของลำแสงที่ออกมาจากเลเซอร์ ลักษณะดังรูปที่ 3.7 ข.

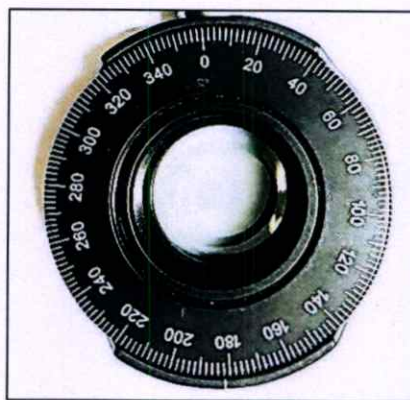
7. กล้องดิจิทัล (Digital Camera)



รูปที่ 3.8 กล้องดิจิทัล (Digital Camera)

กล้องดิจิทัล รุ่น Sony Handycam 120x ความละเอียด 3 เมกะพิกเซล จอภาพ LCD ขนาด 2.5 นิ้ว เป็นกล้องที่ใช้ในการบันทึกภาพจากการปล่อยแสงของอะตอมรูบิเดียมที่อยู่ในเซลล์ เมื่ออะตอมรูบิเดียมถูกกระตุ้นด้วยเลเซอร์ไดโอด ซึ่งจะสามารถยืนยันการดูดกลืนของอะตอมรูบิเดียมได้ โดยการบันทึกภาพจะใช้โหมด Super Night Shot ซึ่งจะสามารถบันทึกภาพในที่ที่ไม่มีแสงสว่างได้

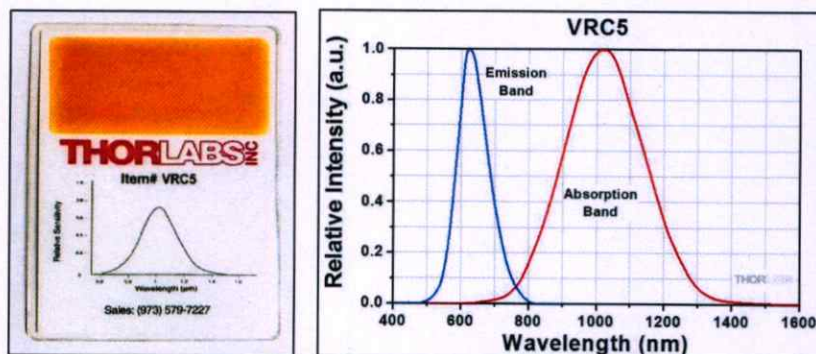
8. แผ่นโพลาไรเซอร์ (Polarizer)



รูปที่ 3.9 แผ่นโพลาไรเซอร์ (Polarizer)

เป็นแผ่นที่ใช้กรองความเข้มของลำแสงก่อนที่ลำแสงจะเข้าสู่ตัวรับสัญญาณแสงของสเปกโตรมิเตอร์ การเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงจะขึ้นอยู่กับมุมที่หมุนแผ่นโพลาไรเซอร์ นั้นเกิดจากการคัดเลือกเฉพาะองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าที่อยู่ในแนวเดียวกับแกนส่งผ่านของโพลาไรเซอร์ เมื่อทิศแผ่นโพลาไรเซอร์ตั้งฉากกับลำแสงจะสามารถกรองความเข้มของลำแสงได้สูงสุด

9. แผ่นสะท้อนรังสีอินฟราเรด (NIR Detector Card)



รูปที่ 3.10 ก. แผ่นสะท้อนรังสีอินฟราเรด (ซ้าย)

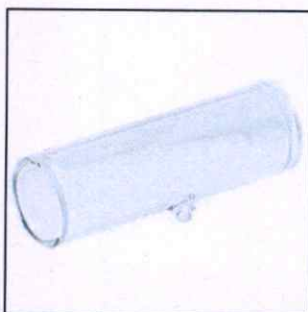
รูปที่ 3.10 ข. ช่วงการดูดกลืนและการปล่อยพลังงานของแผ่นสะท้อนรังสีอินฟราเรด(ขวา)

แผ่นสะท้อนรังสีอินฟราเรด รุ่น THORLABS-VRC5 มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง x ยาว เป็น 44.5 x 63.5 มิลลิเมตร พื้นที่ต่อการตอบสนองของแสงจะอยู่ด้านบนมีขนาด 38.1 x 19.1 มิลลิเมตร ผลิตจากพลาสติกที่คงทน เมื่อสัมผัสกับลำแสงอินฟราเรดช่วงความยาวคลื่น 700 - 1400 นาโนเมตร ที่สายตาผู้ทำการทดลองมองไม่เห็น แผ่นจะดูดกลืนพลังงานในช่วงความยาวคลื่น 700 - 1400 นาโนเมตร และแผ่นจะปล่อยแสงออกมาในช่วงความยาวคลื่น 500-800 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นที่มนุษย์สามารถมองเห็นได้ และทำให้ผู้ทำการทดลองสามารถมองเห็นทิศทางของลำแสงอินฟราเรดได้

10. อุปกรณ์ทางแสงอื่นๆ เช่น ชุดหกเหลี่ยม ไฟฉาย ชุดทำความสะอาดเลนส์

ระบบให้ความร้อนแก่เซลล์รูบิเดียม

11. เซลล์ไอรูบิเดียม (Rubidium Vapor Cell)

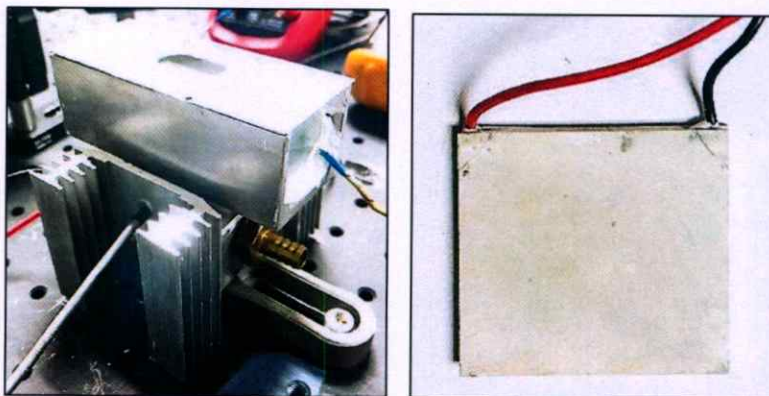


รูปที่ 3.11 เซลล์ไอรูบิเดียม (Rubidium Vapor Cell)

เซลล์ไอรูบิเดียม รุ่น GC25075-RB มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.0 มิลลิเมตร ยาว 71.8 มิลลิเมตร ถูกประดิษฐ์ขึ้นจากแก้ว borosilicate หรือที่เรียกว่า Pyrex และ SCHOTT Borofloat ซึ่งเป็นวัสดุที่ทนทานต่อความร้อนและการแตกร้าว ความหนาของแก้ว borosilicate คือ 1.6 มิลลิเมตร

โดยที่เซลล์โอรูบิเดียมจะมีจอย (cool finger) อยู่ตรงกลางหลอด มีประสิทธิภาพการส่งผ่านของแสงที่ผ่านเซลล์เกิน 84 % สำหรับแสงในช่วง 350 นาโนเมตรถึง 2.2 ไมโครเมตร ความดันภายในหลอด ณ อุณหภูมิ 25 °C คือ 1×10^{-8} Torr

12. ระบบให้ความร้อนแก่เซลล์โอรูบิเดียมและแผ่นเพลเทียร์ (Peltier)



รูปที่ 3.12 ก. ระบบให้ความร้อนแก่เซลล์โอรูบิเดียม (ซ้าย)

รูปที่ 3.12 ข. แผ่นเพลเทียร์ (Peltier) (ขวา)

มีลักษณะเป็นรางที่ครอบคลุมเซลล์โอรูบิเดียมดังรูปที่ 3.12 ก. โดยให้จอย (cool finger) ของเซลล์หันลงมาด้านล่างเพื่อให้มีการนำความร้อน ด้านบนรางจะทำการเจาะรูเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร เพื่อสังเกตการณ์ปล่อยพลังงานแสงของอะตอมรูบิเดียม รางทำมาจากอะลูมิเนียม ส่วนด้านล่างของรางจะมีแผ่นเพลเทียร์ ที่มีการนำความร้อนจากแผ่นเพลเทียร์แพร่เข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียม ในส่วนของด้านข้างจะมีอุปกรณ์ระบายความร้อนขนาดด้านข้างเพื่อให้มีการระบายความร้อนของแผ่นเพลเทียร์ได้ดี แผ่นเพลเทียร์รุ่น Thermoelectric Cooler Peltier -12710 ขนาดกว้าง x ยาว x สูง เป็น 4 x 4 x 0.4 เซนติเมตร น้ำหนัก 0.02 กิโลกรัม ดังรูปที่ 3.12 ข. ทำงานที่แรงดันไฟฟ้า DC 12 โวลต์ และกระแสไฟฟ้า 0 ~ 10 แอมป์ การใช้พลังงานสูงสุด 120 วัตต์ มีความต้านทาน 1.3 - 1.5 Ω เมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสตรงเข้าตัวมัน จะทำให้มันเกิดการถ่ายเทพลังงานความร้อนขึ้นทำให้ด้านหนึ่งร้อนและอีกด้านหนึ่งจะเย็นซึ่งด้านร้อนจะร้อนถึง 90 °C ส่วนด้านเย็นจะเย็นจนติดลบ -10 °C

13. โมดูลควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)



รูปที่ 3.13 โมดูลควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)

โมดูลควบคุมอุณหภูมิ รุ่น PMT-501 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมแผ่นเพลเทียร์ผ่านรีเลย์ โดยสามารถตั้งโปรแกรมให้เมื่อถึงอุณหภูมิที่กำหนดแล้วให้รีเลย์ตัดการทำงาน ควบคุมอุณหภูมิตั้งแต่ -55 °C ถึง 125 °C แสดงผลด้วยตัวเลข 0.56 นิ้ว 4 + 1 หลัก ความละเอียด 0.5°C ใช้แรงดันไฟฟ้าในการทำงาน DC 12 โวลต์ ที่กระแสไฟฟ้า 800 มิลลิแอมป์ ถึง 1 แอมป์ อุปกรณ์รีเลย์รองรับกระแสไหลผ่านได้สูงสุด 10 แอมป์ ที่แรงดันไฟฟ้า AC 220 โวลต์ โมดูลมีขนาด 50 x 40 มิลลิเมตร โดยมีเทอร์โมคัปเปิล Type K ในการวัดอุณหภูมิ Type K ทำจากวัสดุตัวนำนิกเกิลโครเมียม - นิกเกิลลูมิเนียม สามารถวัดได้ตั้งแต่ -250 °C ถึง 1300 °C ความยาวของสายวัดประมาณ 52 เซนติเมตร

14. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply)



รูปที่ 3.14 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply)

แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่ให้แรงดันไฟฟ้าของช่วงที่ รุ่น GWINSTEK GPS-1850D ขนาด 128x145x285 มิลลิเมตร จอแสดงผล LED 4-digit จำนวนช่องใช้งาน 1 ช่อง ให้แรงดันไฟฟ้า DC 0 - 18 โวลต์ ความคลาดเคลื่อน $\leq 0,01\%$ และ กระแสไฟฟ้า 0-5 แอมป์ ความคลาดเคลื่อน $\leq 0,2\%$ มีน้ำหนักประมาณ 5 กิโลกรัม คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ให้พลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้โหลดไฟฟ้า หน้าที่หลักคือ จ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่แผ่นเพลเทียร์และโมดูลควบคุมอุณหภูมิของแผ่นเพลเทียร์ เพื่อให้ทั้งคู่นั้นสามารถทำงานได้ และแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง เป็นหนึ่งในแหล่งจ่ายไฟที่ให้แรงดันไฟฟ้าของช่วงที่ (ไม่ว่าจะบวกหรือลบ)

15. อุปกรณ์นำความร้อน



รูปที่ 3.15 อุปกรณ์นำความร้อน

อุปกรณ์นำความร้อนรุ่น Unick คือ Thermal Paste เป็นวัสดุผสม สารเหนียวและหนืด สารนำความร้อนทำให้ช่องว่างลดลงระหว่างอากาศกับเซลล์โอรูบิเดียมทำให้เซลล์โอรูบิเดียมมีความร้อนที่ทั่วถึงและเท่ากันทั่วทั้งเซลล์

16. อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermometer)

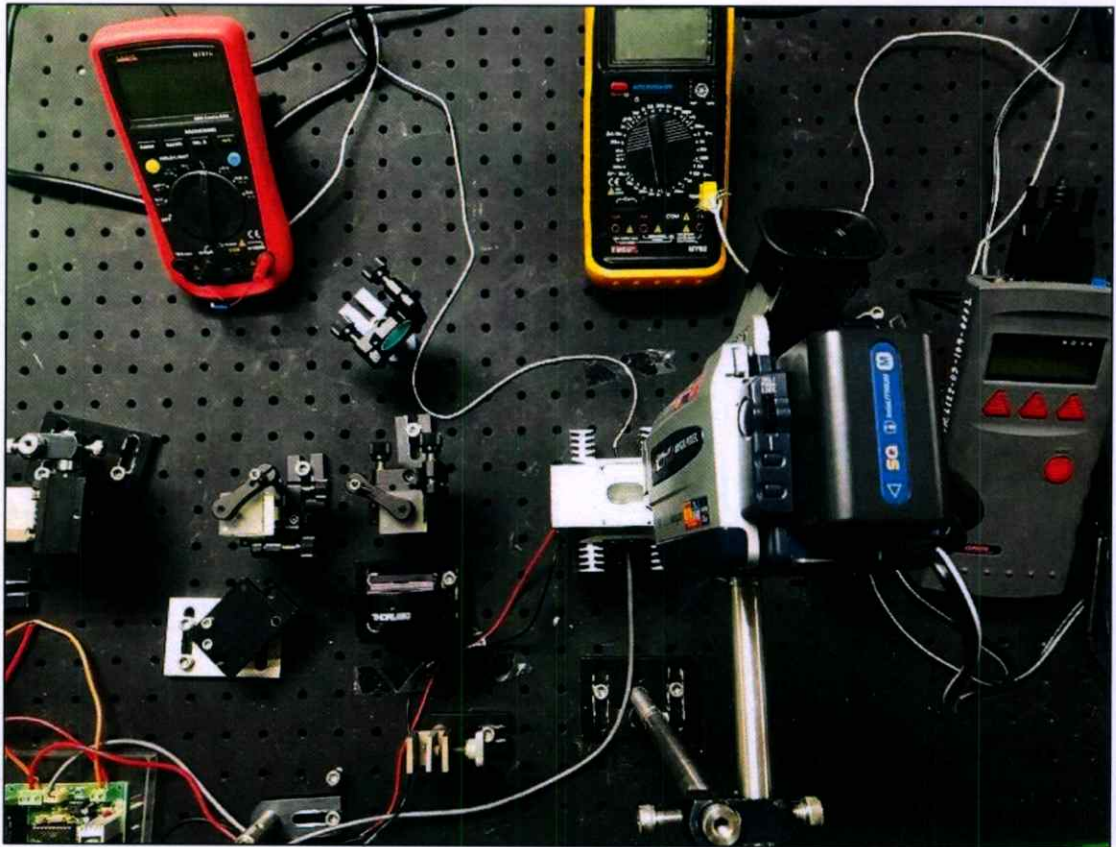


รูปที่ 3.16 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermometer)

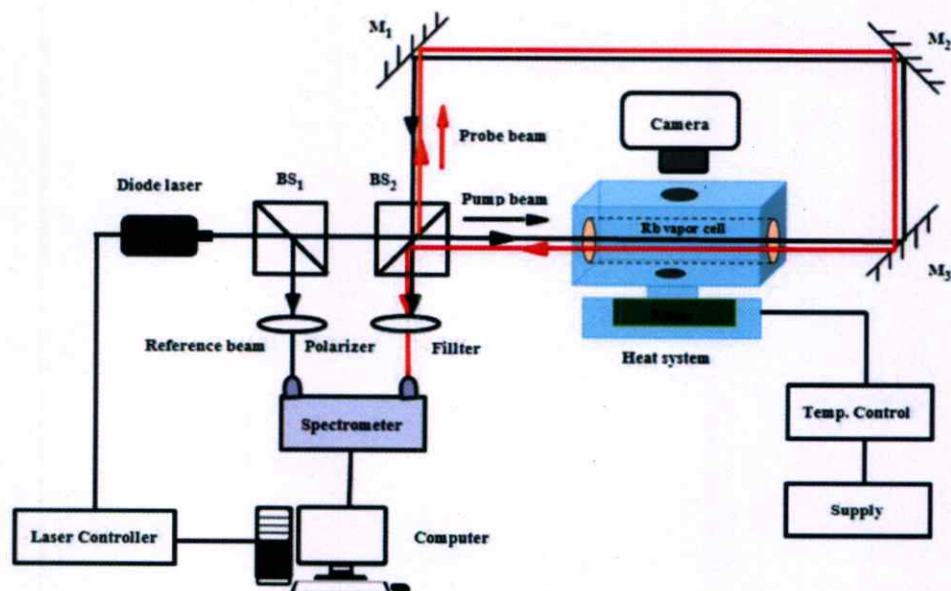
เป็นเครื่องที่วัดอุณหภูมิ รุ่น UT61C มีสายวัดอุณหภูมิเป็นเทอร์โมคัปเปิล Type K โดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความร้อนเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า ทำมาจากโลหะตัวนำที่ต่างชนิดกัน 2 ตัว นำมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกันที่ปลายด้านหนึ่ง เรียกว่า จุดวัดอุณหภูมิ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งปล่อยเปิดไว้ เรียกว่าจุดอ้างอิง หากจุดวัดอุณหภูมิและจุดอ้างอิงมีอุณหภูมิต่างกันก็จะทำให้มีการนำกระแสในวงจรเทอร์โมคัปเปิลทั้งสองข้าง โดยเรียกอุณหภูมิคงที่ที่ใช้อ้างอิงนี้ว่า Reference Junction และได้มีการกำหนด Reference Junction ให้เป็น 0°C คือโลหะ 2 ชนิดต่างกันที่นำมาเชื่อมปลายเข้าด้วยกันที่ด้านหนึ่งซึ่งเป็นด้านที่ใช้วัดอุณหภูมิ ส่วนอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับอุปกรณ์ใช้งาน คือ เครื่องบันทึกอุณหภูมิ

3.3 การติดตั้งและจัดระบบการทดลอง

การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการดูดกลืนแสงเนื่องจากอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์โอรูบิเดียม ณ เส้นพลังงาน D_2 จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่มีความละเอียดสูงและคุณสมบัติของอุปกรณ์การทดลองที่ต้องสอดคล้องกับการทดลองนี้ อุปกรณ์การทดลองจะต้องติดตั้งบนโต๊ะทดลองทางแสง เพื่อลดการสั่นของระบบการทดลองที่ซึ่งอาจจะเกิดจากสิ่งแวดล้อมหรือผู้ทำการทดลอง เพราะระบบการทดลองทางแสงต้องการความนิ่งและความเสถียรภาพมาก ในส่วนของห้องปฏิบัติการที่ทำการทดลองนั้น จะต้องเป็นห้องมืด ปราศจากการรบกวนจากแสงภายนอก เพื่อผลการทดลองจะได้มีความถูกต้องและมีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งการติดตั้งระบบการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 แสดงการจัดอุปกรณ์การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการดูดกลืนแสงเนื่องจากอนุกรมที่มีต่อเซลล์ไอโรบิเดียม ณ เส้นพลังงาน D_2



รูปที่ 3.18 แสดงแผนภาพการจัดอุปกรณ์การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการดูดกลืนแสงเนื่องจากอนุกรมที่มีต่อเซลล์ไอโรบิเดียม ณ เส้นพลังงาน D_2 ดังแสดงในรูปที่ 3.17

การติดตั้งระบบการทดลองที่แสดงดังรูปที่ 3.17 และ แผนภาพการจัดอุปกรณ์การทดลองที่แสดงดังรูปที่ 3.18 โดยใช้เลเซอร์ไดโอด (Diode Laser) มีความยาวคลื่นช่วง 775-785 นาโนเมตร เป็นแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งความยาวคลื่นของเลเซอร์จะถูกควบคุมโดย ระบบความร้อนควบคุมความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอด ระบบนี้จะควบคุมกระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ให้แก่แหล่งกำเนิดแสงของเลเซอร์ไดโอด ซึ่งทั้งหมดนี้จะควบคุมที่คอมพิวเตอร์ เมื่อลำแสงออกมาจากเลเซอร์ ลำแสงจะผ่านเข้าสู่ตัวแยกลำแสง (Beam Splitter, BS₁) ที่ 1 ลำแสงจะถูกแยกออกเป็น 2 ลำ แสงลำที่ 1 เป็นลำแสงที่หักเหจากตัวแยกลำแสง ผ่านเข้าสู่แผ่นโพลาไรเซอร์ (Polarizer) เพื่อลดความเข้มแสง หลังจากนั้นลำแสงจะเข้าสู่สายใยแก้วนำแสงและเข้าสู่เครื่องสเปกโทรมิเตอร์เป็นลำดับต่อไป ลำแสงนี้จะถูกใช้เป็นลำแสงอ้างอิง (Reference Beam) และแสงลำที่ 2 เป็นลำแสงที่ทะลุผ่านจากตัวแยกลำแสงที่ 1 ผ่านเข้าสู่ตัวแยกลำแสง (Beam Splitter, BS₂) ที่ 2 และตัวแยกลำแสงที่ 2 จะแยกลำแสงออกเป็น 2 ลำ

ลำแสงที่ 1 เป็นลำแสงที่หักเหออกจากตัวแยกลำแสง และสะท้อนกับกระจกแผ่นที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ (Mirror, M₁, M₂ and M₃) จากนั้น ลำแสงที่ 1 จะผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียมและผ่านเข้าสู่ตัวแยกลำแสงที่ 2 อีกหนึ่งครั้ง ลำแสงจะถูกหักเหเดินทางเข้าสู่สายใยแก้วนำแสง และเครื่องสเปกโทรมิเตอร์ ตามลำดับ ซึ่งลำแสงนี้จะเรียกว่า ลำแสงที่ใช้วัด (Probe Beam) มีหน้าที่ ทำการวัดการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม

แสงลำที่ 2 เป็นลำแสงที่ทะลุผ่านจากตัวแยกลำแสงที่ 2 ลำแสงจะผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียม และ สะท้อนกับกระจกแผ่นที่ 3, 2 และ 1 ตามลำดับ จากนั้น ลำแสงที่ 2 จะผ่านเข้าสู่ตัวแยกลำแสงที่ 2 อีกหนึ่งครั้ง ลำแสงที่ทะลุผ่านจากตัวแยกลำแสงที่ 2 ผ่านเข้าสู่ที่แผ่นกรองแสง(Fillter) และจะถูกตัดทิ้ง ซึ่งลำแสงนี้จะเรียกว่า ลำแสงที่ใช้ในการกระตุ้น (Pump Beam) มีหน้าที่ ทำการกระตุ้นอะตอมรูบิเดียม ณ สถานะพื้น ให้อะตอมรูบิเดียมมี สถานะถูกกระตุ้น

ในส่วนของการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่เซลล์ไอรูบิเดียม จะทำการสร้างรางอะลูมิเนียม มีลักษณะเป็นรางที่ครอบคลุมเซลล์ไอรูบิเดียมดังภาพที่ 3.12 ก. โดยให้จอย (Cool Finger) ของเซลล์หันลงมาด้านล่างเพื่อให้มีการนำความร้อนจากจอยให้แพร่ไปยังทั่วทั้งเซลล์ ด้านบนรางจะทำการเจาะรูเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร เพื่อสังเกตการณ์ปล่อยพลังงานแสงของอะตอมรูบิเดียมจากกล้องดิจิตอล ส่วนด้านล่างของรางจะมีแผ่นเพลเทียร์ ที่มีการนำความร้อนจากแผ่นเพลเทียร์แพร่เข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียม ในส่วนของด้านข้างจะมีอุปกรณ์ระบายความร้อน(Heat Zink) ขนาดด้านข้าง เพื่อให้มีการระบายความร้อนของแผ่นเพลเทียร์ได้ดี การควบคุมอุณหภูมิเซลล์ไอรูบิเดียม นั้นจะควบคุมความร้อนของแผ่นเพลเทียร์โดยโมดูลควบคุมอุณหภูมิผ่านรีเลย์ โดยสามารถตั้งโปรแกรมให้เมื่อถึงอุณหภูมิที่กำหนดแล้วให้รีเลย์ตัดการทำงาน โมดูลควบคุมอุณหภูมิ ใช้เทอร์โมคัปเปิล Type K ในการวัดอุณหภูมิ และยังนำอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermometer) ที่เซนเซอร์ใช้เทอร์โมคัปเปิล Type K ติดตั้งไว้อีก 2 จุด คือ จุดที่หนึ่ง ติดตั้ง ณ จอยของเซลล์ไอรูบิเดียม ซึ่งเป็นส่วนเดียวกับติดตั้งโมดูลควบคุมอุณหภูมิ และจุดที่สอง ติดตั้ง ณ ปลายของเซลล์ไอรูบิเดียม และเพื่อให้อุณหภูมิของเซลล์ไอรูบิเดียมเท่ากันทุกส่วน นำอุปกรณ์นำความร้อน (Thermal Paste) มาเติมระหว่างรางอะลูมิเนียมให้ความร้อนกับเซลล์ไอรูบิเดียม ซึ่งเป็นสารนำความร้อนจะทำให้ช่องว่างลดลงระหว่างอากาศกับเซลล์ไอรูบิเดียม ทำให้กระจายอุณหภูมิได้ทั้งถึงทั้งเซลล์ไอรูบิเดียม

3.4 ขั้นตอนการทดสอบการศึกษาพฤติกรรมการดูดกลืนแสงเนื่องจากอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์โอรูบิเดียม ณ เส้นพลังงาน D₂

ขั้นตอนการทดสอบการศึกษาพฤติกรรมการดูดกลืนแสงเนื่องจากอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์โอรูบิเดียม ณ เส้นพลังงาน D₂ โดยมีวิธีการทดลองตามขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1. จัดอุปกรณ์การทดลองทั้งหมดติดตั้งบนโต๊ะทดลองแสง เพื่อลดการสั่นสะเทือนจากสิ่งแวดล้อมหรือจากผู้ทำการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 3.18 และอุปกรณ์ทุกชิ้นต้องปราศจากฝุ่น เพื่อลดการกระเจิงของแสงเมื่อแสงตกกระทบกับอุปกรณ์ และทำการทดลองในห้องมืด
2. ขั้นตอนการจัดอุปกรณ์การทดลองต้องปรับแนวการเดินทางของแสง (Alignment) ในแนวเชิงเส้นที่อยู่ในระดับเดียวกันทั้ง แกน X และ แกน Y โดยปรับระดับของแท่นยึดตัวเลเซอร์และ ใช้แผ่นสะท้อนรังสีอินฟราเรดในการสังเกตทิศทางของลำแสงที่ส่องออกมาจากเลเซอร์ให้อยู่ในระดับเดียวกัน และต้องปรับให้ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบบนตำแหน่งกลางของอุปกรณ์แต่ละชิ้น เพื่อลดการกระเจิงแสงที่ขอบอุปกรณ์
3. ปรับความยาวคลื่นของแสงจากเลเซอร์ไดโอด โดยการปรับกระแสไฟฟ้า และ อุณหภูมิของหัวจ่ายเลเซอร์ จากคอมพิวเตอร์ให้มีการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม เมื่อมีความยาวคลื่นที่เหมาะสม อะตอมรูบิเดียมจะมีการดูดกลืนพลังงาน และเมื่ออะตอมรูบิเดียมจะคายพลังงานออกมาในรูปของแสง ซึ่งจะสังเกตได้จากกล้องดิจิตอล ทำการบันทึกผลของกระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิ
4. ปรับความยาวคลื่นของแสงจากเลเซอร์ไดโอด ตามขั้นตอนการทดลองที่ 3 และปรับอุณหภูมิของเซลล์โอรูบิเดียม ให้อยู่ที่อุณหภูมิห้อง 23 °C ลำแสงจากเลเซอร์ไดโอด ที่ผ่านเข้าสู่ตัวแยกลำแสงที่ 1 ลำแสงจะถูกแยกออกเป็น 2 ลำ โดยที่ลำที่ 1 จะหักเหจากตัวแยกลำแสง ผ่านเข้าสู่แผ่นโพลาไรเซอร์ และถูกรวบรวมลำแสงโดยเส้นใยแก้วนำแสง นำเข้าสู่เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ และทำการบันทึกผล เป็นลำแสงอ้างอิง
5. ลำแสงที่ 2 ที่ทะลุผ่านจากตัวแยกลำแสงที่ 1 ปรับเลเซอร์ให้มีการผ่านเข้าสู่ตัวแยกลำแสงที่ 2 ในตำแหน่งกึ่งกลางของตัวแยกลำแสง ลำแสงจะถูกแยกออกเป็น 2 ลำ โดยที่ลำที่ 1 จะหักเหจากตัวแยกลำแสง และปรับกระจกให้ลำแสงที่ 1 สะท้อนกับกระจกบานที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ และผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียม
6. ในการวางเซลล์โอรูบิเดียมจะวางบนแท่นอะลูมิเนียม และปรับตำแหน่งของเซลล์โอรูบิเดียมให้ลำแสงผ่านในตำแหน่งกึ่งกลางของเซลล์โอรูบิเดียม เมื่อลำแสงผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียม ลำแสงที่ 1 นี้ จะผ่านเข้าสู่ตัวแยกลำแสงที่สอง ลำแสงจากการหักเหของตัวแยกลำแสงที่ 2 จะผ่านเข้าสู่แผ่นกรองแสง (Filter)
7. ลำแสงที่ 2 ลำแสงจะทะลุผ่านจากตัวแยกลำแสงที่ 2 และลำแสงที่ 2 ผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียม และปรับกระจกให้ลำแสงสะท้อนกับกระจกบานที่ 3, 2 และ 1 ตามลำดับ และผ่านเข้าสู่ตัวแยกลำแสงที่ 2 อีกครั้งหนึ่ง ลำแสงจากการทะลุผ่านของตัวแยกลำแสงที่ 2 จะผ่านเข้าสู่แผ่นกรองแสง และเส้นใยแก้วนำแสงเป็นลำดับต่อไป โดยการปรับนี้ยังคงเส้นทางลำแสงของลำแสงที่ 1 ไว้เหมือนเดิมให้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด

8. ก่อนที่ลำแสงที่ 1 และ 2 จะผ่านเข้าสู่แผ่นกรองแสง นำเป็นอุปกรณ์วัดกำลังของลำแสง เพื่อใช้ในการตรวจสอบ ลำแสงที่ 1 หรือ ลำแสงที่ 2 เป็นลำแสงที่ใช้วัดการดูดกลืน หรือ เป็นลำแสงที่ใช้ในการกระตุ้นอะตอมรูบิเดียม ลำแสงที่ความเข้มน้อยจะเป็นลำแสงที่ใช้วัด ส่วนลำแสงที่มีความเข้มมากจะเป็นลำแสงที่ใช้ในการกระตุ้นอะตอมรูบิเดียม
9. ลำแสงที่ 1 เป็นลำแสงที่ใช้ในการวัดการดูดกลืน จะผ่านเข้าสู่เส้นใยแก้วนำแสงนำเข้าสู่เครื่องสเปกโทรมิเตอร์ บันทึกผลข้อมูล ส่วนลำแสงที่ 2 จะถูกกรองทิ้งจากแผ่นกรองแสง โดยไม่ต้องนำเข้าสู่เครื่องสเปกโทรมิเตอร์
10. บันทึกภาพจากการปล่อยพลังงานแสงของอะตอมรูบิเดียม จากกล้องดิจิทัล
11. ทำการวัดกำลังของลำแสงทั้ง 5 จุดดังนี้ กำลังของลำที่ออกจากเลเซอร์ไดโอด, กำลังของลำแสงอ้างอิง, กำลังของลำแสงก่อนผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียม, กำลังของลำแสงหลังผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียม, และกำลังของลำแสงที่ใช้วัดก่อนเข้าสู่เครื่องสเปกโทรมิเตอร์
12. นำข้อมูลจากเครื่องสเปกโทรมิเตอร์วิเคราะห์ข้อมูลผ่านซอฟต์แวร์ AvaSoft Avantes เวอร์ชัน 7.4 Basic
13. จากอุณหภูมิห้องที่ 23°C ทำการปรับอุณหภูมิให้เพิ่มขึ้นทีละ 10°C จะได้อุณหภูมิที่ 30, 40, 50, 60, 70, และ 80°C ตามลำดับ โดยแต่ละอุณหภูมิทำตามขั้นตอนที่ 4-12
14. นำผลการทดลองที่ได้ทั้งหมดมาวิเคราะห์ เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียมแต่ละอุณหภูมิ ความเข้มของลำแสงก่อนผ่านและหลังผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียม ภาพกล้องดิจิทัล และ สรุปผลการทดลอง

หมายเหตุ : ระหว่างการทำทดลองควรระวังลำแสงเลเซอร์เข้าตาอย่างยิ่ง เนื่องแสงเลเซอร์ชนิดนี้ตามนุษย์ไม่สามารถมองเห็นได้ ควรป้องกันโดยใส่แว่นกันอันตรายจากแสงเลเซอร์

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

เนื้อหาในบทนี้จะเกี่ยวข้องกับผลการทดลองของการดูดกลืนพลังงานแสงเนื่องจากอุณหภูมิที่มีผลต่อไอของรูบิเดียม ณ เส้นพลังงาน D₂ ผู้วิจัยได้ใช้เทคนิคการดูดกลืนพลังงานสองโพตอนในการวัดการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม และใช้เครื่องสเปกโทมิเตอร์ มิเตอร์วัดกำลังความเข้มแสง และกล้องดิจิตอลในการวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งจะแสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

- 4.1 การควบคุมอุณหภูมิของเซลล์ไอรูบิเดียมจากแผ่นให้ความร้อนเพลเทียร์
- 4.2 ผลของสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานของไอรูบิเดียม ณ เส้นพลังงาน D₂
- 4.3 ผลของความเข้มแสงของลำแสงจากการดูดกลืนพลังงานของไอรูบิเดียม ณ เส้นพลังงาน D₂
- 4.4 ภาพแสดงการคายพลังงานของอะตอมรูบิเดียม เมื่ออะตอมรูบิเดียมมีการดูดกลืนพลังงาน ณ อุณหภูมิต่างๆ

4.1 การควบคุมอุณหภูมิของเซลล์ไอรูบิเดียมจากแผ่นให้ความร้อนเพลเทียร์

การควบคุมอุณหภูมิของเซลล์ไอรูบิเดียม การให้ความร้อนแก่เซลล์ไอรูบิเดียมโดยจะใช้แผ่นเพลเทียร์แพร่เข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียม โดยโมดูลควบคุมอุณหภูมิเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมแผ่นเพลเทียร์ผ่านรีเลย์ โดยสามารถตั้งโปรแกรมให้เมื่อถึงอุณหภูมิที่กำหนดแล้วให้รีเลย์ตัดการทำงาน โดยการควบคุมอุณหภูมิผ่านโมดูลนั้นเมื่อถึงอุณหภูมิที่กำหนดแล้ว รีเลย์จะตัดการทำงานจากการตัดกระแสไฟฟ้าจากแผ่นเพลเทียร์ที่ให้แก่เซลล์ไอรูบิเดียม ทำให้มีความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิเซลล์ ผู้ทำการวิจัยจึงทำการทดลองหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมกับแผ่นเพลเทียร์ ที่จะให้แผ่นเพลเทียร์มีอุณหภูมิ 30, 40, 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ซึ่งจะแสดงดังตารางที่ 4.1

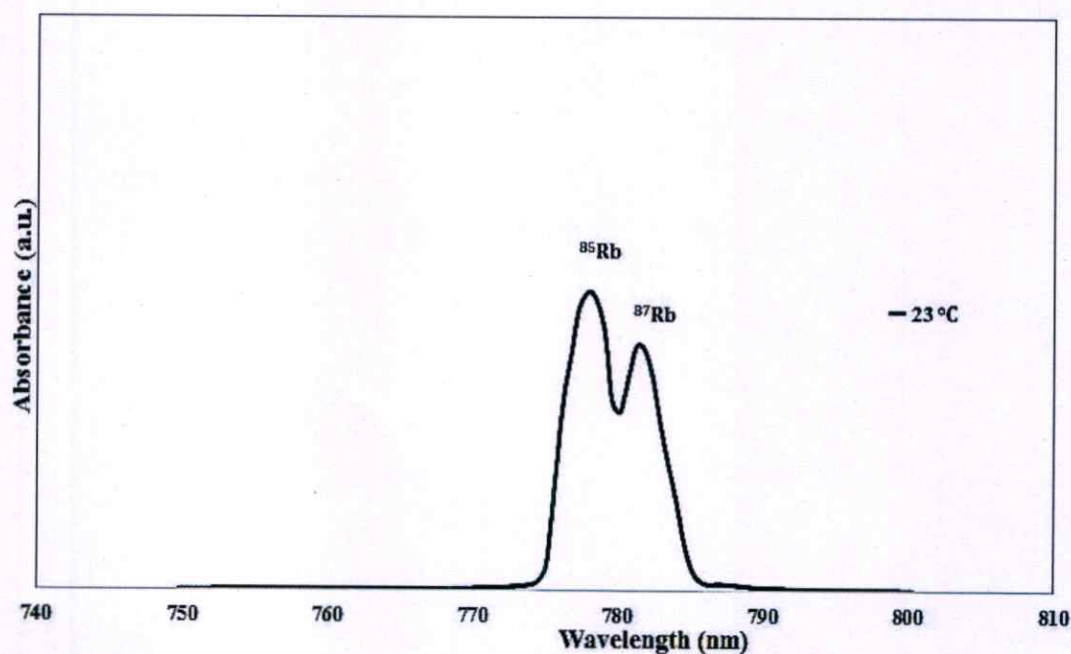
ตารางที่ 4.1 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมที่ให้แก่แผ่นเพลเทียร์ ณ อุณหภูมิต่างๆ

กระแสไฟฟ้า (A)	อุณหภูมิ (°C)			
	โมดูลควบคุมอุณหภูมิ	จอยของเซลล์ไอรูบิเดียม	ปลายของเซลล์ไอรูบิเดียม	เซลล์ไอรูบิเดียมเฉลี่ย
0.08	23.0	23.0	23.0	23.0
1.37	30.0	30.0	30.0	30.0
2.24	40.0	40.0	39.5	39.8
2.87	50.0	50.0	49.5	49.8
3.41	60.0	60.0	59.5	59.8
3.94	70.0	70.0	69.5	69.8
4.38	80.0	80.0	79.5	79.8

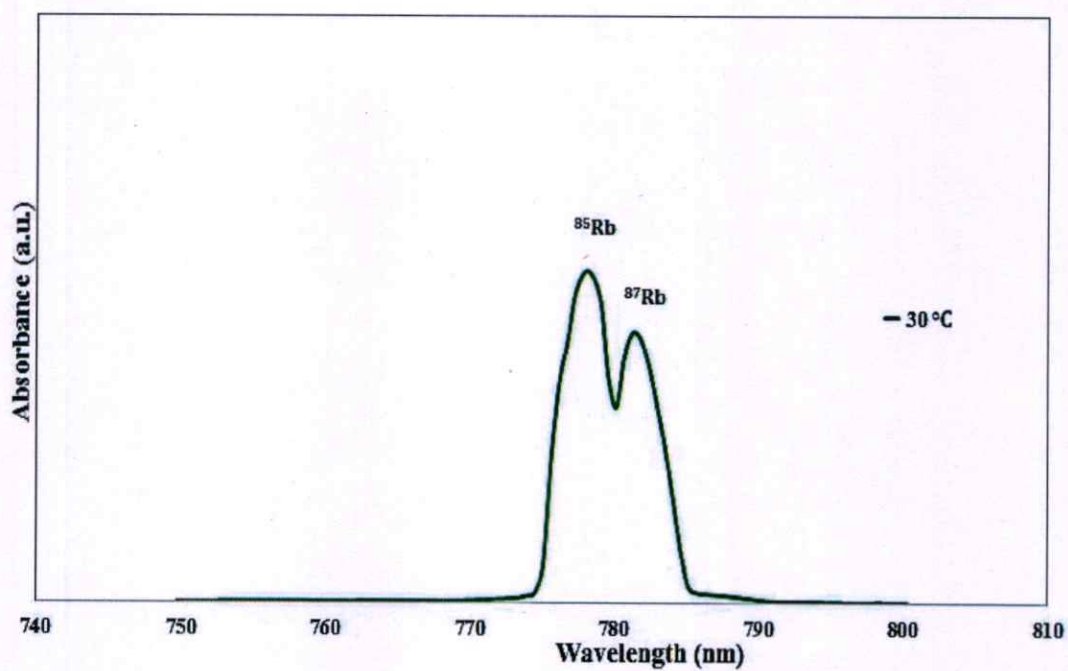
จากการทดลองหาค่ากระแสไฟฟ้าเหมาะสมที่ให้แก่วัสดุแผ่นเพลเทียร์ จะเห็นได้ว่า เมื่อแผ่นให้ความร้อนเพลเทียร์ได้รับกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม แผ่นเพลเทียร์จะให้ความร้อนที่อุณหภูมิที่คงที่ คือ 30, 40, 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ให้แก่วัสดุแผ่นเพลเทียร์จะแปรผันกับความร้อนแผ่นเพลเทียร์ให้ออกมา ดังนั้น เมื่อเราทราบถึงค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมกับแต่ละอุณหภูมิแล้วนั้น จะทำให้อุณหภูมิของเซลล์ไอรูบิเดียมมีค่าที่เสถียรและได้ค่าอุณหภูมิที่ต้องการ เมื่อได้อุณหภูมิของเซลล์ไอรูบิเดียมแล้วนั้น จะนำไปสู่การทำการทดลอง และได้ผลลัพธ์ของการทดลองในหัวข้อต่อไป

4.2 ผลของสเปกตรัมดูดกลืนพลังงานของไอรูบิเดียม ณ เส้นพลังงาน D₂

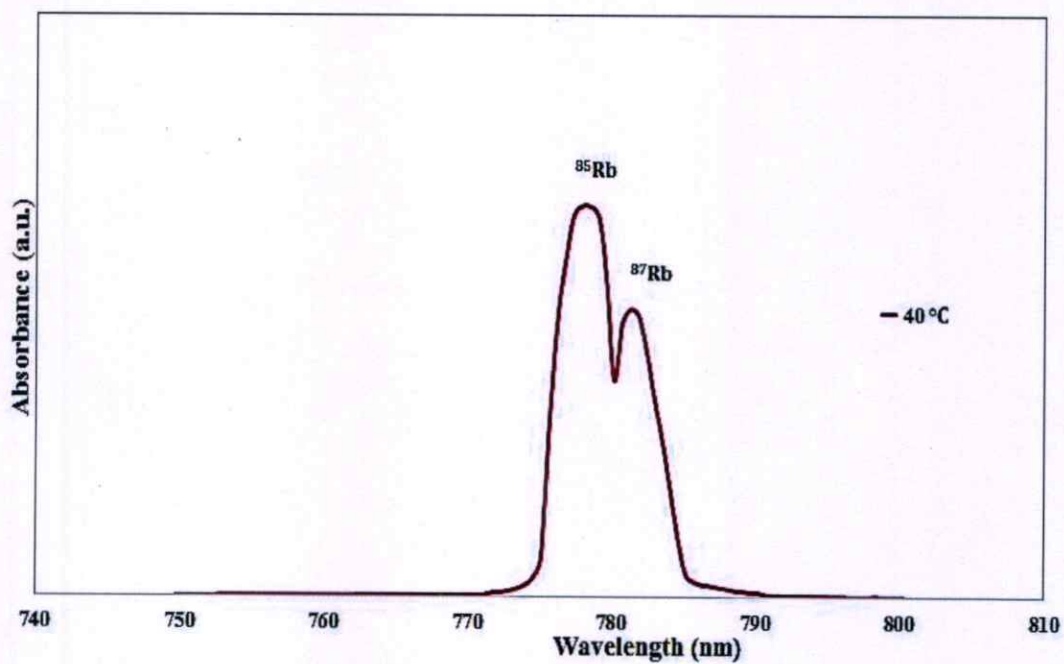
จากการติดตั้งระบบการดูดกลืนพลังงานสองโฟตอน (Two-photon Absorption Spectroscopy) สำหรับใช้วัดการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม โดยจะมีเงื่อนไขของการวัดการดูดกลืนของอะตอมรูบิเดียม คือ เงื่อนไขของอุณหภูมิที่ให้แก่วัสดุเซลล์ไอรูบิเดียม และจะทำการวัดการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียมโดยเริ่มตั้งแต่อุณหภูมิห้องที่ 23 °C และจะทำการเพิ่มอุณหภูมิของเซลล์ไอรูบิเดียมเป็น 30, 40, 50, 60, 70 และ 80 °C อุณหภูมิที่ให้แก่วัสดุเซลล์ไอรูบิเดียม จะให้ความร้อนจากแผ่นเพลเทียร์จากการทดลองที่ 4.1 อุปกรณ์ที่ใช้วัดการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม คือ สเปกโตรมิเตอร์ จะทำการวัดทั้งหมดสองลำแสงด้วยกัน คือ ลำแสงอ้างอิง (Reference Beam) และ ลำแสงที่ใช้ในการวัด (Probe beam) มีการนำแสงผ่านเข้าสู่สายใยแก้วนำแสงและนำเข้าสู่เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ เมื่อเข้าสู่เครื่องสเปกโตรมิเตอร์แล้วจะถูกคำนวณ สเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียมจากโปรแกรม Avasoft Avantes เวอร์ชัน 7.4.0 basic โดยเลเซอร์ไดโอดที่ใช้มีค่ากระแสไฟฟ้าที่ 10 มิลลิแอมป์ (mA) อุณหภูมิของเลเซอร์ไดโอด คือ 1.546 โวลต์ (V) และผลของสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียมได้ดังนี้



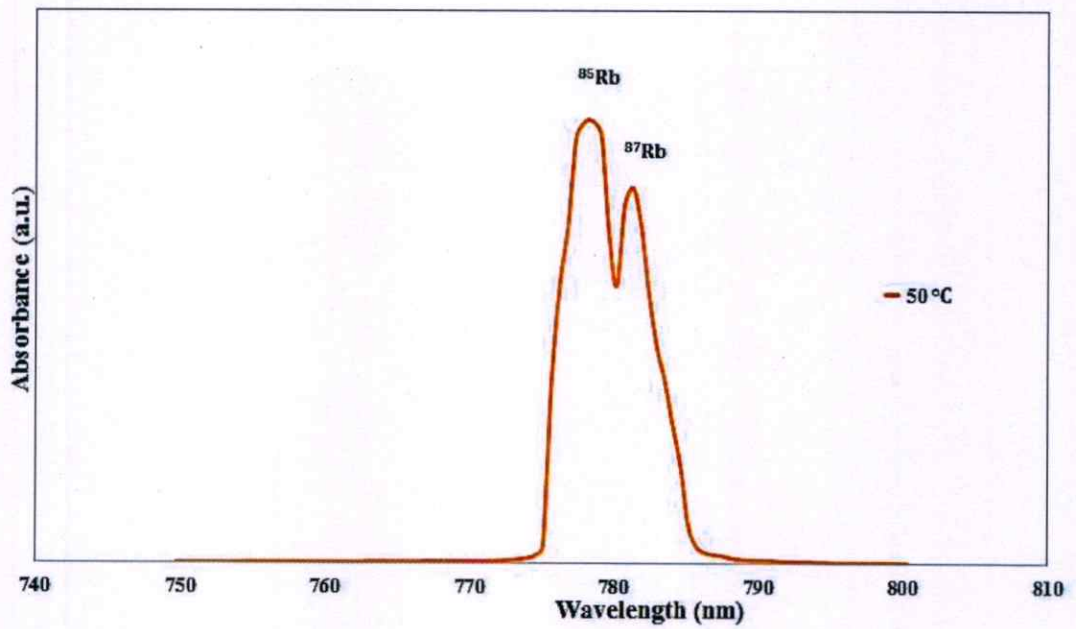
รูปที่ 4.1 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม ณ อุณหภูมิ 23 °C



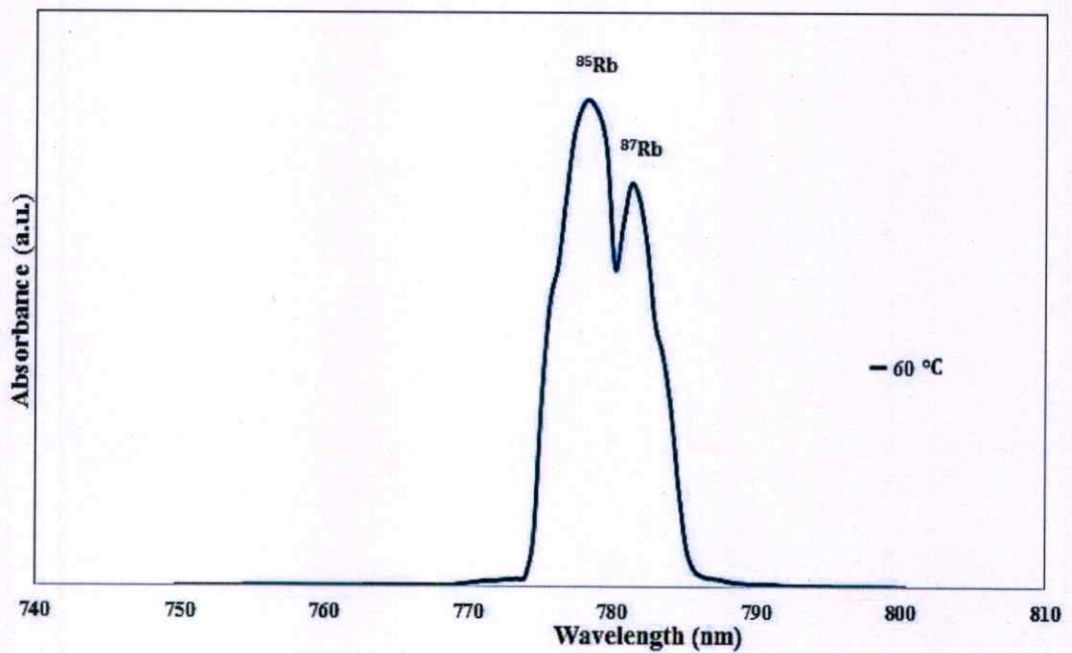
รูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม ณ อุณหภูมิ $30\text{ }^{\circ}\text{C}$



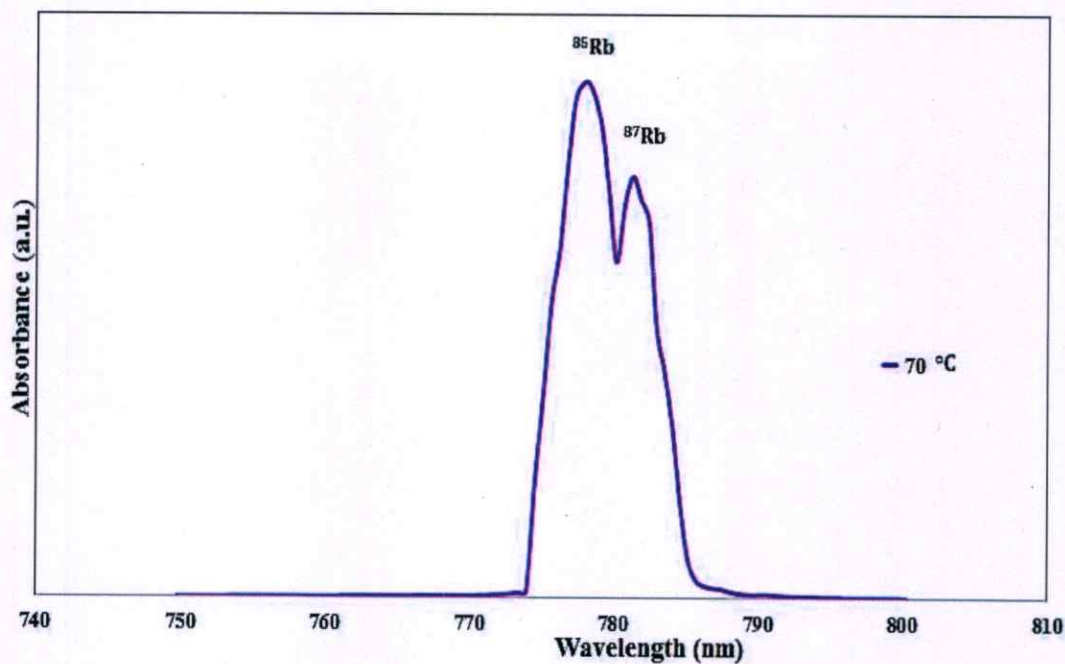
รูปที่ 4.3 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม ณ อุณหภูมิ $40\text{ }^{\circ}\text{C}$



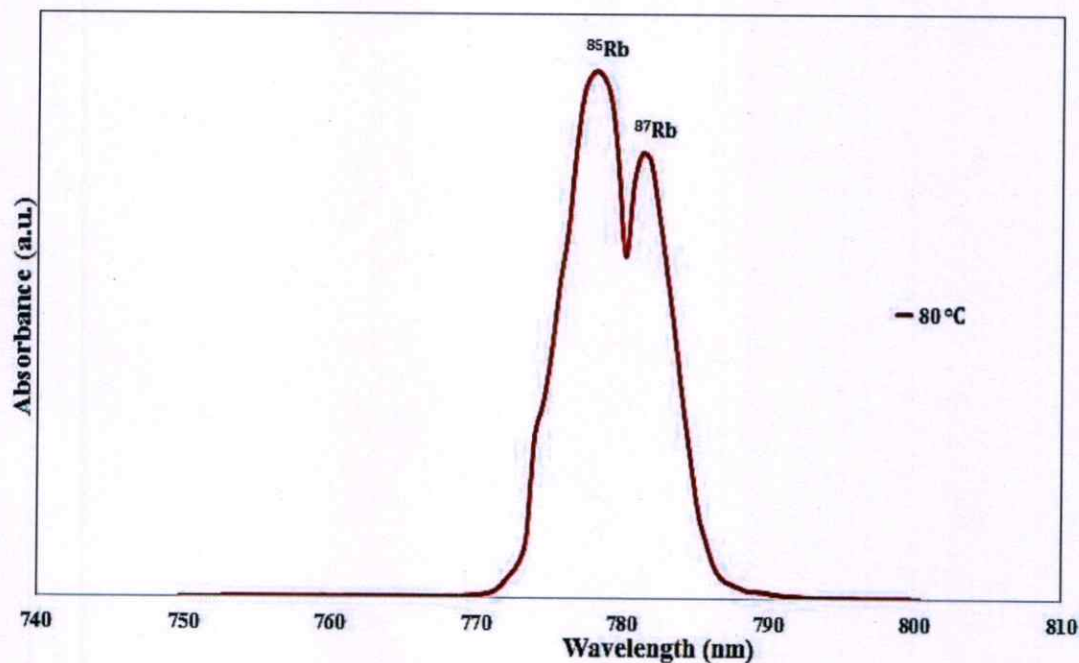
รูปที่ 4.4 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม ณ อุณหภูมิ 50 °C



รูปที่ 4.5 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม ณ อุณหภูมิ 60 °C



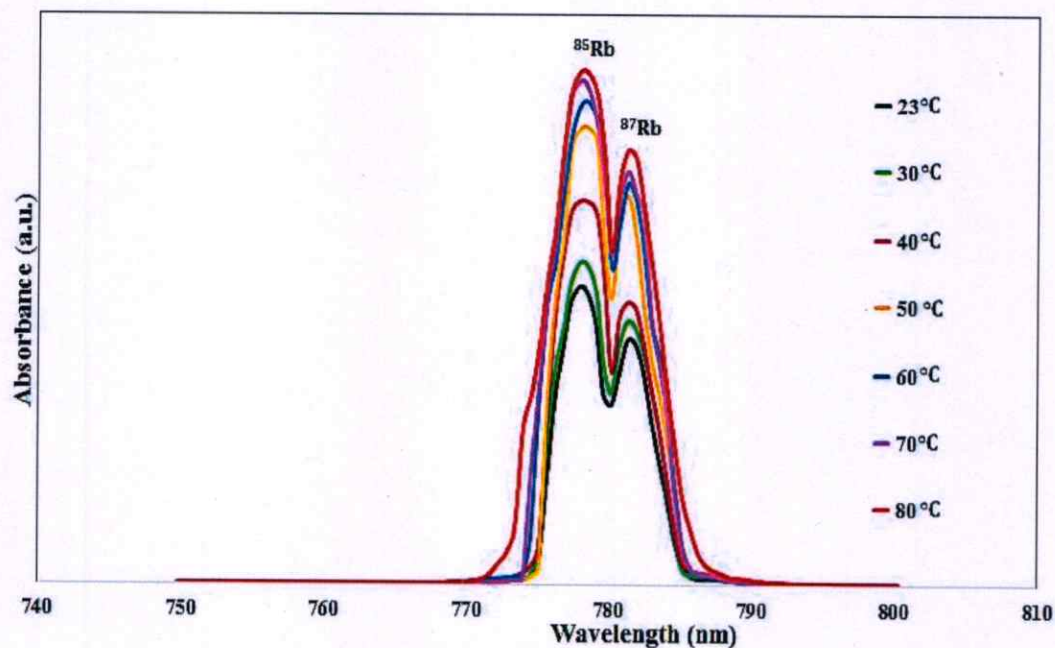
รูปที่ 4.6 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม ณ อุณหภูมิ 70 °C



รูปที่ 4.7 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม ณ อุณหภูมิ 80 °C

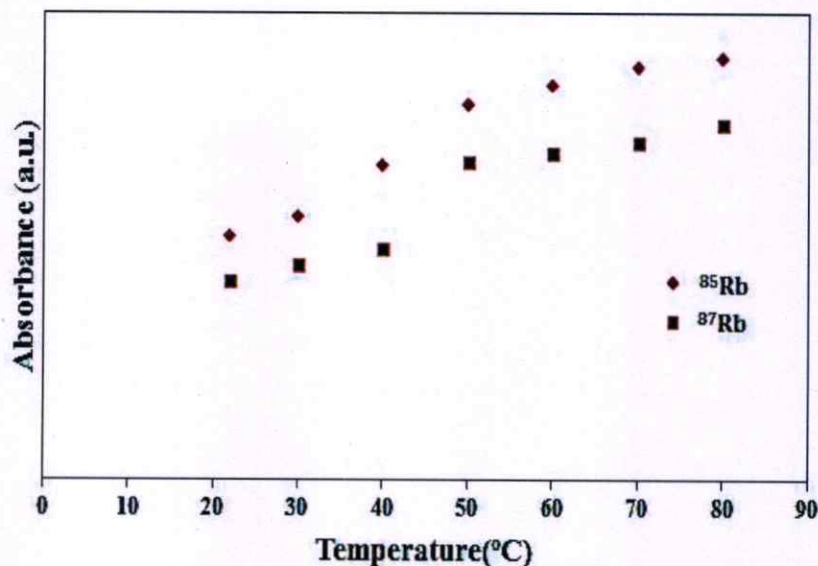
จากผลการทดลองจากเครื่องสเปกโทรมิเตอร์ ในสแกนช่วงการดูดกลืนพลังงานตั้งแต่ช่วงความยาวคลื่น 200-1100 นาโนเมตร จะได้ผลของสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม ณ อุณหภูมิ 23, 30, 40, 50, 60, 70 และ 80 °C พบว่าเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่เซลล์ไอรูบิเดียม การดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียมจะมีการดูดกลืนได้ดีขึ้น ซึ่งจากการใช้เซลล์ไอรูบิเดียม

ธรรมชาติ ภายในเซลล์จะมีส่วนประกอบไอโซโทปของอะตอมรูบิเดียม คือ ^{85}Rb (72.2%) และ ^{87}Rb (27.8%) จากสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม ณ อุณหภูมิ 23, 30, 40, 50, 60, 70 และ 80°C จะพบจุดสูงสุดของการดูดกลืนพลังงานอยู่ทั้งหมด 2 จุด โดยทั้งสองจุดนี้จะมีการดูดกลืนที่แตกต่างกัน จุดสูงสุดที่หนึ่งมีการการดูดกลืนมากกว่าจุดสูงสุดที่สอง จุดสูงสุดจุดแรกนั้นจะมีการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียมสูงสุด ซึ่งจะเป็นจุดสูงสุดของการดูดกลืนพลังงานอะตอมรูบิเดียมที่ไอโซโทป ^{85}Rb จุดสูงสุดในจุดที่สองจะมีการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียมที่ไอโซโทป ^{87}Rb ในการแสดงผลของสเปกตรัมการดูดกลืน จะแสดงในช่วงความยาวคลื่น 740-810 นาโนเมตร เนื่องจากช่วงความยาวคลื่นอื่นที่นอกเหนือจาก 740-810 นาโนเมตร จะไม่มีช่วงการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม เพื่อแสดงให้เห็นชัดจากสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียมในแต่ละอุณหภูมินั้น จะมีการนำสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียมในอุณหภูมิ 23, 30, 40, 50, 60, 70 และ 80°C มาแสดงเปรียบเทียบให้อยู่ในกราฟเดียวกัน ซึ่งจะแสดงได้ในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม ณ อุณหภูมิ 23, 30, 40, 50, 60, 70 และ 80°C

จากรูปที่ 4.8 เมื่อมีการนำสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียมมาเปรียบเทียบกันแล้ว จะพบว่าการดูดกลืนพลังงานสูงสุดนั้นจะอยู่ที่อุณหภูมิ 80°C และการดูดกลืนพลังงานต่ำสุดนั้นจะอยู่ที่อุณหภูมิ 23°C การดูดกลืนพลังงานมากหรือน้อยนั้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ สามารถแสดงแนวโน้มการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียมได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แสดงจุดสูงสุดของการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียมที่ไอโซโทป ^{85}Rb และไอโซโทป ^{87}Rb กับอุณหภูมิต่างๆ

แนวโน้มการการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม เนื่องจากอุณหภูมิของเซลล์ไอรูบิเดียม มีผลกระทบต่อ การดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม เพราะการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม นั้นจะเป็นฟังก์ชันของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียมเอง และความยาวของเซลล์ไอรูบิเดียม ในส่วนของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม นั้นก็จะเป็นฟังก์ชันของความถี่และอุณหภูมิ จะเห็นได้ชัดว่า อุณหภูมิมีผลต่อการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม

4.3 ผลของความเข้มแสงของลำแสงจากการดูดกลืนพลังงานของไอรูบิเดียม ณ เส้นพลังงาน D_2

การวัดความเข้มของลำแสง จากเทคนิคการดูดกลืนพลังงานสองโฟตอน โดยการวัดจากเครื่องวัดกำลังของลำแสง (Power Meter) และคำนวณเปลี่ยนจากกำลังของลำแสงเป็นความเข้มของลำแสง ซึ่งจะมีการวัดทั้งหมด 5 จุด จุดที่หนึ่ง วัดจากลำแสงที่ออกจากหัวของเลเซอร์ไดโอดที่ระยะห่างจากหัวเลเซอร์ไดโอด 1 เซนติเมตร จุดที่สอง วัดจากลำแสงที่สะท้อนจากตัวแยกลำแสงที่ 1 (Beam Splitter 1) โดยการวัดที่ระยะห่างจากสายใยแก้วนำแสง 1 เซนติเมตร ก่อนเส้นใยแก้วนำแสงจะผ่านเข้าสู่เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ จุดที่สาม วัดลำแสงของลำแสงที่ใช้ในการวัด (Probe Beam) ก่อนผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียม วัดจากที่ระยะห่างจากเซลล์ไอรูบิเดียม 1 เซนติเมตร จุดที่สี่ วัดลำแสงของลำแสงที่ใช้ในการวัด หลังผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียม วัดจากที่ระยะห่างจากเซลล์ไอรูบิเดียม 1 เซนติเมตร จุดที่ห้า วัดจากลำแสงที่สะท้อนจากตัวแยกลำแสงที่ 2 (Beam Splitter 2) หลังจากผ่านเซลล์ไอรูบิเดียม โดยการวัดที่ระยะห่างจากสายใยแก้วนำแสง 1 เซนติเมตร ก่อนเส้นใยแก้วนำแสงจะผ่านเข้าสู่เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ โดยเลเซอร์ไดโอดที่ใช้มีค่ากระแสไฟฟ้าที่ 10 มิลลิแอมป์ (mA) อุณหภูมิของเลเซอร์ไดโอด คือ 1.546 โวลต์ (V) และจะทำการทดลองทั้งหมด 7 อุณหภูมิดังนี้ 23, 30, 40, 50, 60, 70 และ 80 °C อุณหภูมิละ 5 ครั้ง แสดงได้ดังตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.2 แสดงความเข้มแสงจากระบบวัดการดูดกลืนพลังงานของไอรูบิเดียมที่อุณหภูมิ 23 °C

การทดลอง ที่	ความเข้มแสง หน่วย : มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (mW/cm ²)				
	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅
1	15.33	2.14	3.57	3.06	1.50
2	15.27	2.07	3.66	3.20	1.47
3	15.30	2.23	3.54	3.17	1.55
4	15.35	2.18	3.50	3.08	1.49
5	15.25	2.08	3.53	3.09	1.54
เฉลี่ย	15.30	2.14	3.56	3.12	1.51

กำหนด : I₁ คือ ความเข้มของลำที่ออกจากเลเซอร์ไดโอด

I₂ คือ ความเข้มของลำแสงอ้างอิง

I₃ คือ ความเข้มของลำแสงก่อนผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียม

I₄ คือ ความเข้มของลำแสงหลังผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียม

I₅ คือ ความเข้มของลำแสงที่ใช้วัดก่อนเข้าสู่เครื่องสเปกโตรมิเตอร์

ตารางที่ 4.3 แสดงความเข้มของลำแสงที่ถูกดูดกลืนจากอะตอมรูบิเดียมที่อุณหภูมิ 23 °C

การทดลองที่	ความเข้มแสง หน่วย : มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (mW/cm ²)		
	I ₃	I ₄	I _T
1	3.57	3.06	0.51
2	3.66	3.20	0.46
3	3.54	3.17	0.37
4	3.50	3.08	0.42
5	3.53	3.09	0.44
เฉลี่ย	3.56	3.12	0.44

กำหนด : I₃ คือ ความเข้มของลำแสงก่อนผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียม

I₄ คือ ความเข้มของลำแสงหลังผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียม

I_T คือ ผลต่างของความเข้มของลำแสงก่อนผ่านและหลังผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียม

จากผลการทดลองที่อุณหภูมิ 23 °C ตารางที่ 4.2 ความเข้มแสงจากเลเซอร์ไดโอด (I₁) เฉลี่ย 15.30 mW/cm² ความเข้มของลำแสงอ้างอิงจะมีความเข้มแสง (I₂) เฉลี่ย 2.14 mW/cm² ความเข้มของลำแสงก่อนผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียมจะมีความเข้มแสง (I₃) เฉลี่ย 3.56 mW/cm² ความเข้มของลำแสงหลังผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียมจะมีความเข้มแสง (I₄) เฉลี่ย 3.12 mW/cm² และสุดท้าย ความเข้มของลำแสงที่ใช้วัดก่อนเข้าสู่เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (I₅) เฉลี่ย 1.51 mW/cm² เมื่อพิจารณาถึงการ

ดูคลื่นพลังงานของอะตอมรูบิเดียม ผลต่างเฉลี่ยของความเข้มของลำแสงก่อนผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียม (I_3) กับ ความเข้มของลำแสงหลังผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียม (I_4) แสดงได้ดังตารางที่ 4.3 ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 0.44 mW/cm^2

ตารางที่ 4.4 แสดงความเข้มแสงจากระบบวัดการดูดกลืนพลังงานของไอรูบิเดียมที่อุณหภูมิ 30°C

การทดลองที่	ความเข้มแสง				
	หน่วย : มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (mW/cm^2)				
	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5
1	15.34	2.09	3.60	3.02	1.48
2	15.29	2.13	3.49	2.98	1.50
3	15.30	2.16	3.50	2.98	1.48
4	15.27	2.14	3.57	3.07	1.52
5	15.30	2.18	3.54	3.05	1.47
เฉลี่ย	15.30	2.14	3.54	3.02	1.49

กำหนด : I_1 คือ ความเข้มของลำที่ออกจากเลเซอร์ไดโอด

I_2 คือ ความเข้มของลำแสงอ้างอิง

I_3 คือ ความเข้มของลำแสงก่อนผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียม

I_4 คือ ความเข้มของลำแสงหลังผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียม

I_5 คือ ความเข้มของลำแสงที่ใช้วัดก่อนเข้าสู่เครื่องสเปกโตรมิเตอร์

ตารางที่ 4.5 แสดงความเข้มของลำแสงที่ถูกดูดกลืนจากอะตอมรูบิเดียมที่อุณหภูมิ 30°C

การทดลองที่	ความเข้มแสง		
	หน่วย : มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (mW/cm^2)		
	I_3	I_4	I_T
1	3.60	3.02	0.58
2	3.49	2.98	0.51
3	3.50	2.98	0.52
4	3.57	3.07	0.50
5	3.54	3.05	0.49
เฉลี่ย	3.54	3.02	0.52

กำหนด : I_3 คือ ความเข้มของลำแสงก่อนผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียม

I_4 คือ ความเข้มของลำแสงหลังผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียม

I_T คือ ผลต่างของความเข้มของลำแสงก่อนผ่านและหลังผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียม

จากผลการทดลองที่อุณหภูมิ 30°C ตารางที่ 4.4 ความเข้มแสงจากเลเซอร์ไดโอด (I_1) เฉลี่ย 15.30 mW/cm^2 ความเข้มของลำแสงอ้างอิงจะมีความเข้มแสง (I_2) เฉลี่ย 2.14 mW/cm^2 ความเข้มของลำแสงก่อนผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียมจะมีความเข้มแสง (I_3) เฉลี่ย 3.54 mW/cm^2 ความเข้มของลำแสงหลังผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียมจะมีความเข้มแสง (I_4) เฉลี่ย 3.02 mW/cm^2 และสุดท้าย ความเข้มของลำแสงที่ใช้วัดก่อนเข้าสู่เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (I_5) เฉลี่ย 1.49 mW/cm^2 เมื่อพิจารณาถึงการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม ผลต่างเฉลี่ยของความเข้มของลำแสงก่อนผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียม (I_3) กับ ความเข้มของลำแสงหลังผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียม (I_4) แสดงได้ดังตารางที่ 4.5 ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 0.52 mW/cm^2

ตารางที่ 4.6 แสดงความเข้มแสงจากระบบวัดการดูดกลืนพลังงานของโอรูบิเดียมที่อุณหภูมิ 40°C

การทดลองที่	ความเข้มแสง				
	หน่วย : มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (mW/cm^2)				
	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5
1	15.35	2.18	3.56	2.79	1.42
2	15.27	2.17	3.54	2.76	1.37
3	15.32	2.18	3.55	2.84	1.43
4	15.35	2.20	3.59	2.85	1.39
5	15.36	2.17	3.56	2.86	1.34
เฉลี่ย	15.33	2.18	3.56	2.82	1.39

กำหนด : I_1 คือ ความเข้มของลำที่ออกจากเลเซอร์ไดโอด

I_2 คือ ความเข้มของลำแสงอ้างอิง

I_3 คือ ความเข้มของลำแสงก่อนผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียม

I_4 คือ ความเข้มของลำแสงหลังผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียม

I_5 คือ ความเข้มของลำแสงที่ใช้วัดก่อนเข้าสู่เครื่องสเปกโตรมิเตอร์

ตารางที่ 4.7 แสดงความเข้มของลำแสงที่ถูกดูดกลืนจากอะตอมรูบิเดียมที่อุณหภูมิ 40°C

การทดลองที่	ความเข้มแสง		
	หน่วย : มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (mW/cm^2)		
	I_3	I_4	I_T
1	3.56	2.79	0.77
2	3.54	2.76	0.78
3	3.55	2.84	0.71
4	3.59	2.85	0.74
5	3.56	2.86	0.70
เฉลี่ย	3.56	2.82	0.74

กำหนด : I_3 คือ ความเข้มของลำแสงก่อนผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียม

I_4 คือ ความเข้มของลำแสงหลังผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียม

I_T คือ ผลต่างของความเข้มของลำแสงก่อนผ่านและหลังผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียม

จากผลการทดลองที่อุณหภูมิ $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตารางที่ 4.6 ความเข้มแสงจากเลเซอร์ไดโอด (I_1) เฉลี่ย 15.33 mW/cm^2 ความเข้มของลำแสงอ้างอิงจะมีความเข้มแสง (I_2) เฉลี่ย 2.18 mW/cm^2 ความเข้มของลำแสงก่อนผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียมจะมีความเข้มแสง (I_3) เฉลี่ย 3.56 mW/cm^2 ความเข้มของลำแสงหลังผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียมจะมีความเข้มแสง (I_4) เฉลี่ย 2.92 mW/cm^2 และสุดท้าย ความเข้มของลำแสงที่ใช้วัดก่อนเข้าสู่เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (I_5) เฉลี่ย 1.42 mW/cm^2 เมื่อพิจารณาถึงการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม ผลต่างเฉลี่ยของความเข้มของลำแสงก่อนผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียม (I_3) กับ ความเข้มของลำแสงหลังผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียม (I_4) แสดงได้ดังตารางที่ 4.7 ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 0.64 mW/cm^2

ตารางที่ 4.8 แสดงความเข้มแสงจากระบบวัดการดูดกลืนพลังงานของโอรูบิเดียมที่อุณหภูมิ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$

การทดลองที่	ความเข้มแสง				
	หน่วย : มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (mW/cm^2)				
	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5
1	15.31	2.14	3.62	2.62	1.27
2	15.35	2.17	3.49	2.51	1.30
3	15.30	2.12	3.47	2.57	1.20
4	15.27	2.20	3.58	2.70	1.22
5	15.32	2.17	3.59	2.60	1.31
เฉลี่ย	15.31	2.16	3.55	2.60	1.26

กำหนด : I_1 คือ ความเข้มของลำที่ออกจากเลเซอร์ไดโอด

I_2 คือ ความเข้มของลำแสงอ้างอิง

I_3 คือ ความเข้มของลำแสงก่อนผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียม

I_4 คือ ความเข้มของลำแสงหลังผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียม

I_5 คือ ความเข้มของลำแสงที่ใช้วัดก่อนเข้าสู่เครื่องสเปกโตรมิเตอร์

ตารางที่ 4.9 แสดงความเข้มของลำแสงที่ถูกดูดกลืนจากอะตอมรูบิเดียมที่อุณหภูมิ 50 °C

การทดลองที่	ความเข้มแสง		
	หน่วย : มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (mW/cm ²)		
	I ₃	I ₂	I _T
1	3.62	2.62	1.00
2	3.49	2.51	0.98
3	3.47	2.57	0.90
4	3.58	2.70	0.88
5	3.59	2.60	0.99
เฉลี่ย	3.55	2.60	0.95

กำหนด : I₃ คือ ความเข้มของลำแสงก่อนผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียม

I₄ คือ ความเข้มของลำแสงหลังผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียม

I_T คือ ผลต่างของความเข้มของลำแสงก่อนผ่านและหลังผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียม

จากผลการทดลองที่อุณหภูมิ 50 °C ตารางที่ 4.8 ความเข้มแสงจากเลเซอร์ไดโอด (I₁) เฉลี่ย 15.31 mW/cm² ความเข้มของลำแสงอ้างอิงจะมีความเข้มแสง (I₂) เฉลี่ย 2.16 mW/cm² ความเข้มของลำแสงก่อนผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียมจะมีความเข้มแสง (I₃) เฉลี่ย 3.55 mW/cm² ความเข้มของลำแสงหลังผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียมจะมีความเข้มแสง (I₄) เฉลี่ย 2.60 mW/cm² และสุดท้าย ความเข้มของลำแสงที่ใช้วัดก่อนเข้าสู่เครื่องสเปกโทรมิเตอร์ (I₅) เฉลี่ย 1.26 mW/cm² เมื่อพิจารณาถึงการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม ผลต่างเฉลี่ยของความเข้มของลำแสงก่อนผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียม (I₃) กับ ความเข้มของลำแสงหลังผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียม (I₄) แสดงได้ดังตารางที่ 4.9 ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 0.95 mW/cm²

ตารางที่ 4.10 แสดงความเข้มแสงจากระบบวัดการดูดกลืนพลังงานของไอรูบิเดียมที่อุณหภูมิ 60 °C

การทดลองที่	ความเข้มแสง				
	หน่วย : มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (mW/cm ²)				
	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅
1	15.22	2.12	3.62	2.60	1.13
2	15.28	2.07	3.53	2.40	1.24
3	15.35	2.14	3.67	2.61	1.16
4	15.26	2.09	3.59	2.57	1.15
5	15.31	2.13	3.59	2.48	1.27
เฉลี่ย	15.28	2.11	3.60	2.52	1.19

กำหนด : I₁ คือ ความเข้มของลำที่ออกจากเลเซอร์ไดโอด

I_2 คือ ความเข้มของลำแสงอ้างอิง

I_3 คือ ความเข้มของลำแสงก่อนผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียม

I_4 คือ ความเข้มของลำแสงหลังผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียม

I_5 คือ ความเข้มของลำแสงที่ใช้วัดก่อนเข้าสู่เครื่องสเปกโตรมิเตอร์

ตารางที่ 4.11 แสดงความเข้มของลำแสงที่ถูกดูดกลืนจากอะตอมรูบิเดียมที่อุณหภูมิ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$

การทดลองที่	ความเข้มแสง		
	หน่วย : มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (mW/cm^2)		
	I_3	I_4	I_T
1	3.62	2.60	1.02
2	3.53	2.40	1.19
3	3.67	2.61	1.06
4	3.59	2.57	1.02
5	3.59	2.48	1.11
เฉลี่ย	3.60	2.52	1.08

กำหนด : I_3 คือ ความเข้มของลำแสงก่อนผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียม

I_4 คือ ความเข้มของลำแสงหลังผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียม

I_T คือ ผลต่างของความเข้มของลำแสงก่อนผ่านและหลังผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียม

จากผลการทดลองที่อุณหภูมิ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตารางที่ 4.10 ความเข้มแสงจากเลเซอร์ไดโอด (I_1) เฉลี่ย $15.28\text{ mW}/\text{cm}^2$ ความเข้มของลำแสงอ้างอิงจะมีความเข้มแสง (I_2) เฉลี่ย $2.11\text{ mW}/\text{cm}^2$ ความเข้มของลำแสงก่อนผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียมจะมีความเข้มแสง (I_3) เฉลี่ย $3.60\text{ mW}/\text{cm}^2$ ความเข้มของลำแสงหลังผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียมจะมีความเข้มแสง (I_4) เฉลี่ย $2.52\text{ mW}/\text{cm}^2$ และสุดท้าย ความเข้มของลำแสงที่ใช้วัดก่อนเข้าสู่เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (I_5) เฉลี่ย $1.19\text{ mW}/\text{cm}^2$ เมื่อพิจารณาถึงการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม ผลต่างเฉลี่ยของความเข้มของลำแสงก่อนผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียม (I_3) กับ ความเข้มของลำแสงหลังผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียม (I_4) แสดงได้ดังตารางที่ 4.11 ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ $1.08\text{ mW}/\text{cm}^2$

ตารางที่ 4.12 แสดงความเข้มแสงจากระบบวัดการดูดกลืนพลังงานของโอรูบิเดียมที่อุณหภูมิ 70 °C

การทดลองที่	ความเข้มแสง หน่วย : มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (mW/cm ²)				
	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅
1	15.38	2.14	3.57	2.41	1.13
2	15.24	2.12	3.52	2.30	1.08
3	15.28	2.09	3.59	2.39	1.10
4	15.39	2.22	3.52	2.27	1.17
5	15.36	2.18	3.60	2.38	1.06
เฉลี่ย	15.33	2.15	3.56	2.35	1.09

กำหนด : I₁ คือ ความเข้มของลำที่ออกจากเลเซอร์ไดโอด

I₂ คือ ความเข้มของลำแสงอ้างอิง

I₃ คือ ความเข้มของลำแสงก่อนผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียม

I₄ คือ ความเข้มของลำแสงหลังผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียม

I₅ คือ ความเข้มของลำแสงที่ใช้วัดก่อนเข้าสู่เครื่องสเปกโตรมิเตอร์

ตารางที่ 4.13 แสดงความเข้มของลำแสงที่ถูกดูดกลืนจากอะตอมรูบิเดียมที่อุณหภูมิ 70 °C

การทดลองที่	ความเข้มแสง หน่วย : มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (mW/cm ²)		
	I ₃	I ₄	I _T
1	3.57	2.41	1.16
2	3.52	2.30	1.22
3	3.59	2.39	1.20
4	3.52	2.27	1.25
5	3.60	2.38	1.22
เฉลี่ย	3.56	2.35	1.21

กำหนด : I₃ คือ ความเข้มของลำแสงก่อนผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียม

I₄ คือ ความเข้มของลำแสงหลังผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียม

I_T คือ ผลต่างของความเข้มของลำแสงก่อนผ่านและหลังผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียม

จากผลการทดลองที่อุณหภูมิ 70 °C ตารางที่ 4.12 ความเข้มแสงจากเลเซอร์ไดโอด (I₁) เฉลี่ย 15.33 mW/cm² ความเข้มของลำแสงอ้างอิงจะมีความเข้มแสง (I₂) เฉลี่ย 2.15 mW/cm² ความเข้มของลำแสงก่อนผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียมจะมีความเข้มแสง (I₃) เฉลี่ย 3.50 mW/cm² ความเข้มของลำแสงหลังผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียมจะมีความเข้มแสง (I₄) เฉลี่ย 2.29 mW/cm² และ

สุดท้าย ความเข้มของลำแสงที่ใช้วัดก่อนเข้าสู่เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (I_5) เฉลี่ย 1.09 mW/cm^2 เมื่อพิจารณาถึงการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม ผลต่างเฉลี่ยของความเข้มของลำแสงก่อนผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียม (I_3) กับ ความเข้มของลำแสงหลังผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียม (I_4) แสดงได้ดังตารางที่ 4.13 ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 1.21 mW/cm^2

ตารางที่ 4.14 แสดงความเข้มแสงจากระบบวัดการดูดกลืนพลังงานของไอรูบิเดียมที่อุณหภูมิ 80°C

การทดลองที่	ความเข้มแสง				
	หน่วย : มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (mW/cm^2)				
	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5
1	15.30	2.15	3.51	2.17	0.98
2	15.29	2.13	3.58	2.28	1.06
3	15.27	2.10	3.43	2.19	1.00
4	15.33	2.21	3.62	2.26	0.95
5	15.26	2.16	3.56	2.25	1.11
เฉลี่ย	15.29	2.15	3.54	2.23	1.02

กำหนด : I_1 คือ ความเข้มของลำที่ออกจากเลเซอร์ไดโอด

I_2 คือ ความเข้มของลำแสงอ้างอิง

I_3 คือ ความเข้มของลำแสงก่อนผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียม

I_4 คือ ความเข้มของลำแสงหลังผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียม

I_5 คือ ความเข้มของลำแสงที่ใช้วัดก่อนเข้าสู่เครื่องสเปกโตรมิเตอร์

ตารางที่ 4.15 แสดงความเข้มของลำแสงที่ถูกดูดกลืนจากอะตอมรูบิเดียมที่อุณหภูมิ 80°C

การทดลองที่	ความเข้มแสง		
	หน่วย : มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (mW/cm^2)		
	I_3	I_4	I_T
1	3.51	2.17	1.34
2	3.58	2.28	1.30
3	3.43	2.19	1.24
4	3.62	2.26	1.36
5	3.56	2.25	1.31
เฉลี่ย	3.54	2.23	1.31

กำหนด : I_3 คือ ความเข้มของลำแสงก่อนผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียม

I_4 คือ ความเข้มของลำแสงหลังผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียม

I_T คือ ผลต่างของความเข้มของลำแสงก่อนผ่านและหลังผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียม

จากผลการทดลองที่อุณหภูมิ 80 °C ตารางที่ 4.14 ความเข้มแสงจากเลเซอร์ไดโอด (I_1) เฉลี่ย 15.29mW/cm² ความเข้มของลำแสงอ้างอิงจะมีความเข้มแสง (I_2) เฉลี่ย 2.15 mW/cm² ความเข้มของลำแสงก่อนผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียมจะมีความเข้มแสง (I_3) เฉลี่ย 3.54 mW/cm² ความเข้มของลำแสงหลังผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียมจะมีความเข้มแสง (I_4) เฉลี่ย 2.23 mW/cm² และสุดท้าย ความเข้มของลำแสงที่ใช้วัดก่อนเข้าสู่เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (I_5) เฉลี่ย 1.02 mW/cm² เมื่อพิจารณาถึงการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม ผลต่างเฉลี่ยของความเข้มของลำแสงก่อนผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียม (I_3) กับ ความเข้มของลำแสงหลังผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียม (I_4) แสดงได้ดัง ตารางที่ 4.15 ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 1.31mW/cm²

จากการทดลองการวัดความเข้มของลำแสงการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม เมื่อเปรียบเทียบผลต่างเฉลี่ยของความเข้มของลำแสงก่อนผ่านและหลังผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียม กับ อุณหภูมิของเซลล์โอรูบิเดียม ณ อุณหภูมิต่างๆ จะแสดงดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 แสดงผลต่างเฉลี่ยของความเข้มของลำแสงก่อนผ่านและหลังผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียมกับอุณหภูมิของเซลล์โอรูบิเดียม ณ อุณหภูมิต่างๆ

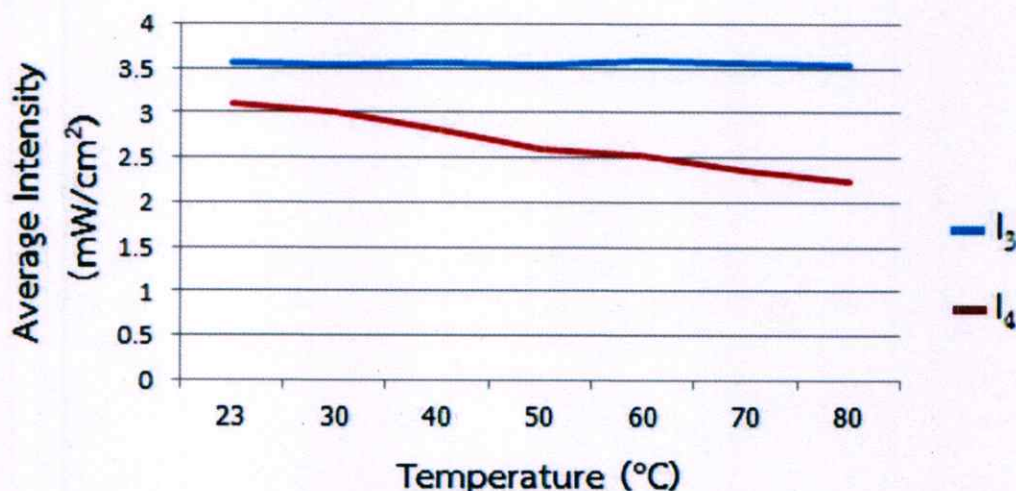
อุณหภูมิ °C	ความเข้มแสงเฉลี่ย หน่วย : มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (mW/cm ²)		
	I_3	I_4	I_T
23	3.56	3.12	0.44
30	3.54	3.02	0.52
40	3.56	2.82	0.74
50	3.55	2.60	0.95
60	3.60	2.52	1.08
70	3.56	2.35	1.21
80	3.54	2.23	1.31

กำหนด : I_3 คือ ความเข้มของลำแสงก่อนผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียม

I_4 คือ ความเข้มของลำแสงหลังผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียม

I_T คือ ผลต่างของความเข้มของลำแสงก่อนผ่านและหลังผ่านเข้าสู่เซลล์โอรูบิเดียม

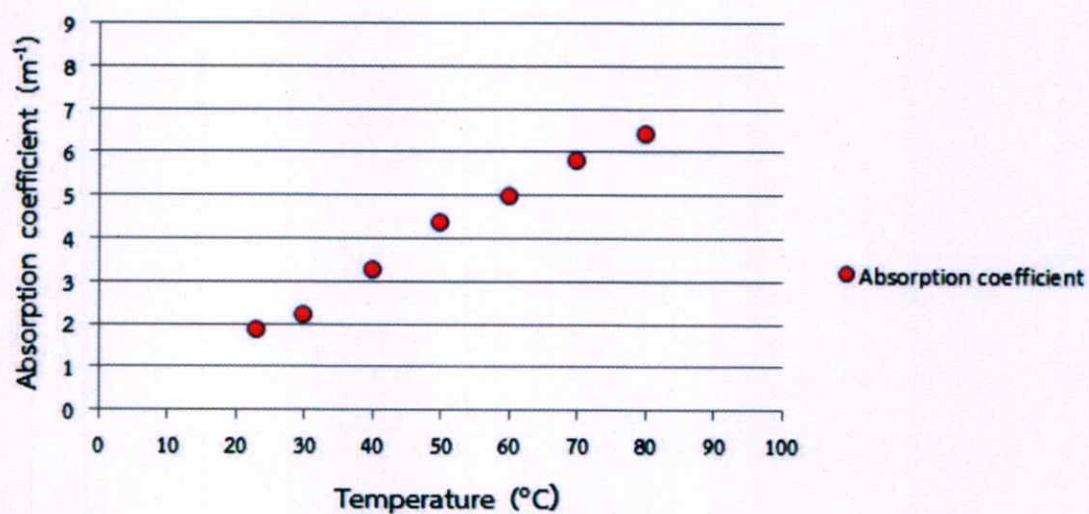
Intensity of the absorption spectra rubidium vapor at the energy D_2 line



รูปที่ 4.10 แสดงค่าเฉลี่ยของความเข้มของลำแสงก่อนผ่านและหลังผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียมกับอุณหภูมิของเซลล์ไอรูบิเดียม ณ อุณหภูมิต่างๆ

จากกราฟในรูปที่ 4.10 จะแสดงค่าเฉลี่ยของความเข้มของลำแสงก่อนผ่านและหลังผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียมกับอุณหภูมิของเซลล์ไอรูบิเดียม ณ อุณหภูมิต่างๆ พบว่าลำแสงก่อนเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียมที่อุณหภูมิของเซลล์ไอรูบิเดียมเปลี่ยนไป จะมีความเข้มของลำแสงจะยังคงเท่าเดิมทุกอุณหภูมิ แต่ความเข้มของลำแสงที่ออกจากเซลล์ไอรูบิเดียมจะมีความต่างกันว่า ถ้าเซลล์ไอรูบิเดียมมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นความเข้มของลำแสงที่ออกมาจะยิ่งน้อยลง จากตารางที่ 4.16 ผลต่างเฉลี่ยของความเข้มของลำแสงก่อนผ่านและหลังผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียม ในแต่ละอุณหภูมิ จะพบว่าจะมีความเข้มแสงบางส่วนที่หายไประหว่างระหว่างเซลล์ไอรูบิเดียม ความเข้มแสงที่หายไปนั้นจะทราบถึงอะตอมรูบิเดียมมีการดูดกลืนพลังงาน ความเข้มแสงที่หายไปในแต่ละอุณหภูมิจะมีค่าความเข้มที่ต่างกัน ที่อุณหภูมิ 80 °C จะมีค่าผลต่างเฉลี่ยของความเข้มของลำแสงก่อนผ่านและหลังผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียมมากที่สุด ซึ่งจะแสดงถึงอะตอมรูบิเดียมมีการดูดกลืนพลังงานมาก และที่อุณหภูมิห้องที่ 23 °C จะมีค่าผลต่างเฉลี่ยของความเข้มของลำแสงก่อนผ่านและหลังผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียมน้อยที่สุด ซึ่งจะแสดงถึงอะตอมรูบิเดียมมีการดูดกลืนพลังงานน้อย ดังนั้น ค่าผลต่างเฉลี่ยของความเข้มของลำแสงก่อนผ่านและหลังผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียมจะมีค่าผลต่างมากหรือน้อยนั้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะมีการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียมที่มากขึ้น และผลการทดลองจะสอดคล้องกับสมการที่ 2.6

Absorption coefficient of rubidium vapor
at the energy D_2 line

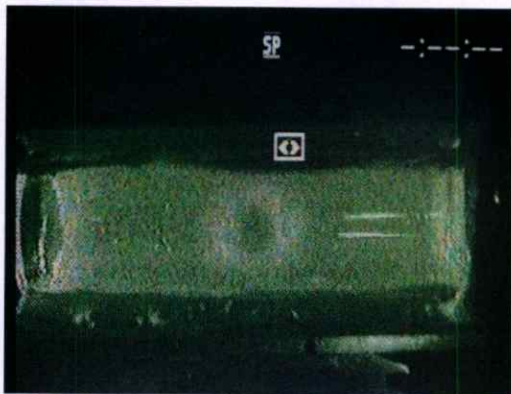


รูปที่ 4.11 แสดงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม ณ อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 4.11 จากการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม จากสมการที่ 2.6 พบว่าเมื่ออุณหภูมิของเซลล์ไอรูบิเดียมมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น จะทำให้มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียมมีค่ามากขึ้น เนื่องสัมประสิทธิ์การดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียมนั้นเป็นฟังก์ชันของ 2 ตัวแปร คือ ความถี่ และ อุณหภูมิ

4.4 ภาพแสดงการคายพลังงานของอะตอมรูบิเดียม เมื่ออะตอมรูบิเดียมมีการดูดกลืนพลังงาน ณ อุณหภูมิต่างๆ

การทดลองในส่วนของการถ่ายภาพแสดงการคายพลังงานของอะตอมรูบิเดียม จะมีการถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิตอล ภาพถ่ายจากกล้องดิจิตอลเพื่อแสดงการยืนยันถึงการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม เนื่องจากเมื่ออะตอมรูบิเดียมมีการดูดกลืนพลังงาน อะตอมรูบิเดียมจะมีการคายพลังงานแสงอะตอมรูบิเดียมออก และจะทำการถ่ายภาพขณะที่อะตอมรูบิเดียมมีการคายพลังงานแสงออกมา ณ อุณหภูมิ 23, 30, 40, 50, 60, 70 และ 80 °C แสดงได้ดังนี้



รูปที่ 4.12 เซลล์ไอรูบิเดียมที่อุณหภูมิ 23 °C ไม่มีการคายพลังงานของอะตอมรูบิเดียม (ซ้าย)



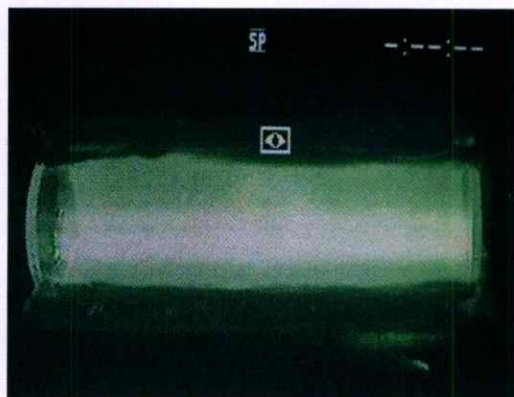
รูปที่ 4.13 การคายพลังงานของอะตอมรูบิเดียมที่ อุณหภูมิ 23 °C (ขวา)



รูปที่ 4.14 การคายพลังงานของอะตอมรูบิเดียมที่ อุณหภูมิ 30 °C (ซ้าย)



รูปที่ 4.15 การคายพลังงานของอะตอมรูบิเดียมที่ อุณหภูมิ 40 °C (ขวา)



รูปที่ 4.16 การคายพลังงานของอะตอมรูบิเดียมที่ อุณหภูมิ 50 °C (ซ้าย)



รูปที่ 4.17 การคายพลังงานของอะตอมรูบิเดียมที่ อุณหภูมิ 60 °C (ขวา)



รูปที่ 4.18 การคายพลังงานของอะตอมรูบิเดียมที่ อุณหภูมิ 70 °C (ซ้าย)



รูปที่ 4.19 การคายพลังงานของอะตอมรูบิเดียมที่ อุณหภูมิ 80 °C (ขวา)

จากการถ่ายภาพขณะที่อะตอมรูบิเดียมมีการคายพลังงานแสงออกมา ณ อุณหภูมิ 23, 30, 40, 50, 60, 70 และ 80 °C พบว่าภาพถ่ายจากกล้องดิจิทัล ที่อุณหภูมิ 80 °C มีการคายพลังงานมากที่สุด เนื่องจากที่อุณหภูมิ 80 °C มีการดูดกลืนพลังงานมากที่สุด ซึ่งการดูดกลืนพลังงานและการคายพลังงานของอะตอมรูบิเดียมจะมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน และในเมื่ออุณหภูมิของเซลล์ไอรูบิเดียมลดลง การคายพลังงานแสงของอะตอมรูบิเดียมจะเริ่มลดลงตามลำดับ

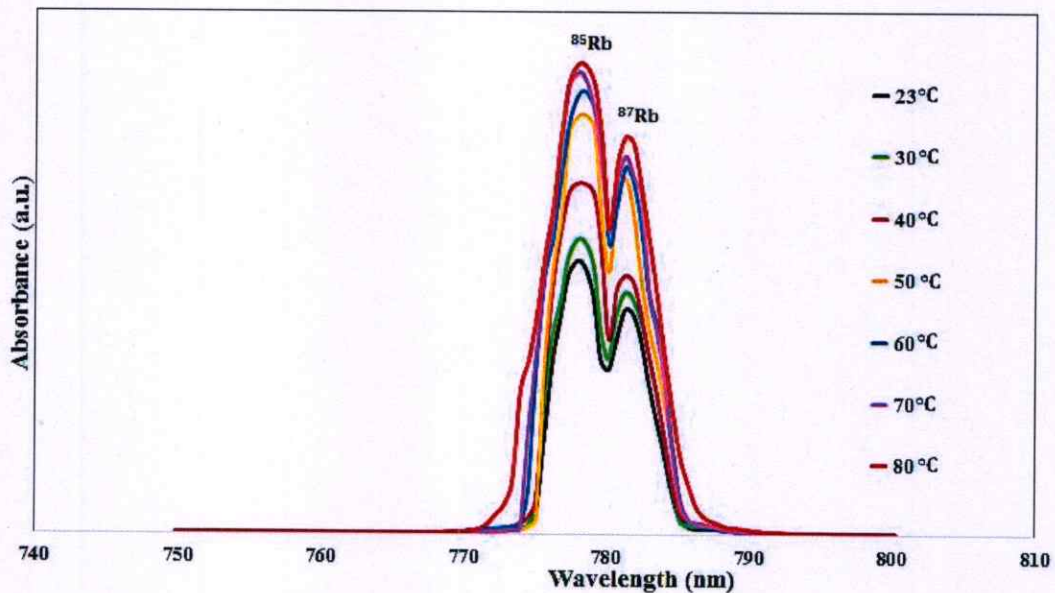
บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาการดูดกลืนพลังงานแสงเนื่องจากอุณหภูมิที่มีผลต่อไอของรูบิเดียม ณ เส้นพลังงาน D₂ โดยเทคนิคการดูดกลืนพลังงานสองโฟตอน ในการวัดการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียมจะใช้เครื่องสเปกโทรมิเตอร์และกล้องดิจิทัลในการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยสามารถสรุปผลการทดลองหลักได้ดังนี้

แผ่นเพลเทียร์จะให้ความร้อนที่อุณหภูมิที่คงที่ คือ 30, 40, 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ให้แก่แผ่นเพลเทียร์จะแปรผันกับความร้อนแผ่นเพลเทียร์ให้ออกมาดังตารางที่ 4.1 และในส่วนของอุณหภูมิเซลล์ไอรูบิเดียมจะมีอุณหภูมิที่เท่ากับกับแผ่นเพลเทียร์



รูปที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม ณ อุณหภูมิ 23, 30, 40, 50, 60, 70 และ 80 °C

การศึกษาการดูดกลืนพลังงานแสงเนื่องจากอุณหภูมิที่มีผลต่อไอของรูบิเดียม ณ เส้นพลังงาน D₂ โดยเทคนิคการดูดกลืนพลังงานสองโฟตอน ในการวัดการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม จากผลการทดลองจากเครื่องสเปกโทรมิเตอร์ ในสแกนช่วงการดูดกลืนพลังงานตั้งแต่ช่วงความยาวคลื่น 200-1100 นาโนเมตร จะได้ผลของสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม ณ อุณหภูมิ 23, 30, 40, 50, 60, 70 และ 80 °C ที่แสดงในกราฟในรูปที่ 5.1 พบว่าเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่เซลล์ไอรูบิเดียม การดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียมจะมีการดูดกลืนได้ดีขึ้น ซึ่งจากการใช้เซลล์ไอรูบิเดียมธรรมชาติ ภายในเซลล์จะมีส่วนประกอบไอโซโทปของอะตอมรูบิเดียม คือ ⁸⁵Rb (72.2%) และ ⁸⁷Rb (27.8%) จากสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม ณ อุณหภูมิ 23, 30, 40, 50, 60, 70 และ 80 °C จะพบจุดสูงสุดของการดูดกลืนพลังงานอยู่ทั้งหมด 2 จุด จุดสูงสุดจุดแรกนั้น

จะมีการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียมสูงสุด ซึ่งจะเป็นจุดสูงสุดของการดูดกลืนพลังงานอะตอมรูบิเดียมที่ไอโซโทป 85 (^{85}Rb) จุดสูงสุดในจุดที่สองจะมีการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียมที่ไอโซโทป 87 (^{87}Rb) ในการแสดงผลของสเปกตรัมการดูดกลืน จะแสดงในช่วงความยาวคลื่น 740-810 นาโนเมตร เนื่องจากช่วงความยาวคลื่นอื่นที่นอกเหนือจาก 740-810 นาโนเมตร จะไม่มีช่วงการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม

การดูดกลืนพลังงานสูงสุดนั้นจะอยู่ที่อุณหภูมิ 80 °C และการดูดกลืนพลังงานต่ำสุดนั้นจะอยู่ที่อุณหภูมิ 23 °C การดูดกลืนพลังงานมากหรือน้อยนั้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เนื่องจากอุณหภูมิของเซลล์ไอรูบิเดียมมีผลกระทบต่อ การดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม เพราะการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียมนั้นจะเป็นฟังก์ชันของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียมเอง และความยาวของเซลล์ไอรูบิเดียม ในส่วนของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียมนั้นก็จะเป็นฟังก์ชันของความถี่และอุณหภูมิ จะเห็นได้ชัดว่า อุณหภูมิมีผลต่อการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม

ในส่วนของผลต่างเฉลี่ยของความเข้มของลำแสงก่อนผ่านและหลังผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียม จะมีความเข้มแสงบางส่วนที่หายไประหว่างระหว่างเซลล์ไอรูบิเดียม ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.16 ความเข้มแสงที่หายไปนั้นจะทราบถึงอะตอมรูบิเดียมมีการดูดกลืนพลังงาน ความเข้มแสงที่หายไปในแต่ละอุณหภูมิจะมีค่าความเข้มที่ต่างกัน ที่อุณหภูมิ 80 °C จะมีค่าผลต่างเฉลี่ยของความเข้มของลำแสงก่อนผ่านและหลังผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียมมากที่สุด ซึ่งจะแสดงถึงอะตอมรูบิเดียมมีการดูดกลืนพลังงานมาก และที่อุณหภูมิห้องที่ 23 °C จะมีค่าผลต่างเฉลี่ยของความเข้มของลำแสงก่อนผ่านและหลังผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียมน้อยที่สุด ซึ่งจะแสดงถึงอะตอมรูบิเดียมมีการดูดกลืนพลังงานน้อย ดังนั้น ค่าผลต่างเฉลี่ยของความเข้มของลำแสงก่อนผ่านและหลังผ่านเข้าสู่เซลล์ไอรูบิเดียมจะมีค่าผลต่างมากหรือน้อยนั้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะมีการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียมที่มากขึ้น

การทดลองในส่วนของภาพถ่ายแสดงการคายพลังงานของอะตอมรูบิเดียม จะมีการถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัล ภาพถ่ายจากกล้องดิจิทัลเพื่อแสดงการยืนยันถึงการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม เนื่องจากเมื่ออะตอมรูบิเดียมมีการดูดกลืนพลังงาน อะตอมรูบิเดียมจะมีการคายพลังงานแสงอะตอมรูบิเดียมออก พบว่าที่อุณหภูมิ 80 °C มีการคายพลังงานมากที่สุด เนื่องจากที่อุณหภูมิ 80 °C มีการดูดกลืนพลังงานมากที่สุด ซึ่งการดูดกลืนพลังงานและการคายพลังงานของอะตอมรูบิเดียมจะมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน และในเมื่ออุณหภูมิของเซลล์ไอรูบิเดียมลดลง การคายพลังงานแสงของอะตอมรูบิเดียมจะเริ่มลดลงตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ เป็นงานวิจัยที่ศึกษาการดูดกลืนพลังงานแสงเนื่องจากอุณหภูมิที่มีผลต่อไอของรูบิเดียม ณ เส้นพลังงาน D_2 โดยเทคนิคการดูดกลืนพลังงานสองโฟตอน ผู้วิจัยได้พบกับปัญหาในงานวิจัยด้านต่างๆและแนะแนวทางในการแก้ไขไว้ดังนี้

1. ในการบันทึกผลความเข้มแสงจากมิเตอร์วัดความเข้มแสงนั้นต้องทำการวัดหลายครั้ง เนื่องจากมิเตอร์วัดความเข้มแสงนั้นมีความเสถียรภาพน้อย เพราะมีความไวต่อความร้อนที่เกิดจากลำแสง ทำให้ค่าที่แสดงบนหน้าจอของมิเตอร์วัดความเข้มแสงมีการเคลื่อนไหวอยู่

ตลอดเวลาซึ่งอาจจะมีผลต่อการทดลองได้ ดังนั้นควรจะใช้มิเตอร์วัดความเข้มแสงที่มีความละเอียดสูง

2. ภาพจากกล้องดิจิตอลนั้นมีไฟล์ภาพที่ไม่ละเอียดทำให้ภาพที่ได้มีคุณภาพที่ไม่ดีเท่าที่ควร ควรใช้กล้องดิจิตอลที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อที่จะให้ความละเอียดของภาพสูงขึ้น เพื่อที่ภาพจะได้มีความคมชัด
3. การควบคุมอุณหภูมิของเซลล์โอรูบิเดียม เมื่อมีการให้ความร้อนจากแผ่นเพลเทียร์นำความร้อนสู่เซลล์โอรูบิเดียมจะต้องรอประมาณ 5 นาที เพื่อให้อุณหภูมิของเซลล์โอรูบิเดียมมีความร้อนที่เท่ากันทั่วทั้งเซลล์เพื่อที่จะได้ผลการทดลองอย่างมีประสิทธิภาพ
4. การใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ในการวัดการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียม สายไฟเบอร์ออปติกที่ต่อหัวอุปกรณ์รับทางแสงมีขนาดเล็กมากจึงต้องมีความอดทนและพยายามในการทำให้หัวอุปกรณ์รับทางแสงของสเปกโตรมิเตอร์นั้นตรงกับลำแสงที่ผ่านเข้ามา ถ้ามีความคลาดเคลื่อนของหัววัดสเปกโตรมิเตอร์จะทำให้ผลการดูดกลืนพลังงานของอะตอมรูบิเดียมมีความคลาดเคลื่อน

5.3 งานวิจัยในอนาคต

สำหรับงานวิจัยในอนาคตสามารถมีการเพิ่มอุณหภูมิของเซลล์โอรูบิเดียมให้สูงขึ้นมากกว่า 80 องศาเซลเซียสได้ หรือ มีการลดอุณหภูมิให้ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง คือประมาณ 23 องศาเซลเซียส และสามารถใช้อิทธิพลนอกเหนือจากวิธีการดูดกลืนพลังงานสองโฟตอน และยังสามารถเปลี่ยนจากเซลล์โอรูบิเดียมเป็นเซลล์ชนิดอื่นได้ เช่น เซลล์ไอซีเซียม เซลล์ไอโพแทสเซียม เพื่อที่จะได้ทราบถึงคุณสมบัติของธาตุอื่นได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Seung-Sub Kim, Sang-Eon Park, Ho-Seong Lee, Cha-Hwan Oh, Jong-Dae Park and Hyuck Cho “High-Resolution Spectroscopy of rubidium Atoms” Jpn. J. Appl. phys. 32 3291-3295(1993)
- [2] MacAdam K B, Steinbach A and Wieman C “A narrow-band tunable diode laser system with grating feedback, and a saturated absorption spectrometer for Cs and Rb” Am. J. phys. 60 1098-111(1992)
- [3] Van Baak D “A Resonant Faraday rotation as a probe of atomic dispersion” Am. J. phys. 64 724-35 (1996)
- [4] Ho Seong Lee, Sang Eon Park, Jong Dae Park and Hyuck Cho “Zeeman effect in the saturation spectroscopy of the ^{87}Rb D₂ line” J. Opt. Soc. Am. B. 11 558-563(1994)
- [5] A. M. Akulshim, B. V. Hall, V. Ivannikov, A. A. Orel, and A. I. Sidorov “Doppler-free two-photon resonances for atom detection and sum frequency stabilization” J. Phys. B. 44 21(2011)
- [6] Lee Weller, Robert J Bettles, Paul Siddons, Charles S Adams and Ifan G Hughes “Absolute absorption on the rubidium D₁ line including resonant dipole-dipole interactions” J. Phys. B : At. Mol. Opt. Phts.44 195006(2011)
- [7] Wikipedia. “Diode laser”. [Online]. Available: <https://th.wikipedia.org/wiki/diodelaser.2561>.
- [8] สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี(สสวท.). “เลเซอร์ไดโอด”. [Online]. Available: <http://www.scimath.org/lesson-physics/item/7263-2017-06-13-13-39-22.2560>.
- [9] Paul Eliao. Tunable lasers handbook. Eastman Kodak Company Rochesrer, New York, Inc.1984.
- [10] มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. “การผลิตเลเซอร์”. [Online]. Available: http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/quantum/quantum2/quantum_25.htm.2561.
- [11] Tarun Agarwal. “Laser Diode Operation and Its Applications”. [Online]. Available: <https://www.elprocus.com/laser-diode-construction-working-applications/.2558>
- [12] ณิชากร บูลพิภพอนันต์. “การศึกษาออปติคอลสเปกโทรสโคปีจากสี่ข้อมโนแสงร่วมกับโลหะในระดับอนุภาคนาโน” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.2560.
- [13] มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. “สมบัติเชิงแสงของวัสดุ(Optical Properties)”. [Online]. Available: <http://www.physics.science.cmu.ac.th/courses/210351/Large%205.pdf.2560>

- [14] สถาบันนวัตกรรมและการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. “การวัดการดูดกลืน”. [Online]. Available: http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/color-light/page2_2.html. 2561.
- [15] Wikipedia. “Spectrometer”. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Spectrometer>. 2561.
- [16] Avantes. Enlirhtening spectrometer. Bangkok : Avantes. 2015.
- [17] MCOT Public Company Limited. “เซ็นเซอร์รับภาพ แบบ CCD และ CMOS”. [Online]. Available : http://dtv.mcot.net/mcot_one.php?dateone=1244772701. 2561.
- [18] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. “รูบิเดียม.” [Online]. Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/รูบิเดียม>. 2558.
- [19] Daniel A. Steck, “Rubidium 85 D Line Data,” available online at <http://steck.us/alkalidata> (revision 2.1.6, 20 September 2013).
- [20] Daniel A. Steck, “Rubidium 87 D Line Data,” Theoretical Division (T-8), MS B285 (2003)
- [21] Jun Ye, Steve Swartz, Peter Jungner, and John L. Hall, “Hyperfine structure and frequency of the 87Rb 5P3/2 state,” *Optics Letters* 21, 1280 (1996).
- [22] G. P. Barwood, P. Gill, and W. R. C. Rowley, “Frequency Measurements on Optically Narrowed Rb-Stabilised Laser Diodes at 780 nm and 795 nm,” *Applied Physics B* 53, 142 (1991).
- [23] U. Volz and H. Schmoranzer, “Precision Lifetime Measurements on Alkali Atoms and on Helium by Beam-Gas-Laser Spectroscopy,” *Physica Scripta* T65, 48 (1996)
- [24] Jun Ye, Steve Swartz, Peter Jungner, and John L. Hall, “Hyperfine structure and absolute frequency of the 87Rb 5P3/2 state,” *Opt. Lett.* 21, 1280 (1996).
- [25] Thorlabs. “LDM21.” [Online]. Available : https://www.thorlabs.com/Newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1378&pn=LDM21. 2561.
- [26] Thorlabs. “Laser L780P010.” [Online]. Available : <https://www.thorlabs.co.jp/thorproduct.cfm?partnumber=L780P010>. 2561.
- [27] Thorlabs. “Borosilicate Rubidium Reference Cells.” [Online]. Available : https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1470. 2561.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

งานวิจัยที่ได้เข้าร่วมนำเสนอในการประชุมวิชาการระดับชาติ

PHOTONICS EUROPE

Research and innovation addressing key topics

Conferences + Courses: 22-26 April 2018

Exhibition: 24-25 April 2018

Strasbourg Convention & Exhibition Centre
Strasbourg, France

www.spie.org/PEprogramme

Effect of temperature on the absorption of rubidium vapor cell D_2 line studied by Two-photon absorption spectroscopy

Nut Thanaboonrungrach^a, Prathan Buranasiri^a, Pichet Limsuwan^b,
and Witoon Yindeesuk^{a*}

^aDepartment of Physics, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

^bDepartment of Physics, Faculty of Science, King Mongkut's University of
Technology Thonburi, Bangkok 10140, Thailand

ABSTRACT

In this research, the effect of temperature on the absorption of rubidium vapor cell D_2 line was studied by Two-photon absorption spectroscopy. The diameter and length of cylindrical rubidium vapor cell used in this research are 25.65 mm and 82.12 mm, respectively. The temperature of rubidium cell was varied from room temperature to approximately 80 °C using a peltier-thermoelectric module. The laser diode at 778 nm was used as a light source for two-photon absorption spectroscopy. The absorption spectra of rubidium D_2 hyperfine transitions were recorded in the range of 200-1100 nm. The results show that the absorption peak at high temperature is higher than that of lower temperature.

Keywords: Two-photon absorption technique, Rubidium Vapor cell, Rubidium spectra absorption line

1. INTRODUCTION

Rubidium vapor cell is used widely in atomic physics research. Indeed, many experiments have been developed in the past years, ranging from atomic hyperfine structure studies laser spectroscopy of rubidium [1], high-resolution spectroscopy of rubidium atoms [2]. The effect on the properties of rubidium has a magnetic field and temperature, including observation of Faraday effect using the D_2 resonance line in rubidium vapor cell [3], Zeeman effect in the saturation spectroscopy of the ^{87}Rb line [4], the dependences of fluorescence intensity as function of rubidium atomic density is investigated in the temperature range of 10 to 70 °C [5], absorption spectra on the rubidium D_1 line regime for temperatures up to 170 °C using sub-Doppler spectroscopy[6].

Saturated absorption spectroscopy (single-photon spectroscopy) of rubidium is simplest experiments using tunable diode lasers in research and physics laboratory. The single-photon spectroscopy experiment apply a tunable diode laser tuned to the $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{3/2}$ transition of rubidium at wavelength 780.2 nm. Two-photon absorption spectroscopy is still the most powerful method for high-precision measurements of atom physics. An investigation of the $5S_{1/2} \rightarrow 5D_{5/2}$ two-photon transition in rubidium at wavelength 778.1 nm is a similar the single-photon spectroscopy experiment, it use same equipment. Two-photon absorption spectroscopy technique uses less equipment than the single-photon spectroscopy technique.

In this research, we the study effect of temperature on the absorption spectra of rubidium vapor cell D_2 line by two-photon absorption spectroscopy technique. When the rubidium atom is stimulated, the absorption spectra of emitting light was investigated using a digital camera. The laser diode at wavelength 778 nm was used for exploring the absorption spectra and the resolved hyperfine transitions of rubidium D_2 line. The aim of this research is to provide a detailed model of the absorption for the two-photon absorption spectroscopy technique, $5S_{1/2} \rightarrow 5D_{5/2}$ transition, and to compare absorption spectra at room temperature with those of six different temperatures. The effect of

temperature on the absorption spectra was also investigated by observing the intensity of emitting light from rubidium vapor cell.

*witoon.yi@kmitl.ac.th

2. THEORY

Energy level diagram for rubidium is illustrated in Figure 1. The rubidium D₂ line consists of 5S_{1/2}, 5P_{3/2}, 5D_{5/2} and 6P_{3/2} levels. Commonly, the spectra line corresponding to the D₂ line 5S_{1/2} → 5P_{3/2}. It is stimulated by wavelengths 780 nm. In order to encourage the change of energy level from 5P_{3/2} → 5D_{5/2} which have another type of wavelength is 776 nm. Rubidium atom is stimulated by two wavelengths, rubidium atoms emit light at 420 nm. The two-photon absorption is achieved via the simultaneous absorption of two photons from a single laser tuned to 778.1 nm which excites the electron from the 5S_{1/2} ground state to the 5D_{5/2} excited state. Fluorescence can be emitted at 420 nm from 5D_{5/2} → 6P_{3/2} → 5S_{1/2} (ground state) cascade decay. The expanded view on the right-hand side shows the relevant hyperfine structure for rubidium isotopes (⁸⁵Rb and ⁸⁷Rb).

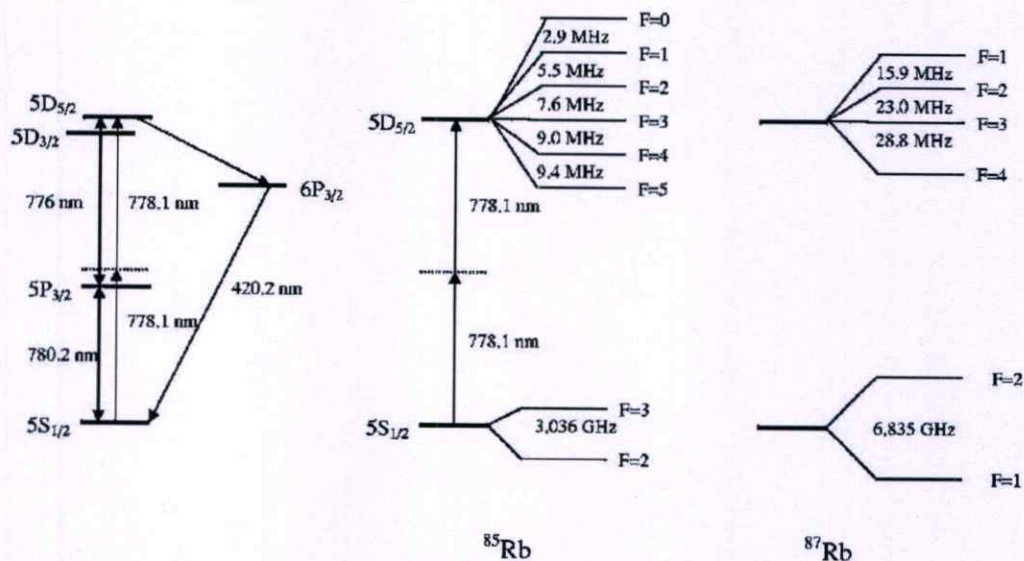


Fig.1. Diagram of energy level for rubidium. The relevant hyperfine structure for rubidium isotopes (⁸⁵Rb and ⁸⁷Rb) are shown in the expanded view on the right-hand side.

The two-photon absorption process has two counterpropagating laser beams each tuned to the laser frequency ν_L [see. Figure 2.]. We consider atoms in a vapor cell interacting with two counterpropagating beams at the same frequency ν_L in laboratory frame. In rest frame, each atom with velocity ν_z (absorbing molecule moving with a velocity as component z) interacts with two-doppler-shifted travelling waves at frequencies ν_L and ν_1 . One beam appears to be shifted by a velocity ν_1 , next beam that of the opposite with one beam shows a decrease by a velocity ν_2 , are equal to

$$(1) \quad \nu_1 = \nu_L \left[1 + \frac{\nu_z}{c} \right]$$

$$(2) \quad \nu_2 = \nu_L \left[1 - \frac{\nu_z}{c} \right]$$

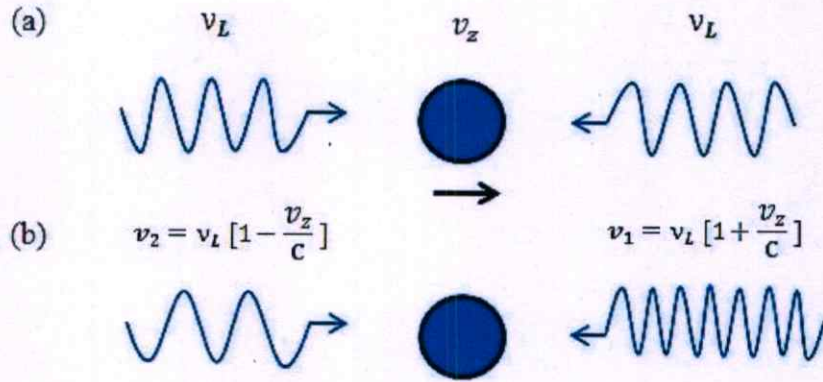


Fig. 2. (a) An atom interacts with two opposite travelling wave at the same frequency ν_L
 (b) The two frequencies are doppler shifted to ν_1 and ν_2 in the rest frame.
 By absorbing two photons travelling in opposite directions.

Atom can reach an excited state by absorbing two photons in the ground state. The energy used to excited state of atoms is obtained in equations (3).

$$\Delta E = h\nu \left[\left(1 + \frac{\nu_z}{c}\right) + \left(1 - \frac{\nu_z}{c}\right) \right] = 2h\nu \quad (3)$$

For atom in a vapor cell, the probability distribution of velocities follows a Maxwell-Boltzmann distribution. This distribution is directly translated in a Gaussian spectral lineshapes of atomic medium absorption profile. With a full width at half-maximum (FWHM) $\Delta\nu_{dop}$ is given by

$$\Delta\nu_{dop} = 2\nu_0 \sqrt{\frac{2k_B T \ln 2}{mc^2}} \quad (4)$$

where m is the atomic mass, k_B is Boltzmann's constant and T is the absolute temperature. Note that $\Delta\nu_{dop}$ increases linearly with frequency ν_0 and is thus most significant parameter for high frequency transitions in light molecules at high temperature.

3. EXPERIMENTAL

In this section, the experimental setup of two-photon absorption spectroscopy system was installed for measuring absorption spectra of rubidium D_2 line at different temperatures. Fig. 3 shows the diagram of the experimental setup of two-photon absorption spectroscopy. The light source was a commercially tunable diode lasers (THORLABS, Model L780P010) with a wavelength of 788.1 nm and a beam diameter of 2 mm. It was used for tuning the rubidium D_2 line. The output wavelength of diode lasers was controlled by current and temperature. The laser beam was first split by beam splitter/BS₁ into two beams. One beam was passed to spectrometer and used as the reference. The another beam was passed to the beam splitter/BS₂ and split into two beams. One beam, called probe beam, was reflected by mirrors M₁, M₂, and M₃ then passed through the rubidium vapor cell. From the rubidium vapor cell pass into the beam splitter. It was reflected and passed to the polarizer. Finally, the absorption spectra of rubidium D_2 line were measured by a spectrometer. The probe beam acts as an absorption spectra analyzer. The second beam, called pump beam was passed through the rubidium vapor cell, reflected at mirrors M₁, M₂, and M₃ and passed to the beam splitter/BS₂. This beam was used act as stimulate an electron.

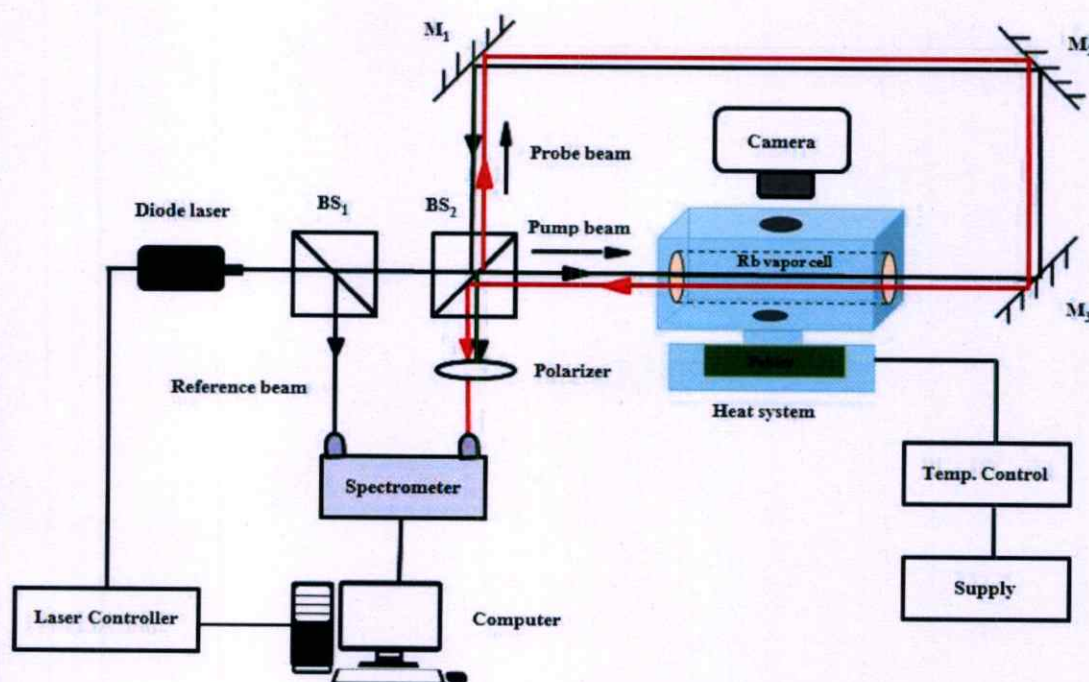


Fig. 3. Diagram of experimental setup of the two-photon absorption spectroscopy. BS, Beamsplitter; M, Mirror; Peltier, peltier-thermoelectric; Rb, Rubidium.

The rubidium vapor cell containing natural rubidium of 72% ^{85}Rb and 28% ^{87}Rb with 85 mm long and 25 mm in diameter. It was placed in an aluminium block and attached with a peltier-thermoelectric to control the temperature of the rubidium vapor cell. The temperature of rubidium vapor cell could be heated up by the peltier-thermoelectric from room temperature to a maximum temperature of approximately 80 °C. The upper side of aluminium block was drilled to get a hole with 2 mm in diameter for investigating the intensity of emitting light using a digital camera. The temperature of the rubidium vapor cell was measured using a type K thermocouple which placed at cold finger point of the rubidium vapor cell.

4. EXPERIMENTAL RESULTS

Figure 4 shows the absorption spectra of rubidium D₂ line at seven different temperatures of 23, 30, 40, 50, 60, 70 and 80 °C. The temperature starts from room temperature to 80 °C by adjusting the peltier-thermoelectric with a temperature step of 10 °C. The room temperature of the experiment is 23 °C.

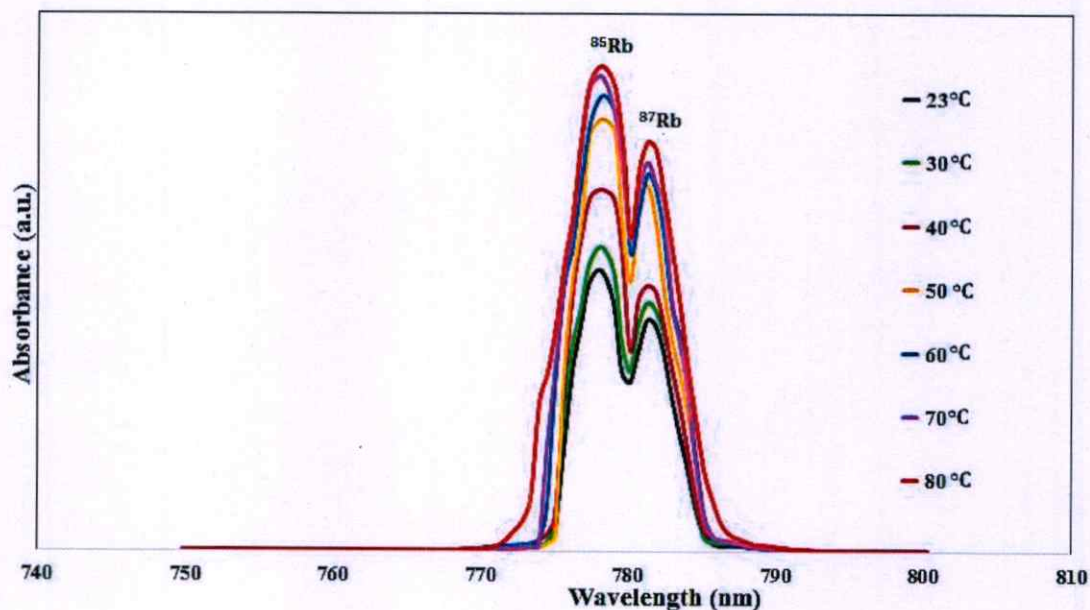


Fig. 4. Absorption spectra rubidium D₂ line at seven different temperatures.

It is seen from Fig. 4 that the absorption peak increased when the temperature of rubidium vapor cell was increased. Therefore, the maximum absorption peak was observed at a rubidium vapor cell temperature of 80 °C. During the measurement of the absorption spectra, the intensity of the light that passthrough the hole of aluminium block was also observed by digital camera to see the change in light intensity. It was found that the emitting light intensity due to the absorption increased with increasing the rubidium vapor cell temperature. Hence, the observed emitting light intensity results are in good agreement with those of the absorption spectra measurement. Since the rubidium vapor cell containing natural rubidium of 72% ⁸⁵Rb and 28% ⁸⁷Rb, 2 peaks of the absorption spectra D₂ line are observed. Peak I. (left-hand side) indicates the absorption of ⁸⁵Rb and peak II. (right-hand side) indicates the absorption of ⁸⁷Rb.

Fig. 5 shows the variation of the absorption spectra of rubidium D₂ line at different rubidium vapor cell temperatures. It is clearly seen that the absorbance increased with increasing the temperature of the rubidium vapor cell. The absorption of rubidium atomic is temperature dependence due to the number density is a strongly function of temperature. Doppler broadening of the spectral lines is dealt with in equations (4).

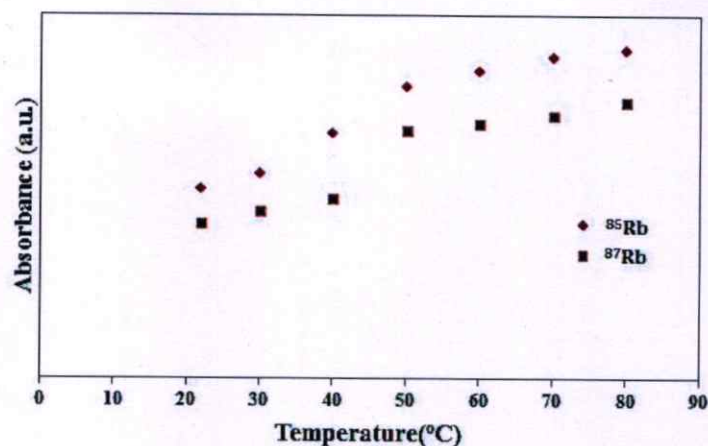


Fig. 5. Variation of the absorbance with temperatures of rubidium vapor cell.

5. CONCLUSIONS

In this work, the absorption spectra of rubidium D_2 line which are the important components for optical frequency reference, were observed using two-photon absorption spectroscopy. The absorption spectra was measured at different temperatures of rubidium vapor cell. The results show that the absorption at high rubidium vapor cell temperatures is more than that of low temperature. The absorption spectra results were confirmed by observing the emitting light during the absorption measurements were carried out. The results on the absorption spectra of rubidium vapor cell obtained in this research could be used to improve the stability of the near-infrared laser which is the future research project of Department of Physics, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors gratefully acknowledge the support of department of physics, faculty of science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. The authors would also like to thank Prof. Pichet Limsuwan who explained theoretical understanding of absorption spectra line. Finally, the authors thank Dr. Witoon Yindeesuk and Dr. Prathan Buranasiri for his supervising this research.

REFERENCES

- [1] MacAdam K B, Steinbach A and Wieman C "A narrow-band tunable diode laser system with grating feedback, and a saturated absorption spectrometer for Cs and Rb" *Am. J. phys.* 60 1098-111(1992)
- [2] Seung-Sub Kim, Sang-Eon Park, Ho-Seong Lee, Cha-Hwan Oh, Jong-Dae Park and Hyuck Cho "High-Resolution Spectroscopy of rubidium Atoms" *Jpn. J. Appl phys.* 32 3291-3295(1993)
- [3] Van Baak D "A Resonant Faraday rotation as a probe of atomic dispersion" *Am. J. phys.* 64 724-35 (1996)
- [4] Ho Seong Lee, Sang Eon Park, Jong Dae Park and Hyuck Cho "Zeeman effect in the saturation spectroscopy of the ^{87}Rb D_2 line" *J. Opt. Soc. Am. B.* 11 558-563(1994)
- [5] A. M. Akulshim, B. V. Hall, V. Ivannikov, A. A. Orel, and A. I. Sidorov "Doppler-free two-photon resonances for atom detection and sum frequency stabilization" *J. Phys. B.* 44 21(2011)
- [6] Lee Weller, Robert J Bettles, Paul Siddons, Charles S Adams and Ifan G Hughes "Absolute absorption on the rubidium D_1 line including resonant dipole-dipole interactions" *J. Phys. B : At. Mol. Opt. Phys.* 44 195006(2011)

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล	นายณัฐ ธนบูรณ์รุ่งโรจน์
วัน/เดือน/ปีเกิด	28 มีนาคม พ.ศ. 2537
ที่อยู่ปัจจุบัน	20/11 ซ.แสงชูโต 4 ต.ท่าล้อ อ.ท่าม่วง จ.กาญจนบุรี
ประวัติการศึกษา	จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น-ตอนปลาย จากโรงเรียน เฉลิมพระเกียรติสมเด็จพระศรีนครินทร์ กาญจนบุรี ต.ท่าล้อ อ.ท่าม่วง จ.กาญจนบุรี (ปีการศึกษา 2549-2554) จบการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เขตวัฒนา กรุงเทพมหานคร (ปีการศึกษา 2555-2558)