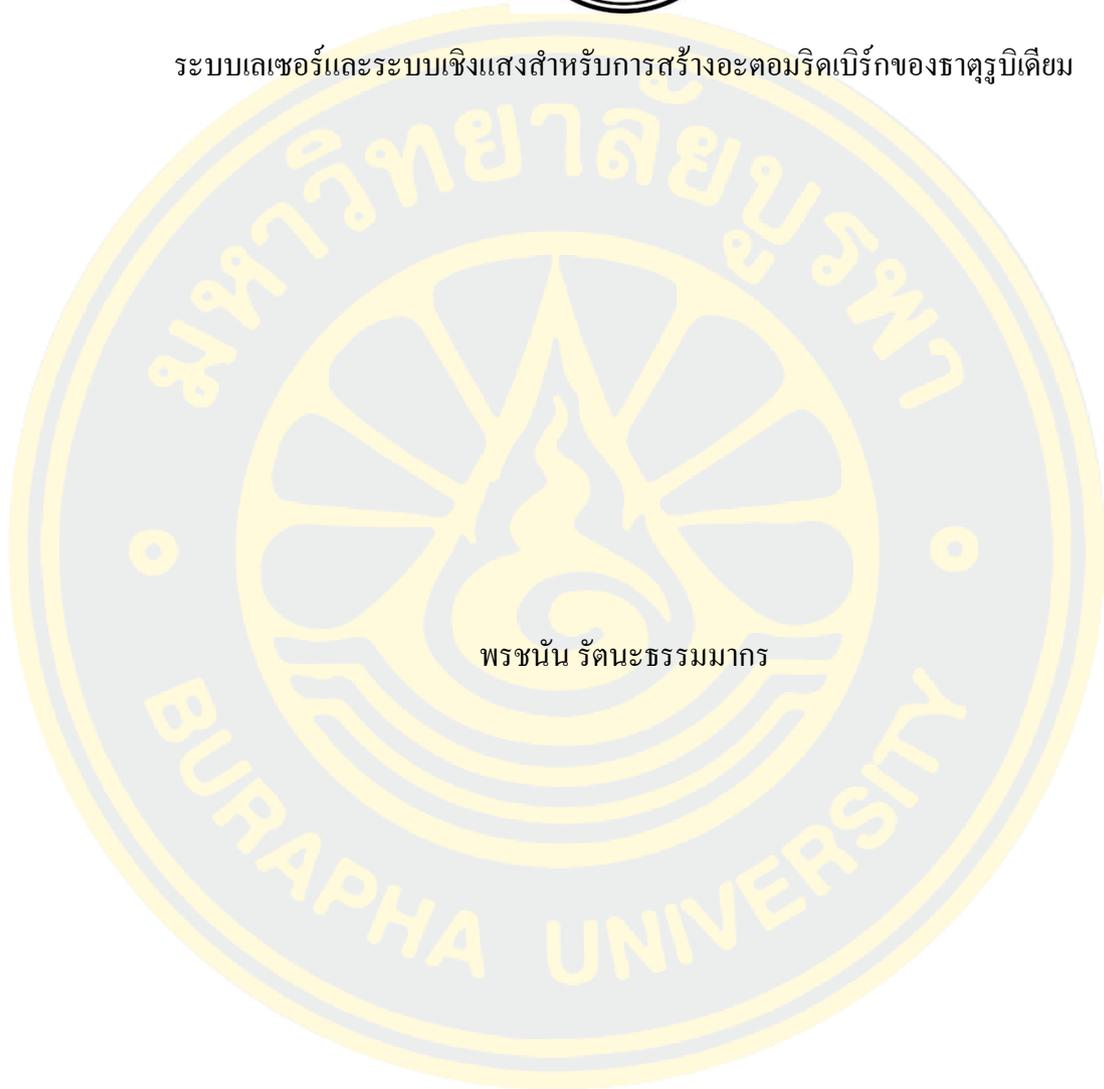




ระบบเลเซอร์และระบบเชิงแสงสำหรับการสร้างอะตอมริดเบิร์กของธาตุรูบิเดียม



พรชนัน รัตนะธรรมมากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

ระบบเลเซอร์และระบบเชิงแสงสำหรับการสร้างอะตอมริดเบิร์ตของธาตุรูบิเดียม



พรชนัน รัตนธรรมมากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

Laser and optical systems for production of rubidium Rydberg atoms



PORNCHANAN RATTANATHAMMAKORN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR MASTER DEGREE OF SCIENCE

IN PHYSICS

FACULTY OF SCIENCE

BURAPHA UNIVERSITY

2024

COPYRIGHT OF BURAPHA UNIVERSITY

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้พิจารณา
วิทยานิพนธ์ของ พรชนัน รัตนะธรรมมาร ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิ บัวทอง)

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.สรายุทธ เฉชะปัญญา)

..... ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิวัฒน์ วิศิษฐ์สรศักดิ์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิ บัวทอง)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สรายุทธ เฉชะปัญญา)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สรไกร ศรีสุกผล)

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. อุษาวดี ตันดีวารานุกัย)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยบูรพา

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ แจ่มเยี่ยม)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

65910114: สาขาวิชา: ฟิสิกส์; วท.ม. (ฟิสิกส์)

คำสำคัญ: อะตอมริทเบิร์ต, เลเซอร์ชนิดโพรงภายนอก, อุปกรณ์เชิงแสงแบบตาแมว, ฟิเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอด, ระบบดูดกลืนพลังงานของธาตุรูบิเดียม
พรชนั้น รัตนธรรมมาร : ระบบเลเซอร์และระบบเชิงแสงสำหรับการสร้างอะตอมริทเบิร์ตของธาตุรูบิเดียม. (Laser and optical systems for production of rubidium Rydberg atoms)
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: สิทธิ บัวทอง, สราวุธ เดชะปัญญา ปี พ.ศ. 2567.

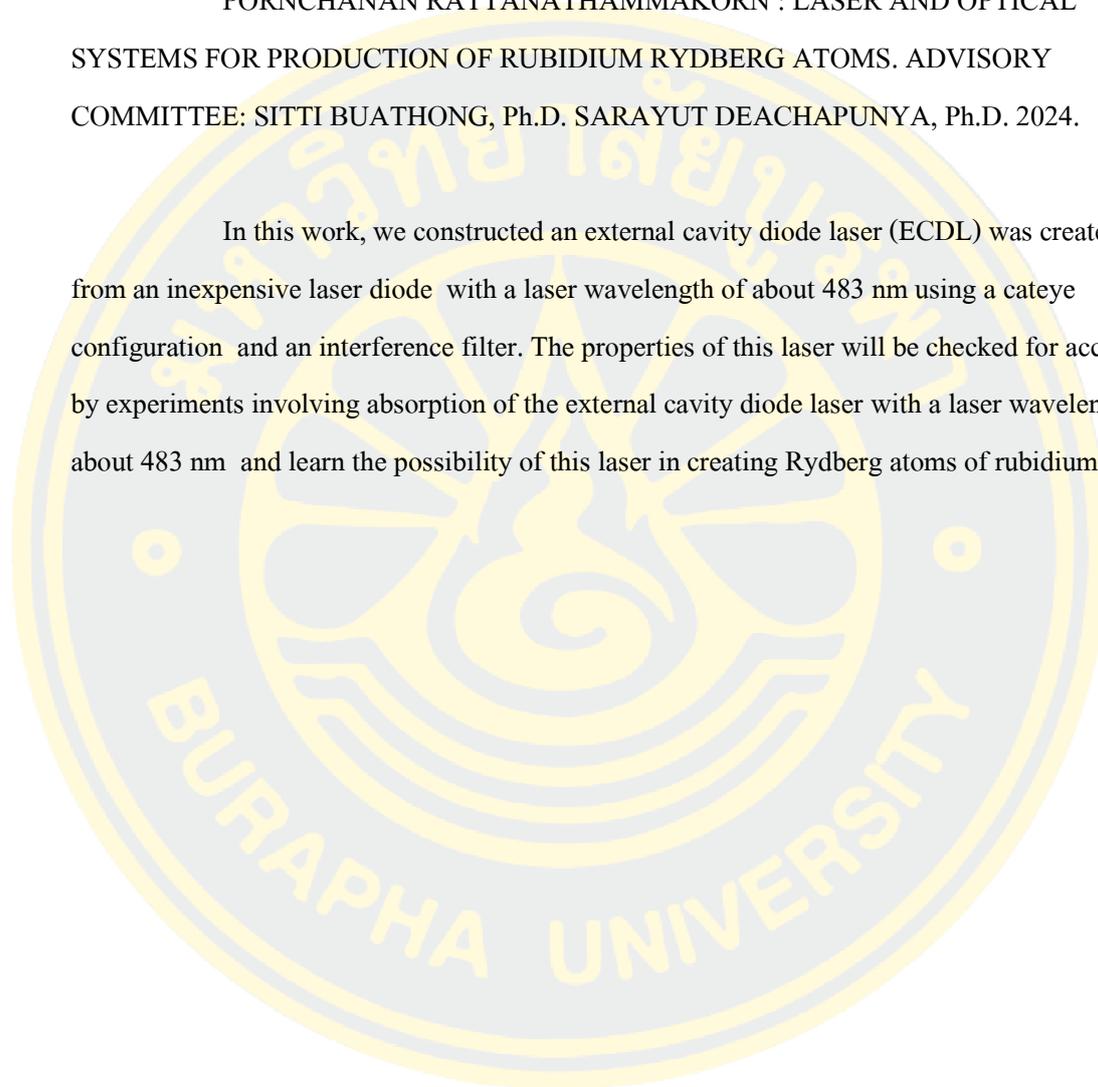
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอก จากเลเซอร์ไดโอดราคาไม่แพง ที่ให้ความยาวคลื่นเลเซอร์ที่ประมาณ 483 nm โดยการใช้การประกอบอุปกรณ์เชิงแสงแบบตาแมวและฟิเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอด โดยคุณสมบัติของเลเซอร์ชุดนี้จะตรวจสอบความแม่นยำด้วยการทดลองที่เกี่ยวกับระบบการดูดกลืนของเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกที่มีความยาวคลื่นเลเซอร์ที่ประมาณ 483 nm และศึกษาความเป็นไปได้ของเลเซอร์ชุดนี้ในการสร้างอะตอมริทเบิร์ตของอะตอมรูบิเดียม

65910114: MAJOR: PHYSICS; M.Sc. (PHYSICS)

KEYWORDS: External cavity diode laser, Cateye configuration, Interference filter,
Absorption spectroscopy, Rydberg atoms

PORNCHANAN RATTANATHAMMAKORN : LASER AND OPTICAL
SYSTEMS FOR PRODUCTION OF RUBIDIUM RYDBERG ATOMS. ADVISORY
COMMITTEE: SITTI BUATHONG, Ph.D. SARAYUT DEACHAPUNYA, Ph.D. 2024.

In this work, we constructed an external cavity diode laser (ECDL) was created from an inexpensive laser diode with a laser wavelength of about 483 nm using a cateye configuration and an interference filter. The properties of this laser will be checked for accuracy by experiments involving absorption of the external cavity diode laser with a laser wavelength of about 483 nm and learn the possibility of this laser in creating Rydberg atoms of rubidium atoms.



กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิ บัวทอง และ รองศาสตราจารย์ ดร.สรายุทธ เดชะปัญญา อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่ายิ่งในการให้ความรู้ คำแนะนำ การแก้ไข ตรวจสอบสิ่งที่บกพร่องต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ตลอดการจัดทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สรไกร ศรีศุภผล และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.อภิวัฒน์ วิศิษฐ์สรศักดิ์ ที่ให้ความกรุณาเป็นกรรมการสอบ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ และขอขอบพระคุณรุ่นพี่ เพื่อน และรุ่นน้องทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาที่ดีเสมอมา

สุดท้ายนี้กราบขอบพระคุณครอบครัวที่ให้การสนับสนุน ส่งเสริมการศึกษาเล่าเรียน คอยดูแลเอาใจใส่ ทำให้ผู้วิจัยมีความเพียรในการศึกษาเล่าเรียนมาจนสำเร็จการศึกษาและเป็นกำลังใจที่ดีมาโดยตลอดทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงด้วยดี

พรชนัน รัตนธรรมมากร

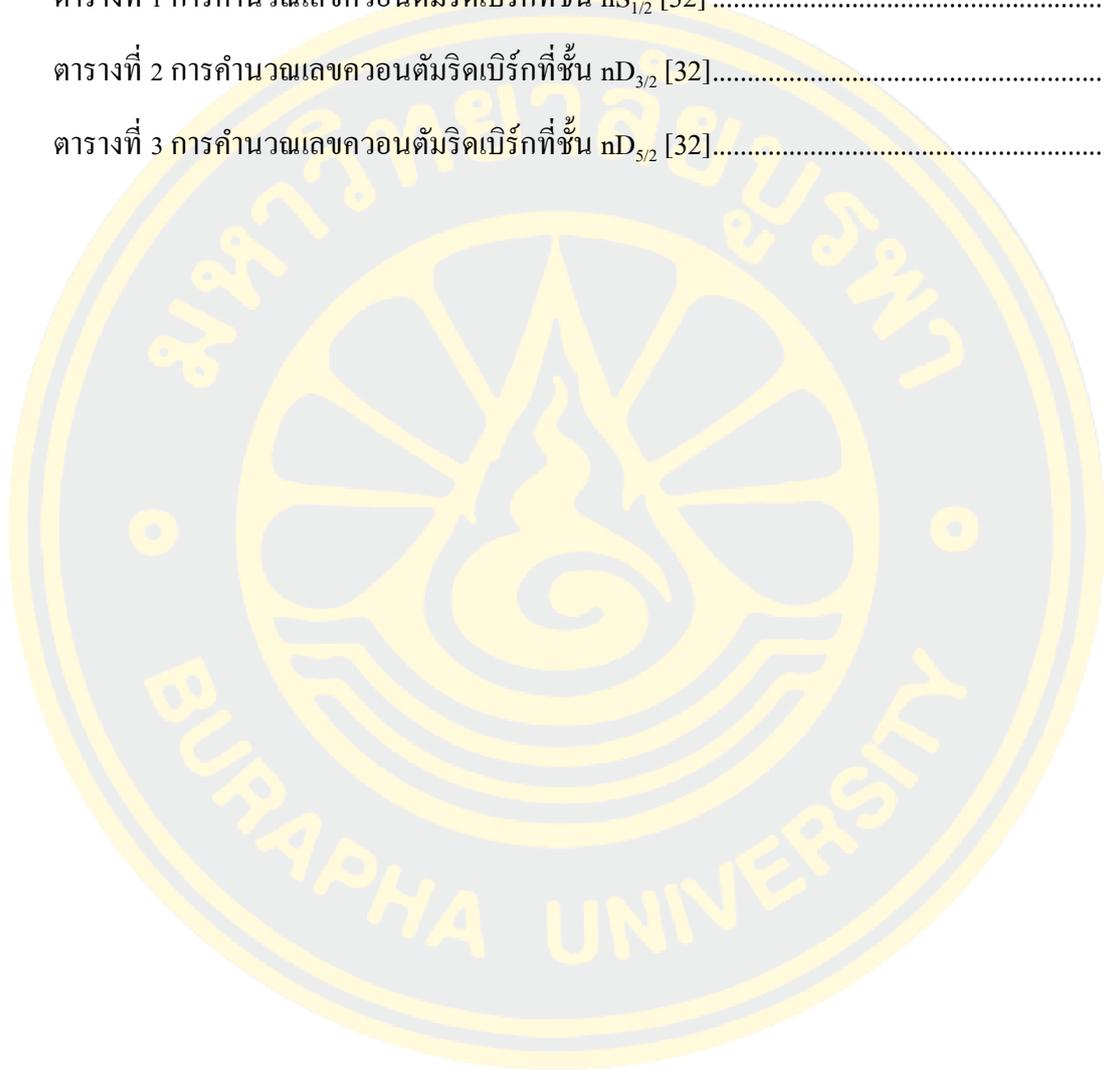
สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญรูปภาพ	ฉุ
บทที่ 1.....	1
บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
บทที่ 2.....	3
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.2 Littrow และ Littman-Metcalf ECDL	3
2.3 เลเซอร์ไดโอดที่ใช้ GaN เซมิคอนดักเตอร์ในการออกแบบ Littrow	6
2.4 เลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกแบบใช้ฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอดและการจัดวางเรียง ตัวของอุปกรณ์เชิงแสงแบบตาแมว	8
2.5 การดูดกลืนพลังงานของธาตุรูบิเดียม.....	11
2.6 การเหนี่ยวนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้แสงทะลุผ่าน	13
2.7 อะตอมริดเบิร์ก (Rydberg atoms)	13

บทที่ 3.....	17
วิธีการทดลอง	17
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้วิจัย	17
3.2 ออกแบบและสร้างเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอก (ECDL)	18
3.3 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอก.....	19
3.3.1 แหล่งควบคุมกระแสไฟฟ้าของไดโอดเลเซอร์	19
3.3.2 การรับสัญญาณการดูดกลืนของธาตุรูบิเดียม	20
3.3.3 การควบคุมระยะกระจกาวีตี้.....	20
บทที่ 4.....	23
ผลการทดลอง.....	23
4.1 การตรวจสอบคุณสมบัติของ ECDL โดยวิธี absorption spectroscopy และศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างอะตอมริคเบิร์ก.....	23
4.2 การตรวจสอบความสามารถเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 483 nm โดยการเปิดปิดเลเซอร์.....	36
4.3 การจัดอุปกรณ์ของระบบการดูดกลืนพลังงานของธาตุรูบิเดียม (Absorption spectroscopy).....	37
4.4 ศึกษาพฤติกรรมของหลอด Xe และศึกษาผลของสนามแม่เหล็กต่อหลอด Xe	56
4.4.1 ศึกษาพฤติกรรมของหลอด Xe	56
4.5 ศึกษาผลของสนามแม่เหล็กต่อหลอด Xe	58
บทที่ 5.....	60
สรุปผลการทดลอง	60
บรรณานุกรม.....	62
ประวัติย่อของผู้วิจัย	67

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 การคำนวณเลขควอนตัมริดเบิร์กที่ชั้น $nS_{1/2}$ [32]	34
ตารางที่ 2 การคำนวณเลขควอนตัมริดเบิร์กที่ชั้น $nD_{3/2}$ [32].....	35
ตารางที่ 3 การคำนวณเลขควอนตัมริดเบิร์กที่ชั้น $nD_{5/2}$ [32].....	35



สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1 การกำหนดค่า Littrow (a) type I (b) type II [4]	4
รูปที่ 2 การกำหนดค่า Littman-Metcalf (a) type I (b) type II [4]	5
รูปที่ 3 แผนภาพ Distributed cavity laser [21]	7
รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขอบเขตความเสถียรของ L6 กับ working distance [21]	8
รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง incident pump power กับ output power ที่ระยะต่างๆของ working distance [21]	9
รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง working distance และ output power	9
รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง working distance และขนาดลำแสงรวมทั้ง spherical aberration [21]	10
รูปที่ 8 แผนภาพแสดงการเกิด Absorption spectroscopy ประกอบด้วย ECDL, Half-wave plate , Polarization beam splitter (PBS), Photodiode (PD), Quarter-wave plate , หลอดแก้วรูบิเดียม (Rb cell), กระจกเงา (Mirror) [22]	11
รูปที่ 9 แสดงการดูดกลืนสเปกตรัมของธาตุรูบิเดียมที่ความถี่ต่างๆ	12
รูปที่ 10 แสดงการเกิดปรากฏการณ์การเหนี่ยวนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้แสงทะลุผ่าน [24].....	13
รูปที่ 11 แผนภาพแสดงระดับชั้นพลังงานของอะตอมริเดเบิร์ก [28].....	15
รูปที่ 12 แสดงค่าของ n ที่ขึ้นต่อการแยกของ fine structure ของสถานะ d [30]	16
รูปที่ 13 แผนภาพการสร้างเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกโดยใช้การจัดวางอุปกรณ์เชิงแสงแบบตาแมว และฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอด	18
รูปที่ 14 วงจรควบคุมกระแสไฟฟ้า	19
รูปที่ 15 แผนภาพแสดงการรับสัญญาณการดูดกลืนของธาตุรูบิเดียม	20
รูปที่ 16 แผนภาพการสร้างระบบเลเซอร์และระบบเชิงแสงสำหรับการสร้างอะตอมริเดเบิร์กของธาตุรูบิเดียม	21

รูปที่ 17 ภาพจริงแสดงองค์ประกอบของเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอก	23
รูปที่ 18 a) กราฟแสดงกำลังแสงเป็นฟังก์ชันของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ขับเลเซอร์ b) กราฟแสดงความยาวคลื่นเอาต์พุตที่วัดได้เป็นฟังก์ชันของกระแสเลเซอร์ขับเคลื่อน	25
รูปที่ 19 แสดงภาพที่ได้จากสเปกโตรมิเตอร์ในขณะที่เปิดเลเซอร์ความยาวคลื่นประมาณ 483 nm แล้วจัดระยะกระจกกับเลนส์ใน ECDL และปรับฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอด มุม 176° อุณหภูมิ 23.7 °C (บันทึกครั้งที่ 1)	26
รูปที่ 20 แสดงภาพที่ได้จากสเปกโตรมิเตอร์ในขณะที่เปิดเลเซอร์ความยาวคลื่นประมาณ 483 nm แล้วจัดระยะกระจกกับเลนส์ใน ECDL และปรับฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอด มุม 176° อุณหภูมิ 23.7 °C (บันทึกครั้งที่ 2)	27
รูปที่ 21 แสดงภาพที่ได้จากสเปกโตรมิเตอร์ ในขณะที่เปิดเลเซอร์ความยาวคลื่นประมาณ 483 nm แล้วจัดระยะกระจกกับเลนส์ใน ECDL และปรับฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอด มุม 176° อุณหภูมิ 23.7 °C (บันทึกครั้งที่ 3)	27
รูปที่ 22 แสดงภาพที่ได้จากสเปกโตรมิเตอร์ในขณะที่เปิดเลเซอร์ความยาวคลื่นประมาณ 483 nm แล้วจัดระยะกระจกกับเลนส์ใน ECDL และปรับฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอด มุม 175° อุณหภูมิ 23.5 °C (บันทึกครั้งที่ 1)	28
รูปที่ 23 แสดงภาพที่ได้จากสเปกโตรมิเตอร์ในขณะที่เปิดเลเซอร์ความยาวคลื่นประมาณ 483 nm แล้วจัดระยะกระจกกับเลนส์ใน ECDL และปรับฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอด มุม 175° อุณหภูมิ 23.5 °C (บันทึกครั้งที่ 2)	28
รูปที่ 24 แสดงภาพที่ได้จากสเปกโตรมิเตอร์ในขณะที่เปิดเลเซอร์ความยาวคลื่นประมาณ 483 nm แล้วจัดระยะกระจกกับเลนส์ใน ECDL และปรับฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอด มุม 175° อุณหภูมิ 23.5 °C (บันทึกครั้งที่ 3)	29
รูปที่ 25 แสดงภาพที่ได้จากสเปกโตรมิเตอร์ในขณะที่เปิดเลเซอร์ความยาวคลื่นประมาณ 483 nm แล้วจัดระยะกระจกกับเลนส์ใน ECDL และปรับฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอด มุม 174° อุณหภูมิ 23.9 °C	29
รูปที่ 26 สเปกตรัม EIT ของสถานะริดเบิร์กที่มี $n = 27$ สำหรับอะตอมรูบิเดียม	31
รูปที่ 27 แสดง peak EIT ภายใต้หลุมการดูดกลืน โดยที่กำลังเชิงแสงต่าง ๆ กำหนดให้ ความถี่ detuning ของเลเซอร์ค้ำปปลิง = 0 Hz.....	32

รูปที่ 28 แสดง peak EIT ภายใต้หลุมการดักคลื่นโดยที่ ความถี่ detuning ของเลเซอร์คัปปลิง ต่าง ๆ32

รูปที่ 29 แผนภาพแสดง Energy-level ของ Rb [32].....33

รูปที่ 30 ภาพแสดงสัญญาณขณะเปิดเลเซอร์.....36

รูปที่ 31 ภาพแสดงสัญญาณขณะนำกระดามาปิดที่ระหว่างอุปกรณ์เชิงแสงแบบตาแมวกับกระจก
ระนาบที่อยู่ใน ECDL.....37

รูปที่ 32 ภาพชุดอุปกรณ์การสร้างระบบเลเซอร์และระบบเชิงแสงสำหรับการสร้างอะตอมริดเบิร์ก
.....39

รูปที่ 33 ภาพแสดงสัญญาณเมื่อความยาวคลื่นของระบบเลเซอร์โพรงภายนอกเท่ากับ 483.92 nm
อุณหภูมิของเลเซอร์ตรวจวัดเท่ากับ 18.3 °C และมีความยาวคลื่นเท่ากับ 780.24 nm40

รูปที่ 34 ภาพแสดงสัญญาณเมื่อความยาวคลื่นของระบบเลเซอร์โพรงภายนอกเท่ากับ 483.51 nm
อุณหภูมิของเลเซอร์ตรวจวัดเท่ากับ 18.3 °C และมีความยาวคลื่นเท่ากับ 780.24 nm40

รูปที่ 35 ภาพแสดงสัญญาณเมื่อความยาวคลื่นของระบบเลเซอร์โพรงภายนอกเท่ากับ 483.15 nm
อุณหภูมิของเลเซอร์ตรวจวัดเท่ากับ 18.3 °C และมีความยาวคลื่นเท่ากับ 780.24 nm41

รูปที่ 36 ภาพแสดงสัญญาณเมื่อความยาวคลื่นของระบบเลเซอร์โพรงภายนอกเท่ากับ 483.92 nm
อุณหภูมิของเลเซอร์ตรวจวัดเท่ากับ 18.5 °C และมีความยาวคลื่นเท่ากับ 780.24 nm41

รูปที่ 37 ภาพแสดงสัญญาณเมื่อความยาวคลื่นของระบบเลเซอร์โพรงภายนอกเท่ากับ 483.55 nm
อุณหภูมิของเลเซอร์ตรวจวัดเท่ากับ 18.5 °C และมีความยาวคลื่นเท่ากับ 780.24 nm42

รูปที่ 38 ภาพแสดงสัญญาณเมื่อความยาวคลื่นของระบบเลเซอร์โพรงภายนอกเท่ากับ 483.92 nm
อุณหภูมิของเลเซอร์ตรวจวัดเท่ากับ 18.5 °C และมีความยาวคลื่นเท่ากับ 780.24 nm42

รูปที่ 39 ภาพแสดงสัญญาณเมื่อความยาวคลื่นของระบบเลเซอร์โพรงภายนอกเท่ากับ 483.92 nm
อุณหภูมิของเลเซอร์ตรวจวัดเท่ากับ 18.5 °C และมีความยาวคลื่นเท่ากับ 780.24 nm43

รูปที่ 40 ภาพแสดงสัญญาณเมื่อความยาวคลื่นของระบบเลเซอร์โพรงภายนอกเท่ากับ 483.75 nm
อุณหภูมิของเลเซอร์ตรวจวัดเท่ากับ 18.5 °C และมีความยาวคลื่นเท่ากับ 780.24 nm43

รูปที่ 41 ภาพแสดงสัญญาณเมื่อความยาวคลื่นของระบบเลเซอร์โพรงภายนอกเท่ากับ 483.62 nm
อุณหภูมิของเลเซอร์ตรวจวัดเท่ากับ 18.6 °C และมีความยาวคลื่นเท่ากับ 780.24 nm44

รูปที่ 56 แสดงสัญญาณการดูดกลืนของ optical filter เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นด้วยเปียโซโดยให้สัญญาณไฟฟ้าดังเส้นสัญญาณสีเหลือง	52
รูปที่ 57 แสดง spectrum การดูดกลืนโดย optical filter NBP470 แกนนอนเป็นแกนความยาวคลื่น แกนตั้งเป็นแกนปริมาณแสงที่สามารถส่งผ่าน optical filter นี้ได้	52
รูปที่ 58 การแทรกสอดกันของลำแสงสะท้อนและลำแสงหักเหของชั้นฟิล์มบางต่าง ๆ [38]	53
รูปที่ 59 ภาพแสดงสัญญาณเมื่อปรับฟิลเตอร์ให้มีหลุมน้อยสุด	54
รูปที่ 60 ภาพแสดงสัญญาณเมื่อปิดหลอด Xe	54
รูปที่ 61 ภาพแสดงสัญญาณเมื่อปรับฟิลเตอร์ให้มีหลุมมากที่สุด	55
รูปที่ 62 ภาพแสดงสัญญาณเมื่อปิดหลอด Xe	55
รูปที่ 63 แสดงภาพที่ได้จาก spectrometer ในขณะที่เปิดเลเซอร์และเปิด Xe	56
รูปที่ 64 แสดงภาพที่ได้จาก spectrometer ขณะนำกล่องมาปิดเลเซอร์	56
รูปที่ 65 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 483 nm และหลอด Xe	58
รูปที่ 66 ภาพแสดงการวัดระยะจากด้านหน้าของแม่เหล็กถึงปลายด้านข้างของหลอด Xe	58
รูปที่ 67 ภาพแสดงการวัดระยะจากด้านหน้าของแม่เหล็กถึงปลายด้านข้างของหลอด Xe	59
รูปที่ 68 ภาพแสดงการวัดระยะจากด้านหน้าของแม่เหล็กถึงปลายด้านข้างของหลอด Xe	59

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เลเซอร์ชนิดโพรงภายนอก (External cavity diode laser (ECDL)) เป็นระบบเลเซอร์ที่มีความเสถียร โดยความยาวคลื่นที่ได้ขึ้นกับอุณหภูมิ ระยะของโพรงภายนอก (Cavity length) หรือกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับไดโอดเลเซอร์ การชื่อนำมาใช้งานอาจมีราคาค่อนข้างสูง [1] จึงได้ทำการสร้าง ECDL จากเลเซอร์ไดโอดราคาไม่แพง GH04850B2G ที่ให้ความยาวคลื่นประมาณ 483 nm โดยใช้การประกอบอุปกรณ์เชิงแสงแบบตาแมว (Cateye configuration) และฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอด (Interference filter) คุณสมบัติของชุดเลเซอร์นี้จะถูกตรวจสอบโดยสเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer) เพราะการทดลองที่เกี่ยวกับการดูดกลืนสเปกตรัม (Absorption spectroscopy)

เลเซอร์ชนิดโพรงภายนอก [1, 2] นั้นเป็นเลเซอร์ชนิดหนึ่งที่ใช้ไดโอดเลเซอร์ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำและโพรงสั่นพ้อง (Resonant cavity) ระบบเชิงแสงของ ECDL และระบบควบคุมสภาพแวดล้อม จะช่วยป้องกันความผันผวนของอุณหภูมิและการรบกวนทางกลอันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อม แสงเลเซอร์จาก ECDL สามารถเปลี่ยนแปลงความถี่ได้และมีความเสถียรสูง นอกจากนี้ยังสามารถทำงานในโหมดเดี่ยว (Single mode) จากคุณลักษณะเหล่านี้ของ ECDL จึงพบการใช้งาน ECDL ที่หลากหลายในงานด้านต่างๆ เช่น การศึกษาทางด้านสเปกโทรสโกปี [3, 4] โตรคมนาคม [5] มาตรฐานความถี่แสง [6] การตรวจจับด้วยแสงและอินเทอร์เฟอโรเมทรี [7, 8] การถ่ายภาพทางชีวการแพทย์ [9] และการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัม [10, 11] เป็นต้น

ECDL มีหลายชนิด ได้แก่ ECDL แบบ Littrow และ Littman-Metcalf ที่ใช้เกรตติงการเลี้ยวเบนสำหรับเลือกความถี่ [12] แบบ Sagnac ที่เกี่ยวข้องกับการสะท้อนแสงแบบ Sagnac loop ที่ปรับได้ [13] และแบบ Bragg grating [14] ECDL อีกประเภทหนึ่งคือ ค่า ECDL แบบตาแมวที่มีฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอด [15, 16] มีการพัฒนาระบบเลเซอร์ที่ให้แสงเลเซอร์ในช่วงความยาวคลื่นแสงสีน้ำเงิน อาทิเช่น ECDL แบบ Littman [17] และแบบ Littrow ที่ใช้เลเซอร์ไดโอดที่ใช้ GaN ได้รับการประดิษฐ์ขึ้นเพื่อให้กำลังเชิงแสงสูง (Optical power) Linewidth แคบ และสามารถปรับความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ได้ในช่วงกว้าง [18] นอกจากนี้ยังมี ECDL ที่มีเลเซอร์ไดโอดเป็น GaN ซึ่งให้แสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 455 nm ที่มีเกรตติงโฮโลแกรมและเกรตติงแบบเส้นในการเลือกความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ [19] มีการศึกษา ECDL สำหรับแสงความยาวคลื่น 450 nm โดยใช้เทคนิค Self injection และปริซึมสำหรับทั้งระบบการสะท้อน [20]

ในการศึกษานี้ทำการออกแบบและสร้าง ECDL ที่ใช้เลเซอร์ไดโอดประเภท InAlGaN ที่มีจำหน่ายทั่วไปและใช้รูปแบบ cat-eye reflector เพื่อให้ ECDL ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 483 nm การศึกษาถึงคุณสมบัติของเลเซอร์นี้ควบคู่ไปกับระบบ ECDL ที่มีความยาวคลื่น 780 nm เพื่อการผลิอะตอมรูบิเดียมในสถานะริดเบิร์ก (Rydberg states)

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อทำการออกแบบและสร้างเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกจากเลเซอร์ไดโอดที่มีราคาไม่แพงจากเลเซอร์ไดโอดรุ่น GH04850B2G โดยใช้การจัดวางอุปกรณ์เชิงแสงแบบตาแมวและฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอด
- 1.2.2 เพื่อปรับความยาวคลื่นของไดโอดเลเซอร์จาก 485 nm เป็นประมาณ 483 nm
- 1.2.3 เพื่อศึกษาคุณสมบัติของเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกจากการตรวจสอบโดย Absorption spectroscopy

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 สร้างต้นแบบเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกจากเลเซอร์ไดโอดราคาไม่แพงจากเลเซอร์ไดโอดรุ่น GH04850B2G โดยใช้การจัดวางอุปกรณ์เชิงแสงแบบตาแมว และฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอด
- 1.3.2 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเลเซอร์และกำลังเชิงแสงของ ECDL รวมทั้งความยาวคลื่นที่ได้เปลี่ยนไปอย่างไร
- 1.3.3 ศึกษาคุณสมบัติของระบบเลเซอร์นี้ผ่าน Absorption spectroscopy พร้อมทั้งศึกษาความเป็นไปได้ของการสร้างอะตอมริดเบิร์กของอะตอมรูบิเดียม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 วิธีการสร้างเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกจากเลเซอร์ไดโอด GH04850B2G
- 1.4.2 รู้ถึงคุณลักษณะของ ECDL ที่ได้สร้างขึ้น
- 1.4.3 ได้รับความรู้เกี่ยวกับการใช้ระบบเลเซอร์ในการสร้างอะตอมริดเบิร์กของธาตุ

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้ศึกษาวิทยานิพนธ์มีความสนใจในการสร้างระบบเลเซอร์และระบบเชิงแสงสำหรับการสร้างอะตอมรีดเบิร์กของธาตุรูบิเดียม จึงได้ทำการสร้าง ECDL จากเลเซอร์ไดโอดที่มีราคาไม่แพงที่ให้แสงเลเซอร์ความยาวคลื่นประมาณ 483 nm โดยใช้การจัดวางเรียงตัวของอุปกรณ์เชิงแสงแบบตาแมว และฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอด โดยแบ่งเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

1. Littrow และ Littman-Metcalf ECDL
2. เลเซอร์ไดโอดที่ใช้สารกึ่งตัวนำ GaN ในการออกแบบ ECDL แบบ Littrow
3. เลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกแบบใช้ฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอดและการจัดวางเรียงตัวของอุปกรณ์เชิงแสงแบบตาแมว
4. Absorption spectroscopy ของธาตุรูบิเดียม
5. การเหนี่ยวนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้แสงทะลุผ่าน (Electromagnetically induced transparency; EIT)

2.2 Littrow และ Littman-Metcalf ECDL

การกำหนดค่า Littrow สามารถกำหนดค่าได้ 2 แบบ คือ Littrow type I และ Littrow type II ซึ่ง Littrow คือ การสร้างเลเซอร์ชนิดปรับความยาวคลื่น โดยใช้เกรตติงเป็นอุปกรณ์หลักในการคัดกรองความยาวคลื่นแสง การแทรกสอดของแสงเลเซอร์ผ่านเกรตติงจะกำหนดค่า Littrow ลำดับแรกในการใช้งาน Littrow แสงตกกระทบจะเลี้ยวเบนจากเกรตติงไปด้านหลัง ทำให้มุมตกกระทบเท่ากับมุมเลี้ยวเบน สามารถเขียนสมการ ได้ดังนี้ [4]

$$m\lambda = d(\sin \alpha + \sin \beta) \quad (1)$$

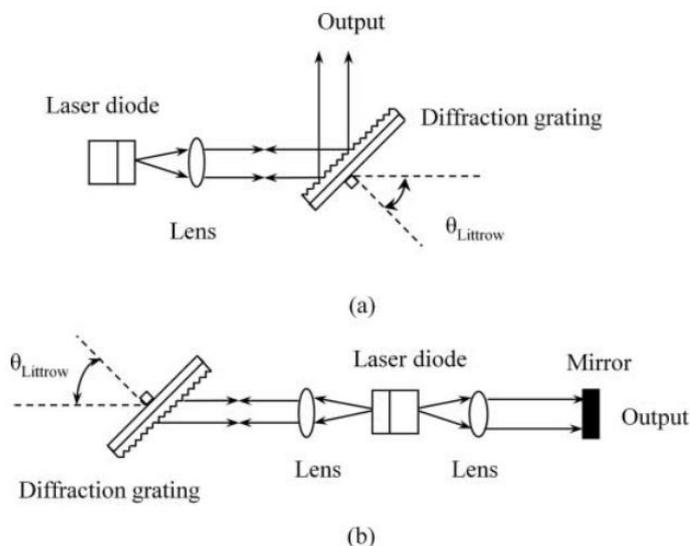
โดยที่ m คือ ลำดับการเลี้ยวเบนของแสง

λ คือ ความยาวคลื่น

d คือ ระยะห่างระหว่างช่องของเกรตติง

α คือ มุมตกกระทบ

β คือ มุมการเลี้ยวเบน



รูปที่ 1 การกำหนดค่า Littrow (a) type I (b) type II [4]

จากสมการที่ 1 จัดรูปใหม่ได้
$$m\lambda = 2d \sin \alpha \quad (2)$$

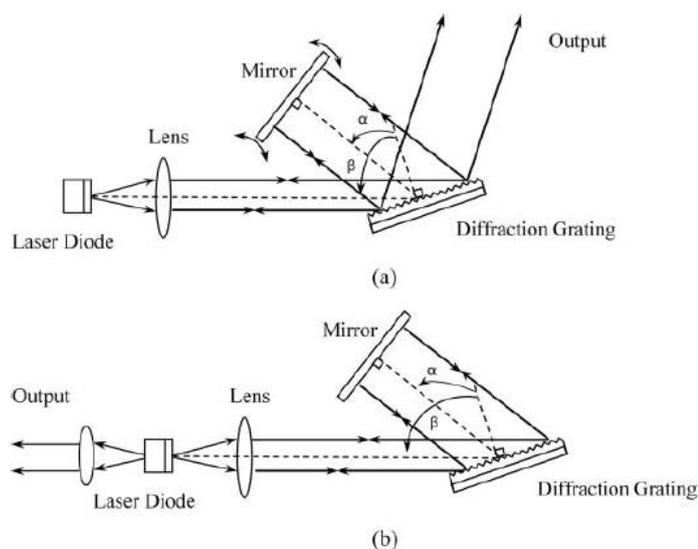
ซึ่งจากสมการ 2 มุมตกกระทบเท่ากับมุมเลี้ยวเบน และ m คือ ลำดับการเลี้ยวเบนของแสง มักจะเป็นลำดับแรกเพื่อประสิทธิภาพที่ดีที่สุด ความยาวคลื่นการเลี้ยวเบนในสมการ (2) คือความยาวคลื่นในตอนที่ย้อนกลับ ซึ่งไม่ตรงกับโหมดควาวิดี ความไม่ตรงกันนี้จะทำให้การปรับช่วงความยาวคลื่นแคบลง อย่างไรก็ตามการควบคุมโหมดควาวิดีและความยาวคลื่นที่สะท้อนกลับสามารถทำได้โดยใช้เกรตติงที่มีความเสถียรมากที่สุด

จากรูปที่ 1 Littrow type I เป็นการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับการตัดแปลงเลเซอร์ไดโอดเชิงพาณิชย์ ซึ่งเลเซอร์ไดโอดเชิงพาณิชย์ส่วนใหญ่จะเคลือบ AR อย่างไรก็ตาม การออกแบบนี้มีข้อจำกัด เพื่อให้ได้กำลังเอาต์พุตและความละเอียดสูง ระบายจุดเชื่อมต่อของไดโอดจึงมักจะถูกปรับให้ขนานกับเกรตติงเพื่อประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

ความแตกต่างระหว่างการกำหนดค่า Littrow type II และ type I ก็คือไดโอดเลเซอร์ใน Littrow type II มีการเคลือบ AR บนทั้งสองด้าน ในขณะเดียวกัน ช่องภายนอกใน Littrow ประเภท II ประกอบด้วยเกรตติงเลี้ยวเบนที่ปลายด้านหนึ่งและกระจกสะท้อนแสงบางส่วนที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ซึ่งเป็นช่องเอาต์พุตของระบบ ECDL เช่นกัน แม้ว่าการออกแบบ Littrow type II จะดีกว่าการกำหนดค่า Type I แต่ก็มีต้นทุนการออกแบบที่มาก และมีความยากในการจัดตำแหน่ง และความไวต่อการตอบสนองทางแสงจากภายนอก ส่วนใหญ่จึงนิยมใช้ Type I มากกว่า

การกำหนดค่า Littman-Metcalf สามารถกำหนดค่าได้หลายแบบ แต่ต่างจาก Littrow คือ Littman-Metcalf จะสะท้อนแสงเลเซอร์ที่เกิดจากการแทรกสอดที่จะกำหนดค่า Littman-Metcalf อันดับแรก ผ่านกระจกสะท้อนกลับไปที่เกรตติงและเข้าไปที่ไดโอดเลเซอร์ ซึ่งการออกแบบ Littman-Metcalf จะมีการเพิ่มกระจกที่เป็นองค์ประกอบการปรับแต่งในระบบ โดยการกำหนดค่า Littrow เดิมที่ต้นแบบนี้ถูกเสนอสำหรับใช้งานกับ dry laser ซึ่งเสนอ โดย Shoshan และคณะ ซึ่งเป็นแบบที่คล้ายคลึงกับ Littman-Metcalf ที่ใช้กันทั่วไปมากที่สุด

การกำหนดค่าสำหรับการใช้งานเลเซอร์ไดโอดในปัจจุบัน Littman-Metcalf ได้แนะนำการใช้ grazing-incidence เพื่อควบคุมเลเซอร์และให้การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีของเลนส์อย่างละเอียด แนวคิดนี้ถูกนำมาใช้ครั้งแรก เพื่อปรับเปลี่ยนระบบเลเซอร์ไดโอดในปี พ.ศ. 2534 นอกจากแบบที่ปรากฏในรูปที่ 2 แล้ว ยังมีแบบอื่นๆ ที่เป็นไปได้อีกมากมาย เกรตติงการเลี้ยวเบนในสภาวะ Littrow จะแทนที่กระจกในระบบ เพื่อสร้าง ECDL แบบเกรตติงสองชั้น เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ การกำหนดค่า Littman-Metcalf แบบเดิม พบว่าการออกแบบที่ได้รับการปรับปรุงนี้ได้รับรายงานว่า มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น มีความง่ายในการจัดตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 2b และยังสามารถจับคู่แสงเอาต์พุตผ่านด้านหลังของไดโอดเลเซอร์ได้อีกด้วย การออกแบบนี้ได้รับการปรับปรุงอย่างมากในกำลังเอาต์พุตและการปรับแสงเลเซอร์ที่ได้เป็นแบบโหมดเดี่ยว (Single mode)



รูปที่ 2 การกำหนดค่า Littman-Metcalf (a) type I (b) type II [4]

ในการกำหนดความยาวคลื่นของ ECDL ให้พิจารณาการส่งเลเซอร์ผ่านโพรงภายนอกเพียงครั้งเดียว โดยแสงเลเซอร์ที่ปล่อยออกมาจากไดโอดจะกระทบกับเกรตติงการเลี้ยวเบน และลำดับที่ m แสงเลเซอร์ที่เลี้ยวเบนจะเข้าสู่กระจกและสะท้อนกลับเข้าไปที่เกรตติงการเลี้ยวเบน ในตอนนี้แสงจะเลี้ยวเบนอีกครั้ง และแสงลำดับที่ m จะกลับไปยังไดโอดเพื่อขยายสัญญาณเพิ่มเติม ตามความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$m\lambda = d(\sin \theta_1 + \sin \theta_2) \quad (3)$$

$$m'\lambda = d(\sin \theta_3 + \sin \theta_4) \quad (4)$$

แสงที่เลี้ยวเบนจะป้อนกลับตัวกลางของเลเซอร์ ซึ่งเป็นมุมตกกระทบของเลเซอร์ แสงจากไดโอดจะเข้าสู่เกรตติง (θ_1) เท่ากับมุมการเลี้ยวเบนของแสงที่สะท้อนจากกระจกกลับเข้าสู่เกรตติง (θ_4) ซึ่งเท่ากับ β ในรูปที่ 2 และเพื่อประสิทธิภาพสูงสุด การเลี้ยวเบนจะเรียงลำดับระหว่างการเลี้ยวเบนทั้งสองครั้งคือ m และ m' จะต้องเท่ากัน ดังนั้นมุมเลี้ยวเบนในช่วงแรก การเลี้ยวเบน (θ_2) ต้องเท่ากับมุมตกกระทบระหว่างการเลี้ยวเบนครั้งที่สอง (θ_3) ตามความสัมพันธ์ทางเรขาคณิต

$$\theta_2 + \theta_3 = 2\alpha \quad (5)$$

ดังนั้น == เมื่อตรงตามเงื่อนไขข้างต้นความยาวคลื่นของระบบ ECDL นี้จะถูกกำหนดโดยใช้สมการ

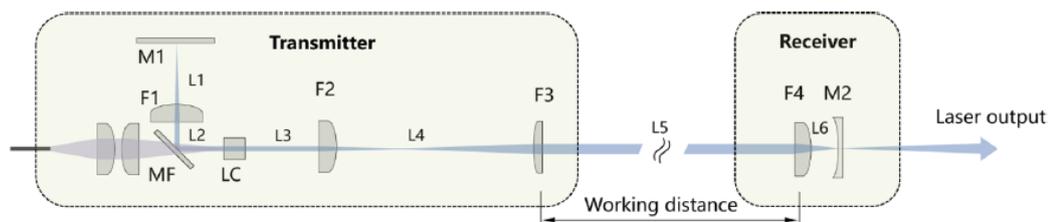
$$\lambda_{\text{wavelength}} = \frac{d}{m} (\sin \alpha + \sin \beta) \quad (6)$$

อย่างไรก็ตามทั้งสองวิธีซึ่งก็คือ Littrow และ Littman-Metcalf นั้นมีความซับซ้อนและการจัดวางตำแหน่งของเกรตติงค่อนข้างยาก และสูญเสียความเข้มแสงเลเซอร์ (Laser output) ไปกับการหักเหของเกรตติง ทำให้ความเข้มของแสงเลเซอร์ที่สามารถนำไปใช้งานนั้นลดลง

2.3 เลเซอร์ไดโอดที่ใช้ GaN เซมิคอนดักเตอร์ในการออกแบบ Littrow

เลเซอร์ไดโอดสีน้ำเงินกำลังสูงที่ใช้สารกึ่งตัวนำ GaN เซมิคอนดักเตอร์ แบบ Littrow มีการกำหนดขนาดโพรงภายนอกเพื่อการเลือกความยาวคลื่นที่เกิดขึ้นซึ่ง ECDL กำลังเชิงแสงสูงที่มี linewidth แคบและความยาวคลื่นสามารถปรับได้ การวัดสเปกตรัม โดย Linewidth เลเซอร์อยู่ที่ประมาณ 0.1 nm ที่ 1100 mA [18]

มีการศึกษาการใช้เลเซอร์ไดโอดที่ใช้ GaN ในการสร้าง ECDL ซึ่งมีการกำหนดขนาดโพรงภายนอกเพื่อการเลือกความยาวคลื่นที่เกิดขึ้น โดยใช้ Cat-eye retroreflectors [21] ซึ่งการทดลองมี 2 ส่วน คือส่วนตัวส่ง (Transmitter) และตัวรับ (Receiver)



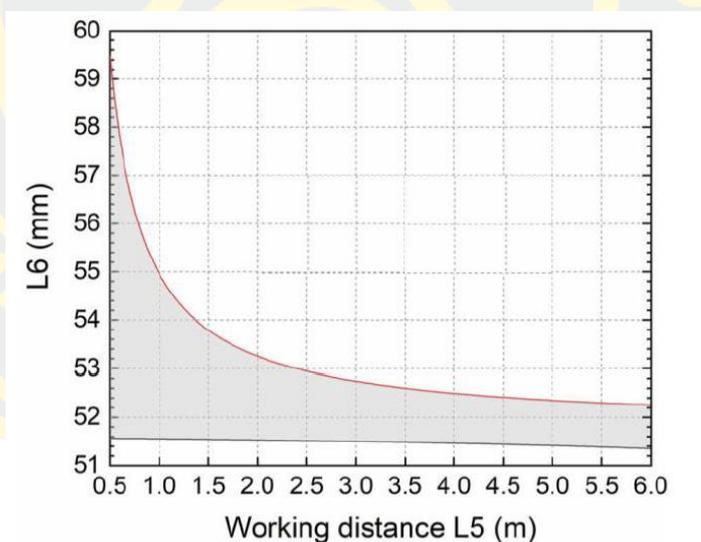
รูปที่ 3 แผนภาพ Distributed cavity laser [21]

โดยจากรูปที่ 3 เขาได้ทำการปล่อยเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 808 nm มาที่เลนส์นูน 2 อัน ซึ่งมีหน้าที่รวมแสงให้แสงโฟกัสที่กระจกเงาราบ MF (Flat mirror) ที่เคลือบด้วยสารสะท้อนแสงสูง เพื่อให้แสงสะท้อนไปยังคริสตัลและเคลือบสารป้องกันแสงสะท้อนเพื่อไม่ให้แสงเลเซอร์สะท้อนกลับเข้าไดโอดเลเซอร์ เนื่องจากจะทำให้เลเซอร์เสียหายได้ จากนั้นแสงเลเซอร์จะเข้าสู่คริสตัล จากนั้นแสงจะผ่านเลนส์ F2 โฟกัสแสงเป็นลำเล็กลงจากนั้นจะผ่านเลนส์ F3 แล้วลำแสงมีขนาดใหญ่ขึ้นจากนั้นแสงจะผ่านเลนส์ F4 ที่อยู่ในส่วนตัวรับ ซึ่งระยะระหว่าง F3 และ F4 นี้เรียกว่า ระยะการทำงาน (working distance) จากนั้นแสงที่ผ่านเลนส์ F4 จะโฟกัสไปที่กระจกเว้า M2 แล้วสะท้อนกลับไปยังทิศทางเดิม โดยผ่านเลนส์ F4 ผ่านเลนส์ F3 ผ่านเลนส์ F2 ผ่านคริสตัลแล้วสะท้อนแสงที่กระจกเงาราบขึ้นไปยังเลนส์ F1 ลำแสงจะมีขนาดเล็กลงแล้วสะท้อนแสงไปที่กระจก M1 จากนั้นแสงจะสะท้อนกลับไปที่ทางเดิมซึ่งจะสะท้อนกลับไปที่ทางเดิมเช่นนี้ ทำให้เกิดการกระตุ้นคริสตัลแล้วเปลี่ยนความยาวคลื่นแสงเลเซอร์เป็น 1064 nm จากนั้นทำการปรับระยะการทำงาน ซึ่งมีผลต่อการกำหนดขนาดโพรงภายนอกเพื่อการเลือกความยาวคลื่นที่เกิดขึ้นเป็น laser output

2.4 เลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกแบบใช้ฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอดและการจัดวางเรียงตัวของอุปกรณ์เชิงแสงแบบตาแมว

มีการพัฒนาโดยใช้ฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอดแทนการใช้เกรตติง และใช้การจัดวางเรียงตัวของอุปกรณ์เชิงแสงแบบตาแมว โดยฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอดจะทำหน้าที่คัดเลือกย่านความยาวคลื่นที่ต้องการ โดยการหมุนระนาบของฟิลเตอร์กรองแสง ส่วนอุปกรณ์เชิงแสงแบบตาแมว จะทำหน้าที่ลดความคลาดเคลื่อนของการจัดตำแหน่งของอุปกรณ์ต่างๆ ภายใน ECDL โดยการจัดวางเรียงตัวของอุปกรณ์เชิงแสงแบบตาแมว ให้ระยะ โฟกัสตกบนกระจกเพื่อสะท้อนแสงเลเซอร์ไปที่ไดโอดเลเซอร์

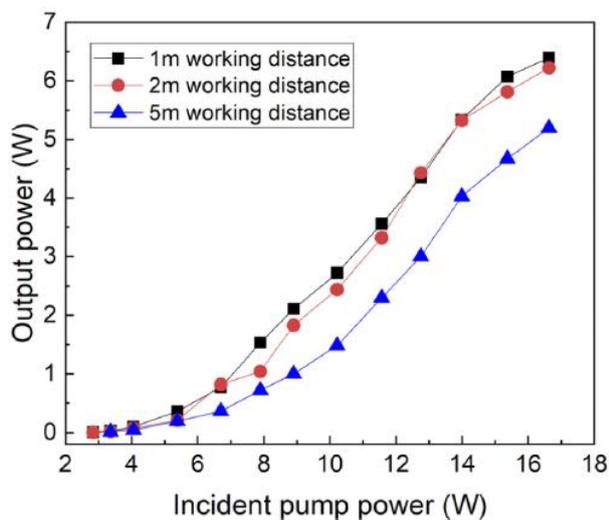
จากรูปที่ 3 มีการศึกษาในเรื่องของการสร้าง ECDL แบบ Distributed cavity laser โดยใช้ Cat-eye retroreflectors [21] ซึ่งการทดลองมี 2 ส่วน คือส่วนตัวส่งและตัวรับ โดยการศึกษานี้เขาใช้เลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 808 nm ไปกระตุ้นคริสตัล ให้เปลี่ยนความยาวคลื่นเป็น 1064 nm จากนั้นทำการปรับระยะ working distance L5 และ L6 โดยการเปลี่ยนตำแหน่งเลนส์ F4 โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง L5 และ L6



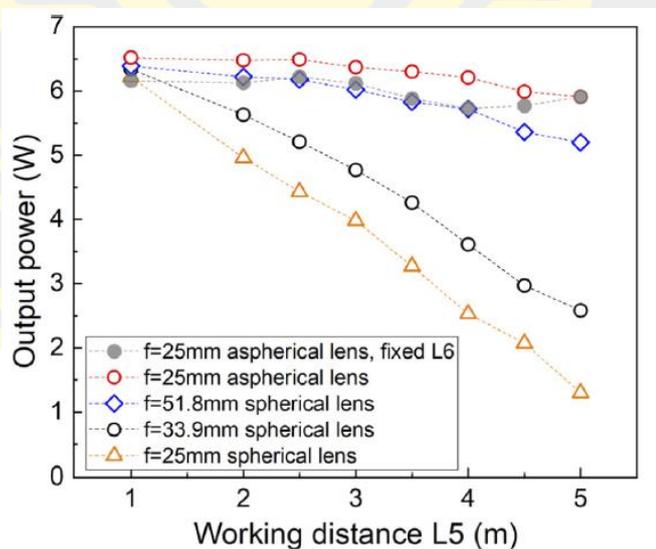
รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขอบเขตความเสถียรของ L6 กับ working distance [21]

พบว่าเมื่อ working distance L5 เพิ่มขึ้นจาก 0.5 m เป็น 5 m จะเห็นได้ว่าขอบเขตความเสถียร ของ L6 นั้นแคบลงมาก ดังนั้นจึงต้องปรับระยะห่าง L6 ให้เหมาะสมตาม L5 รูปที่ 4 แสดงบริเวณที่มีระบบเลเซอร์มีความเสถียรซึ่งเป็นพื้นที่สีเทา

จากนั้นดูความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเชิงแสงที่ตกกระทบผลึกกับกำลังเชิงแสงที่ได้ (Optical power) ที่ระยะต่างๆของ working distance โดยปรับ L6 ให้เหมาะสมกับ working distance ในแต่ละระยะ L5 ที่มากขึ้น กำลังเชิงแสงที่ได้จะลดลง L5 ที่มากขึ้นดังรูปที่ 5

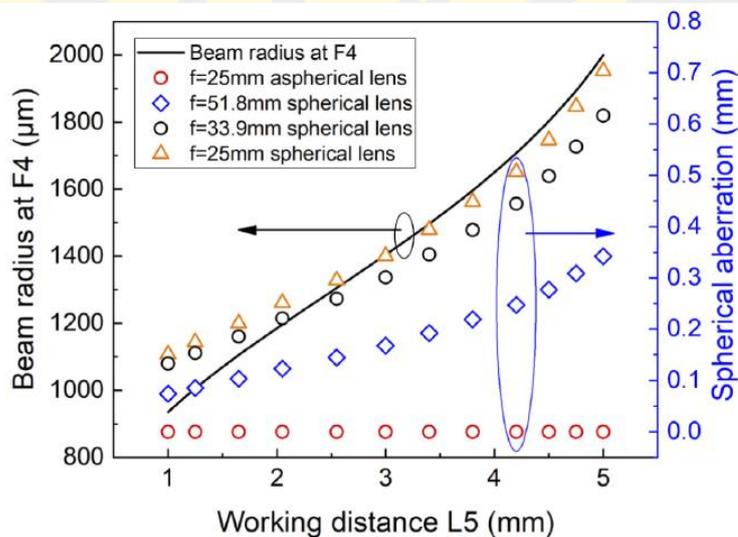


รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง incident pump power กับ output power ที่ระยะต่างๆของ working distance [21]



รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง working distance และ output power เมื่อใช้เลนส์ต่างชนิดกัน และความยาวโฟกัสต่างกัน [21]

ต่อมาเขาทำการเปรียบเทียบเลนส์ที่ตำแหน่ง F4 ระหว่าง spherical lens และ aspherical lens พบว่า จากกราฟเส้นสีเทาและเส้นสีแดง ใช้ aspherical lens ทั้งสองมีความยาวโฟกัส 25 mm แต่เส้นสีเทากำหนดระยะ L6 ไว้ ส่วนเส้นสีแดงปรับ L6 ให้เหมาะสมในแต่ละระยะ working distance ซึ่งเมื่อ working distance เพิ่มขึ้น output power จะลดลง แต่จากกราฟเส้นสีแดงจะลดลงน้อยกว่าสีเทา เนื่องจากมีการปรับระยะ L6 ให้เหมาะสมในแต่ละระยะ ส่วนเส้นสีน้ำเงิน ดำ และส้ม ใช้ spherical lens ที่มีความยาวโฟกัส 51.8, 33.9, 25 mm ตามลำดับ และปรับ L6 ให้เหมาะสมในแต่ละระยะ working distance พบว่า เส้นสีดำ สีส้ม และสีน้ำเงิน เมื่อ working distance เพิ่มขึ้น output power จะน้อยลง โดยที่เส้นสีส้มจะลดลงมากกว่าสีดำ และเส้นสีน้ำเงินจะลดลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งโดยปกติ spherical lens ที่ความยาวโฟกัสสั้นจะมีความคลาดเคลื่อนทรงกลม (Spherical aberration) สูง ดังนั้น เส้นสีน้ำเงินจะมีความคลาดเคลื่อนทรงกลมต่ำเนื่องจากความยาวโฟกัสยาว ซึ่งเมื่อเทียบกับ aspherical lens ซึ่งก็คือเส้นสีเทาและสีแดง พบว่าประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน แต่ถ้ากล่าวโดยสรุป aspherical lens ดีกว่า spherical lens เนื่องจากสามารถลดความคลาดเคลื่อนทรงกลมได้



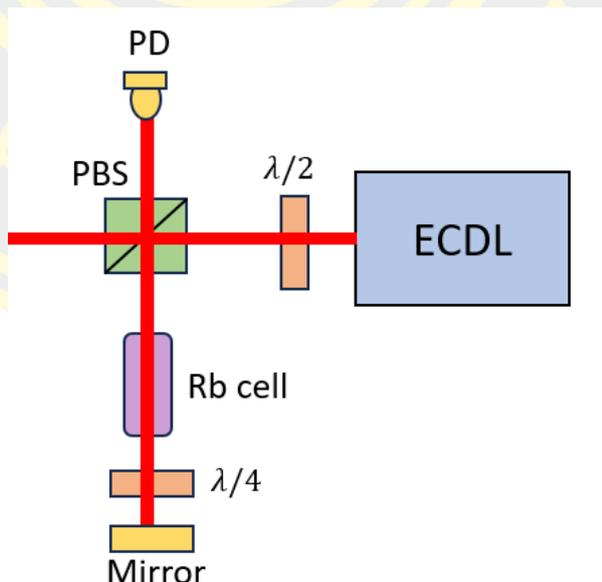
รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง working distance และขนาดลำแสงรวมทั้ง spherical aberration [21]

ซึ่งจากรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าเมื่อ working distance (L5) เพิ่มขึ้นขนาดลำแสงที่ F4 ก็เพิ่มขึ้น ความคลาดเคลื่อนทรงกลมระหว่าง aspherical lens และ spherical lens ก็เห็นได้อย่างชัดเจนว่า aspherical lens สามารถลดความคลาดทรงกลมได้ดีกว่า spherical lens

สรุปคือ การจัดวางเรียงตัวของอุปกรณ์เชิงแสงแบบตาแมวมีผลต่อระยะ working distance L5 และระยะ L6 ซึ่งต้องปรับระยะ L5 และ L6 ให้เหมาะสมกัน และชนิดของเลนส์ก็มีผลต่อความคลาดเคลื่อนทรงกลมเช่นกัน

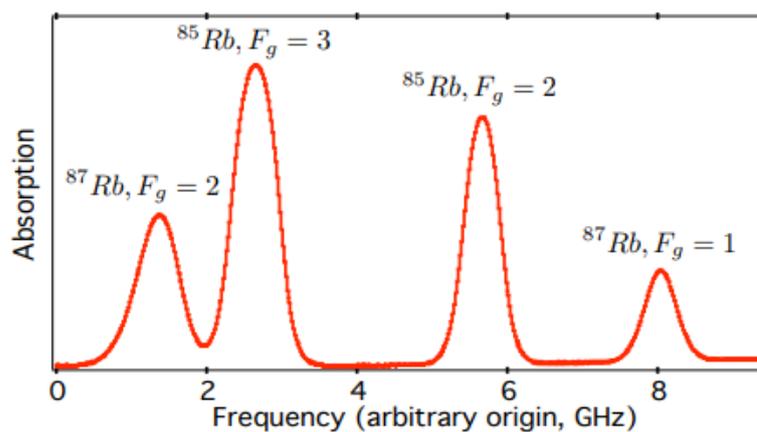
2.5 การดูดกลืนพลังงานของธาตุรูบิเดียม

Absorption spectroscopy คือ วิธีการตรวจสอบความแม่นยำของความยาวคลื่นหรือความถี่ของ ECDL ซึ่งเป็นระบบการดูดกลืนของแสงเลเซอร์ และสามารถตรวจสอบความเสถียรของ ECDL ที่มีความยาวคลื่น 780 nm ต่อการสั่นพ้องของธาตุรูบิเดียมได้ ซึ่งวิธีการตรวจสอบ Absorption spectroscopy มีหลักการคือ แสงเลเซอร์จะไปกระตุ้นอิเล็กตรอนในอะตอมรูบิเดียมจากสถานะพื้น (Ground state) ขึ้นไปที่สถานะกระตุ้น (Excited state) ถ้า ECDL ให้แสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นสั่นพ้องแล้ว จะทำให้หลอดแก้วรูบิเดียมเกิดการดูดกลืนแสงเลเซอร์ และเกิดการเปล่งแสงออกมา [15]



รูปที่ 8 แผนภาพแสดงการเกิด Absorption spectroscopy ประกอบด้วย ECDL, Half-wave plate , Polarization beam splitter (PBS), Photodiode (PD), Quarter-wave plate , หลอดแก้วรูบิเดียม (Rb cell), กระจกเงา (Mirror) [22]

จากรูปที่ 8 เมื่อแสงเลเซอร์ออกจาก ECDL แล้วผ่านแผ่นหน่วงคลื่นแบบครึ่งคลื่น (Half-wave plate ; HWP) หรือ ผ่านตัวแยกลำแสงโพลาไรซ์ (Polarization beam splitter ; PBS) โดยแสงที่มีโพลาไรเซชันแนวราบ (Horizontal polarization) จะทะลุผ่าน PBS ออกไปใช้งานและแสงที่มีโพลาไรเซชันแนวตั้ง (Vertical polarization) จะสะท้อนเข้าสู่หลอดแก้วรูบิเดียม (Rb cell) แล้วแสงจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงในช่วงความถี่ สั้นพียงน้อยลง จากนั้นแสงจะผ่านเข้าสู่แผ่นหน่วงคลื่นแบบหนึ่งในสี่คลื่น (Quarter-wave plate ; QWP) หรือ แล้วเปลี่ยนโพลาไรเซชันเชิงเส้นของแสงเลเซอร์เป็น โพลาไรเซชันแบบวงกลม (Circular polarization) แล้วสะท้อนกระจกเงา (Mirror) เพื่อเปลี่ยนโพลาไรเซชันของแสงให้หมุนทวนอีกด้าน ทำให้เมื่อแสงเลเซอร์ทะลุผ่าน จะเปลี่ยนจากแสงโพลาไรเซชันวงกลมเป็นเชิงเส้นอีกครั้ง แต่เปลี่ยนจากแสงที่มีโพลาไรเซชันแนวตั้งไปเป็นแสงที่มีโพลาไรเซชันแนวราบเข้าสู่ Rb cell อีกครั้งทำให้เกิดขดพิกเล็ๆ ซึ่งเกิดจากการที่อะตอมของธาตुरुบิเดียมอยู่ในชั้นสถานะถูกกระตุ้น ไม่สามารถถูกกระตุ้นซ้ำจากแสงความยาวคลื่นเดิมได้ ดังรูปที่ 9 จากนั้นแสงเลเซอร์จะทะลุผ่าน PBS ไปยังโฟโตไดโอด (Photodiode; PD) เพื่อรับสัญญาณการดูดกลืนของแสงเลเซอร์ธาตुरुบิเดียม โดยความยาวคลื่นเลเซอร์ ECDL จะสามารถเปลี่ยนความถี่ได้โดยใช้การสแกนระยะกระจกควิต์ผ่านเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) ของ ECDL ซึ่งแถบการดูดกลืนจะมีรูปร่างแตกต่างกันออกไปอย่างชัดเจน

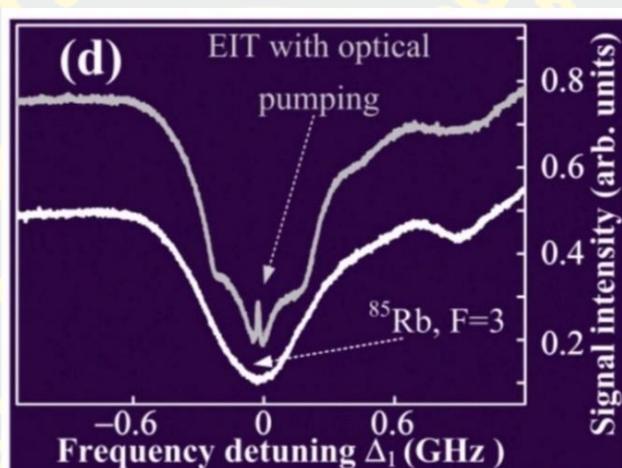


รูปที่ 9 แสดงการดูดกลืนสเปกตรัมของธาตुरुบิเดียมที่ความถี่ต่างๆ

(Saturated absorption spectra of D2 transition in Rb) [23]

2.6 การเหนี่ยวนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้แสงทะลุผ่าน (Electromagnetically induced transparency; EIT)

การเหนี่ยวนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้แสงทะลุผ่าน จากหัวข้อ 2.5 ถ้าให้ ECDL ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 483 nm เข้าไปที่ตรงกันข้าม แสงเลเซอร์จะไปกระตุ้นอิเล็กตรอนที่อยู่ในอะตอม จากชั้นสถานะกระตุ้นขึ้นไปยังสถานะริดเบิร์กเกิดเป็นปรากฏการณ์ EIT ซึ่งเกิดจากการแทรกสอดเชิงควอนตัมของ probability amplitude ของการเปลี่ยนสถานะทางควอนตัมที่เกี่ยวข้องทำให้แสงถูกดูดกลืนน้อยลง เป็นลักษณะพิกซ์ขึ้นมาในหลุมที่ถูกดูดกลืน ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 แสดงการเกิดปรากฏการณ์การเหนี่ยวนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้แสงทะลุผ่าน [24]

2.7 อะตอมริดเบิร์ก (Rydberg atoms)

ริดเบิร์กถูกตั้งชื่อตามนักฟิสิกส์ชาวสวีเดน โยฮันเนส ริดเบิร์ก ซึ่งเป็นผู้พัฒนาสมการริดเบิร์กเพื่อทำนายความยาวคลื่นของเส้นสเปกตรัมที่ปล่อยออกมาจากอะตอม อะตอมริดเบิร์กคืออะตอมที่อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นจากชั้นสถานะพื้นขึ้นไปยังชั้นสถานะกระตุ้น มีเลขควอนตัมหลัก (principal quantum number) n ที่มีค่ามาก ยิ่งค่า n สูงเท่าใด อิเล็กตรอนก็จะยิ่งห่างจากนิวเคลียสมากขึ้นเท่านั้น ซึ่งการเปลี่ยนชั้นพลังงานระหว่างระดับชั้นของอะตอมริดเบิร์กจะมีการปล่อยโฟตอนที่มีความยาวคลื่นในช่วงไมโครเมตรถึงมิลลิเมตร ซึ่งมีความยาวคลื่นมากกว่าในกรณีของอะตอมทั่วไป โดยอิเล็กตรอนในระดับพลังงานริดเบิร์กนั้น ได้มีการอธิบายคุณสมบัติโดยใช้ฟิสิกส์ยุคเก่าและฟิสิกส์ควอนตัม อะตอมริดเบิร์กมีความแปลก คือ ขนาดอะตอมจะขึ้นกับ n^2 ซึ่งหมายความว่า อะตอมริดเบิร์กสามารถมีขนาดใหญ่กว่าอะตอมธรรมดาอย่างมาก นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการเกิดขั้วมาก ทำให้มีการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้ดีและมีระยะเวลาการสลายตัวของสถานะริดเบิร์กยาวนาน [25, 26]

อะตอมริดเบิร์ก ได้มีการอธิบายโดยแบบจำลองอะตอมไฮโดรเจนของโบร์ ซึ่งอะตอมของไฮโดรเจนธรรมดา นิวเคลียสจะมีแต่โปรตอนเท่านั้น โดยอะตอมริดเบิร์กของธาตุใดๆ ที่มีค่า n สูงมากพอ อิเล็กตรอนชั้นนอกสุดจะอยู่ห่างจากแกนไอออน จนทำให้การบดบังของอิเล็กตรอนภายในมีค่ามาก แสดงว่าเวเลนซ์อิเล็กตรอนถูกดึงดูดจากนิวเคลียสได้น้อยทำให้ขนาดอะตอมใหญ่ ซึ่งอิเล็กตรอนชั้นนอกสุดจะเห็นประจุนิวเคลียสสุทธิมีค่าโดยประมาณเท่ากับค่าประจุบวกของโปรตอนเดี่ยว [25]

อะตอมริดเบิร์ก คือ อะตอมที่อิเล็กตรอนอยู่ไกลจากนิวเคลียสมาก ซึ่งมีพลังงานยึดเหนี่ยวน้อย เมื่อมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายนอกมารบกวน อิเล็กตรอนจะเปลี่ยนจากชั้นสถานะ Rydberg ไปที่ชั้นสถานะที่มีเลขควอนตัมหลักอื่น ซึ่งสามารถใช้การเหนี่ยวนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้แสงทะลุผ่าน ในการตรวจจับสัญญาณโดยคุณลักษณะของสัญญาณการเกิดฟิค EIT ฟิคเดี่ยว ฟิคของสัญญาณ EIT จะเกิดการแตกเป็นฟิคย่อยๆ ถ้าความเข้มของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อิงเข้าไปผ่านอะตอมนั้นมาก ระยะระหว่างฟิคจะยิ่งห่างเรื่อยๆ ซึ่งสามารถวัดค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้โดยวิธีนี้ [27]

การสร้างอะตอมริดเบิร์ก (Production of Rydberg atoms)

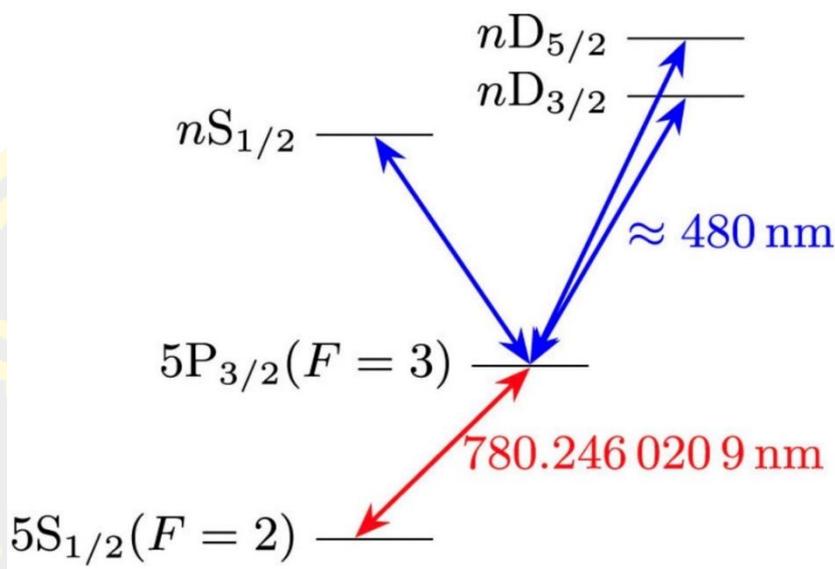
การสร้างอะตอมริดเบิร์กสามารถทำได้ 2 แบบ คือ

1. การชนของอะตอม การควบคุมสถานะของอะตอมริดเบิร์กให้มีสถานะเดี่ยว (single state) เป็นไปได้ยาก

2. การใช้แสงเลเซอร์กระตุ้นอะตอมของธาตุอัลคาไล (alkali atoms) จากสถานะพื้นไปยังสถานะริดเบิร์ก การสร้างอะตอมริดเบิร์กสามารถใช้ธาตุอัลคาไลตั้งแต่ธาตุลิเทียมไปจนถึงธาตุซีเซียมเนื่องจากมีเลเซอร์มีความยาวคลื่นที่จำเป็นสำหรับการผลิตอะตอมริดเบิร์กของธาตุเหล่านี้

การสร้างอะตอมริดเบิร์กจะใช้อะตอมของรูบิเดียม โดยระดับชั้นพลังงานของอะตอมรูบิเดียมแสดงดังรูปที่ 11 [28] อะตอมริดเบิร์กของรูบิเดียมสร้างขึ้นโดยใช้เลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 780 nm สำหรับการกระตุ้นสถานะพื้น $5S_{1/2} (F=2)$ ไปยังสถานะกระตุ้น $5P_{3/2} (F=3)$ และเลเซอร์ที่ปรับค่าได้ซึ่งมีความยาวคลื่นประมาณ 480 nm เพื่อกระตุ้นจากสถานะ $5P_{3/2} (F=3)$ ไปยังสถานะริดเบิร์กที่ $nS_{1/2}$, $nD_{3/2}$ หรือ $nD_{5/2}$ โดยแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นระหว่าง 479 – 784 nm จะสามารถสร้างอะตอมริดเบิร์กที่มี $n = 26-124$ โดยทั่วไปเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 780 nm จะเป็นเลเซอร์ไดโอดชนิดโพรงภายนอก

ในงานวิจัยนี้เริ่มต้นจะสร้างเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 483 nm จากไดโอดเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกที่มีไดโอดเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 483-495 nm ซึ่งมีราคาถูกร่วมกับระบบเลนส์แบบตาแมวและจะใช้ทดลองกับอะตอมของรูบิเดียมจาก Rb cell



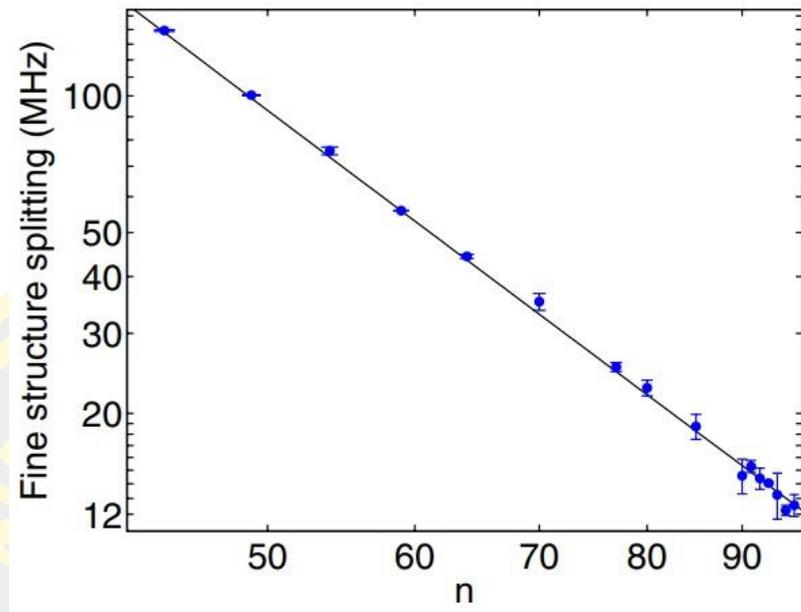
รูปที่ 11 แผนภาพแสดงระดับชั้นพลังงานของอะตอมริบ์เบิร์ก [28]

การตรวจวัดสถานะริบ์เบิร์ก (Detection of Rydberg states)

การตรวจวัดอะตอมในสถานะริบ์เบิร์ก ใช้เทคนิคการเหนี่ยวนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้แสงทะลุผ่าน ดังแสดงในรูปที่ 11 ซึ่งจะปรากฏขึ้นในสเปกโทรสโกปีแบบส่งผ่าน (transmission spectroscopy) ของแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 780 nm ใกล้เคียง ๆ การเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานจาก 5S ไปยัง 5P โดยรูปร่างของเส้น EIT ในสเปกโทรสโกปีสามารถประมาณค่าได้จาก susceptibility ดังสมการที่ (7) ซึ่งเขียนได้เป็น [29]

$$\chi(\nu) d\nu = -\frac{i3\lambda_p^2 \gamma_2 N(\nu) d\nu}{4\pi} \left(\gamma_2 - i(\Delta_p - \mathbf{k}_p \cdot \mathbf{v}) + \frac{(\Omega_c/2)^2}{\gamma_3 - i[\Delta_p + \Delta_c - (\mathbf{k}_p + \mathbf{k}_c) \cdot \mathbf{v}]} \right)^{-1} \quad (7)$$

เมื่อ $\Delta_{p,c}$, $\Omega_{p,c}$ และ $k_{p,c} = 2\pi/\lambda_{p,c}$ คือ detunings ความถี่ Rabi และเลขคลื่น (wave number) สำหรับทั้งสองเลเซอร์ตามลำดับ $N(\nu)$ และ $\gamma_{2,3}$ แสดงจำนวนอะตอมริบ์เบิร์กที่มีความเร็วและอัตราการสลายตัวที่เกี่ยวข้องกับสถานะกลาง (intermediate state) และสถานะริบ์เบิร์ก ตามลำดับ เลขควอนตัมหลัก n ของอะตอมริบ์เบิร์กสามารถตรวจวัดได้จาก fine structure ที่แยกตัวของสถานะ d เกี่ยวข้องกับตำแหน่ง EIT peaks นั้น ๆ รูปที่ 12 แสดงค่าจากการคำนวณและทดลองของการแยกตัวของ fine structure ในรูปฟังก์ชัน n



รูปที่ 12 แสดงค่าของ n ที่ขึ้นต่อการแยกของ fine structure ของสถานะ d [30]

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

จุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้คือ การสร้างระบบเลเซอร์และระบบเชิงแสงสำหรับการสร้างอะตอมริคเบิร์ตของธาตุรูบิเดียม โดยออกแบบและสร้างเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกจากเลเซอร์ไดโอดเชิงพาณิชย์ราคาไม่แพง GH04850B26 โดยใช้การจัดวางอุปกรณ์เชิงแสงแบบตาแมวและฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอด ทั้งหมดนี้เพื่อทำให้ ECDL มีความยาวคลื่นจาก 485 nm เป็นประมาณ 483 nm และสามารถใส่เลเซอร์นี้ควบคู่ไปกับระบบ ECDL ที่ให้ความยาวคลื่น 780 nm เพื่อผลิตอะตอมรูบิเดียมในสถานะริคเบิร์ต

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้วิจัย

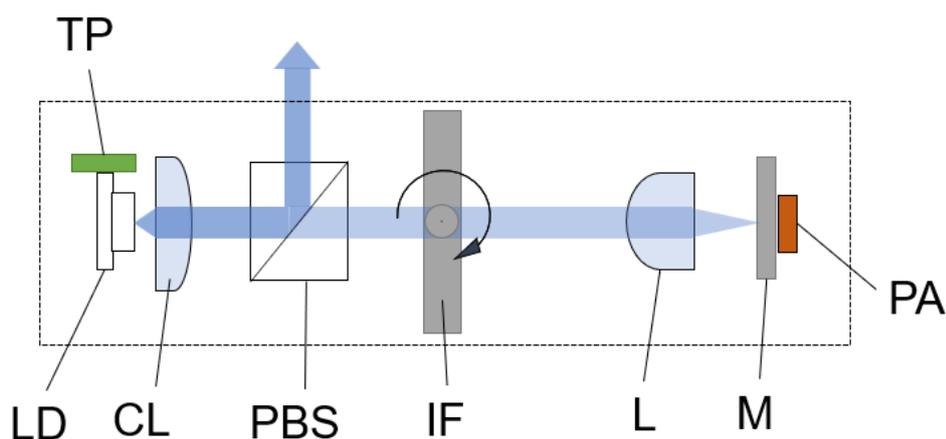
1. Laser diode (LD, GH04850B26, Sharp)
2. Laser Diode (LD, L785H1, Thorlabs)
2. Collimation tube (CL, LT110P-B, Thorlabs)
3. Polarizing beam splitters (PBS1, PBS102, Thorlabs)
4. Polarizing beam splitters (PBS2, PBS202, Thorlabs)
5. Mirror (M1, M3, M4, PF10-03-M01, Thorlabs)
6. Mirror (M2, BB1-E03, Thorlabs)
7. Convex lens (L1, CP1TM09/M, Thorlabs)
8. Convex lens (L2, LB1761-B-ML, Thorlabs)
11. Half-wave plate (HWP, WPH10M, Thorlabs)
12. Quarter-wave plate (QWP, WPQ10M, Thorlabs)
13. Rb cell (Rb cell1, GC19100-I, Thorlabs)
14. Rb cell (Rb cell2, GC25075-RB, Thorlabs)
15. Piezo actuator (PZT, TA0505D024W, Thorlabs,)
16. Photo diode (PD, SFH213, Osram)
17. Digital Oscilloscope (Digital Oscilloscope, DS1054Z, Rigol)
18. Spectrometers (S, CCS100, Thorlabs)
19. Interference filter (IF, FB480-10, Thorlabs)
20. Interference filter (F, NBP470, Thorlabs)

21. Xe lamp (Xe, 35W10000KH1VGCP, Shopee)

22. Computer

3.2 ออกแบบและสร้างเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอก (ECDL)

สร้างต้นแบบเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอก จากเลเซอร์ไดโอดเชิงพาณิชย์ราคาไม่แพงจากเลเซอร์ไดโอดรุ่น GH04850B2G โดยใช้การจัดวางอุปกรณ์เชิงแสงแบบตาแมวและฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอด เพื่อเลือกความยาวคลื่นที่เกิดขึ้น โดยมีส่วนประกอบดังรูปที่ 13 คือ ไดโอดเลเซอร์ (Diode laser ; LD) โพรบวัดอุณหภูมิ (Temperature probe ; TP) เลนส์ทำแสงขนาน (Collimating lens ; CL) ตัวแยกลำแสงโพลาไรซ์ (Polarizing Beam Splitter ; PBS) ฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอด (Interference filter ; IF) อุปกรณ์เชิงแสงแบบตาแมว (Cateye configuration ; L) กระจกระนาบ (Mirror ; M) และเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric ; PZT)



รูปที่ 13 แผนภาพการสร้างเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกโดยใช้การจัดวางอุปกรณ์เชิงแสงแบบตาแมวและฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอด

3.3 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอก โดยใช้การจัดวางอุปกรณ์เชิงแสงแบบตาแมวและฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอด

เลเซอร์ชนิดโพรงภายนอก มีวิธีปรับความยาวคลื่นหลายแบบ เช่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ การปรับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับไดโอดเลเซอร์ และการปรับระยะของกระจกควิตี้ของเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอก เป็นต้น ในการออกแบบนี้จะแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ การควบคุมระยะกระจกควิตี้ การรับสัญญาณการดุดกิ้นของธาตุรูบิเดียม ซึ่งการควบคุมระยะกระจกควิตี้ ดังรูปที่ 14 นั้นเป็นการปรับความถี่หรือความยาวคลื่นโดยใช้การจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปที่เพียโซอิเล็กทริกที่ติดอยู่กับกระจกควิตี้ ทำให้กระจกควิตี้ขยับเข้าและออก ซึ่งเป็นการสแกนระยะกระจกควิตี้เพื่อปรับความถี่หรือความยาวคลื่นให้เหมาะสม ส่วนการใช้การรับสัญญาณการดุดกิ้นของธาตุรูบิเดียม นั้นถ้าเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอก ให้แสงเลเซอร์ที่มีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่สั่นพ้องของธาตุรูบิเดียมจะเกิดการดุดกิ้นของธาตุรูบิเดียม ซึ่งจะใช้ชุดอุปกรณ์ตามรูปที่ 13 โดยจะมีลักษณะการดุดกิ้นของแสงดังรูปที่ 15 ซึ่งจะใช้งานร่วมกับออสซิลโลสโคป (Digital Oscilloscope) รุ่น RIGOL DS1054Z

3.3.1 แหล่งควบคุมกระแสไฟฟ้าของไดโอดเลเซอร์

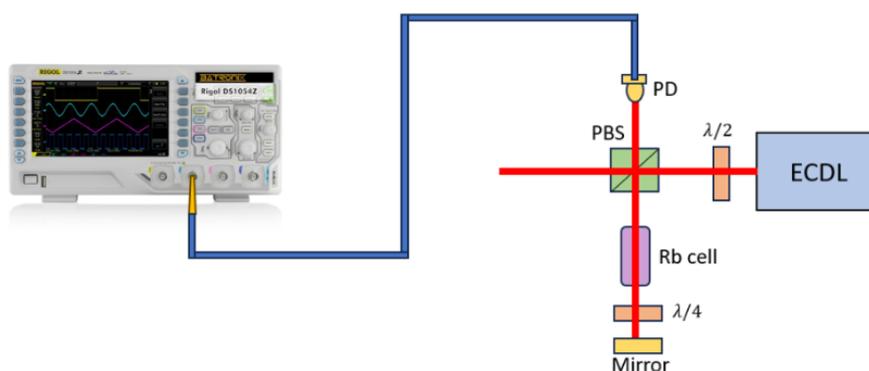
การควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ให้ไดโอดเลเซอร์จะทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้ไดโอดเลเซอร์ รุ่น GH04850B26 โดยใช้วงจรควบคุมกระแสไฟฟ้า (Laser Diode Driver) รุ่น LDTC0520 ดังรูปที่ 14 ซึ่งวงจรควบคุมกระแสไฟฟ้านี้สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้มากที่สุดที่ 500 mA สามารถจ่ายกระแสให้ TEC ได้สูงสุดคือ ± 2.2 A และสามารถปรับการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับไดโอดเลเซอร์ได้ด้วยการปรับ I-SET (Laser Current Setpoint) ในการกำหนดกำลังวัตต์สูงสุดที่จ่ายให้ไดโอดเลเซอร์



รูปที่ 14 วงจรควบคุมกระแสไฟฟ้า

3.3.2 การรับสัญญาณการดูดกลืนของธาตุรูบิเดียม

ทำการทดลองดังรูปที่ 8 เพื่อการรับสัญญาณการดูดกลืนของธาตุรูบิเดียมว่าแสงเลเซอร์ ECDL มีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่สั่นพ้องของธาตุรูบิเดียมที่จะเกิดการดูดกลืนของธาตุรูบิเดียม โดย Photodiode จะรับสัญญาณความเข้มแสงมาแล้วแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งจะแสดงผลโดยใช้งานร่วมกับออสซิลโลสโคป รุ่น RIGOL DS1054Z ดังรูปที่ 15



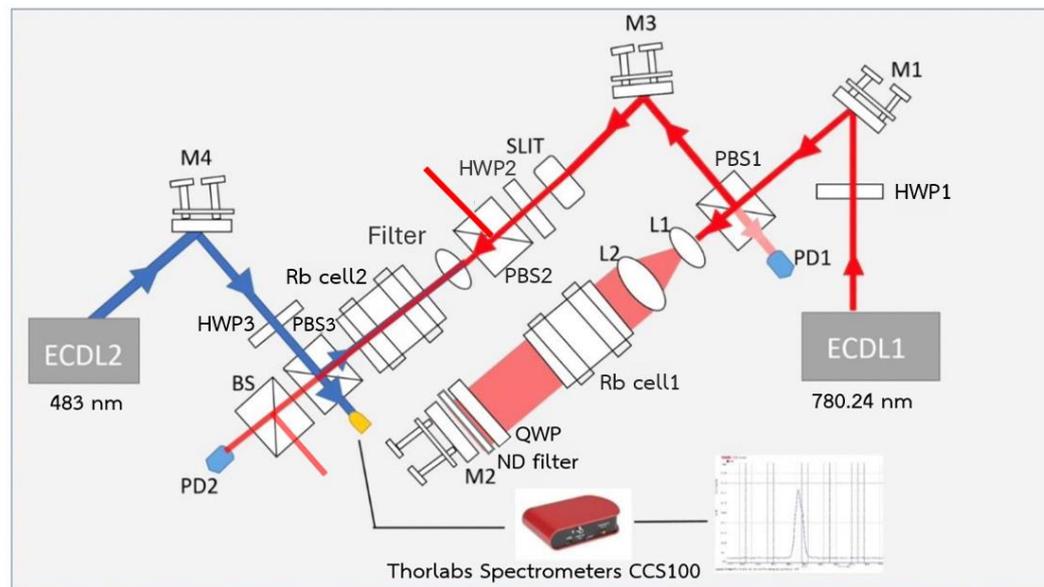
รูปที่ 15 แผนภาพแสดงการรับสัญญาณการดูดกลืนของธาตุรูบิเดียม

3.3.3 การควบคุมระยะกระจกควิตี้

จากรูปที่ 13 การควบคุมระยะกระจกควิตี้ทำได้โดยการปรับความถี่หรือความยาวคลื่นโดยใช้การจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปที่เพียโซอิเล็กทริก ที่ติดอยู่กับกระจกทำให้กระจกขยับเข้าและออก ซึ่งเป็นการสแกนระยะกระจกควิตี้เพื่อปรับความถี่หรือความยาวคลื่นให้เหมาะสม และเมื่อแสงเลเซอร์มีความยาวคลื่นที่สั่นพ้องกับธาตุรูบิเดียมจะเกิดการดูดกลืนแสงแสดงดังรูปที่ 15 โดยการปรับความยาวคลื่นของ ECDL ซึ่งแถบการดูดกลืนจะมีรูปร่างแตกต่างกันออกไปอย่างชัดเจน

3.4 การจัดอุปกรณ์ของระบบการดูดกลืนพลังงานของธาตุรูบิเดียม

การสร้างไดโอดเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอก โดยใช้การจัดวางอุปกรณ์เชิงแสงแบบตาแมว และฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอด แล้วตรวจสอบความยาวคลื่นที่ประมาณ 483 nm โดยใช้ดูดกลืนพลังงานของธาตุรูบิเดียม มีแผนภาพการจัดวางอุปกรณ์ดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 แผนภาพการสร้างระบบเลเซอร์และระบบเชิงแสงสำหรับการสร้างอะตอมริดเบิร์กของธาตุรูบิเดียม

จากรูปที่ 16 คือ แผนภาพการจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างระบบเลเซอร์และระบบเชิงแสงสำหรับการสร้างอะตอมริดเบิร์กของธาตุรูบิเดียม โดยแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 780 nm จะออกจาก ECDL โดยมีแสงโพลาไรเซชันแนวตั้ง แล้วผ่านแผ่นหน่วงคลื่นแบบครึ่งคลื่น ($\frac{\lambda}{2}$) จากนั้นสะท้อนเข้ากระจก M1 แล้วผ่านตัวแยกลำแสงโพลาไรซ์ (PBS) ซึ่ง HWP และ PBS ใช้ร่วมกันจะมีคุณสมบัติพิเศษคือสามารถปรับความเข้มแสงของโพลาไรซ์ได้ โดยแสงที่ผ่าน จะเป็นโพลาไรซ์แนวตั้ง เมื่อแสงเข้าสู่ PBS1 โพลาไรซ์จะแบ่งเป็นโพลาไรเซชันแนวตั้งและแนวนอน โดยสามารถปรับความเข้มแสงของโพลาไรซ์แต่ละทิศทาง โดยการปรับ HWP1 โดยแสงโพลาไรเซชันแนวตั้งจะสะท้อน PBS1 ไปที่กระจก M3 แล้วแสงโพลาไรเซชันแนวราบ จะทะลุผ่านเข้าไปในหลอดแก้วรูบิเดียม (Rb cell) แล้วแสงจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงในช่วงความถี่สั้นลง โดยแสงเลเซอร์จะไปกระตุ้นอิเล็กตรอนที่อยู่ในอะตอมรูบิเดียมจากชั้นสถานะพื้น

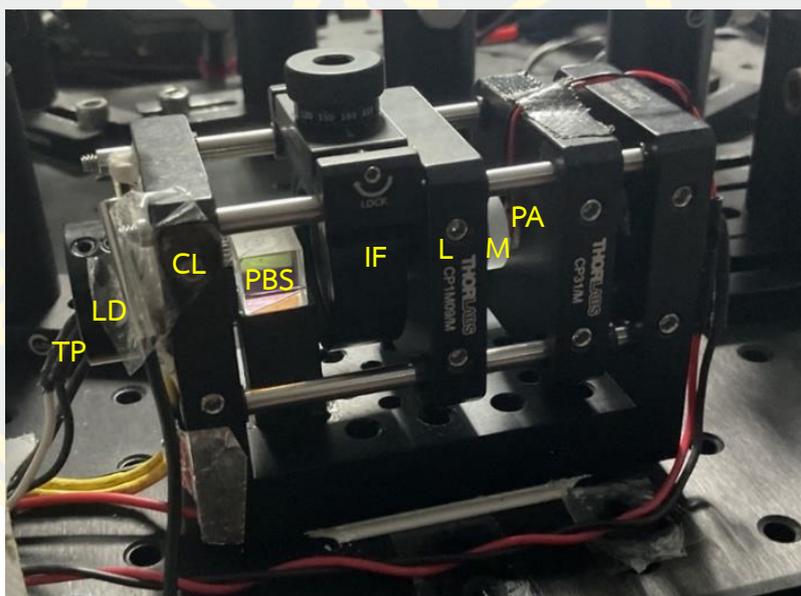
ไปยังชั้นสถานะกระตุ้น จากนั้นแสงเลเซอร์จะผ่านแผ่นหน่วงคลื่นแบบหนึ่งในสี่คลื่น (QWP) หรือ $\frac{\lambda}{4}$ แล้วเปลี่ยนโพลาไรเซชันเชิงเส้นของแสงเลเซอร์เป็นโพลาไรเซชันแบบวงกลม จากนั้นแสงจะผ่านฟิลเตอร์กรองความเข้มแสง (ND filter) เพื่อทำให้แสงจางลงแล้วสะท้อนกระจก M2 กลับมาแนวทางเดิม เมื่อแสงเลเซอร์ทะลุผ่าน QWP อีกครั้งแสงจะเปลี่ยนจากโพลาไรเซชันวงกลมเป็นเชิงเส้นอีกครั้ง แต่เปลี่ยนจากแสงที่มีโพลาไรเซชันแนวราบไปเป็นแสงที่มีโพลาไรเซชันแนวตั้งเข้าสู่ Rb cell1 อีกครั้งทำให้เกิดขดพิคเล็กๆ ซึ่งเกิดจากการที่อะตอมของธาตุรูบิเดียมอยู่ในชั้นสถานะถูกกระตุ้น ไม่สามารถถูกกระตุ้นซ้ำจากแสงความยาวคลื่นเดิมได้ จากนั้นแสงจะสะท้อนเข้าไปที่โฟโตไดโอด (PD) ซึ่งปัจจัยหลักในการใช้ QWP ก็เพื่อให้แสงเข้าไปที่ PD1 เพื่อรับสัญญาณและดูการ absorption spectroscopy ของธาตุรูบิเดียมในออสซิลโลสโคป ซึ่งถ้าไม่มี QWP แสงจะสะท้อนเข้า ECDL ทำให้ได้รับความเสียหายได้ จากนั้นแสงเลเซอร์ 780 nm จะสะท้อนแสงโพลาไรเซชันแนวตั้งเข้าไปที่กระจก M3 ผ่าน Slit เพื่อให้แสงทะลุผ่านมาที่ HWP2 น้อย จากนั้นแสงจะทะลุผ่าน HWP2 เข้าสู่ PBS2 โดยแสงโพลาไรเซชันแนวตั้งจะสะท้อนออกไปส่วนแสงโพลาไรเซชันแนวราบจะทะลุผ่าน PBS2 มายังฟิลเตอร์แล้วเข้าสู่ Rb cell2 จากนั้นแสงเลเซอร์โพลาไรเซชันแนวตั้งที่มีความยาวคลื่นประมาณ 483 nm จะออกจาก ECDL2 แล้วสะท้อนเข้าไปที่กระจก M4 แล้วผ่าน HWP3 ซึ่งแสงโพลาไรเซชันแนวราบจะทะลุผ่าน PBS3 เข้าไปที่สเปคโตรมิเตอร์เพื่อดูความยาวคลื่นของเลเซอร์ จากนั้นแสงโพลาไรเซชันแนวตั้งจะสะท้อนเข้าไปที่ Rb cell2 ในทิศทางตรงกันข้ามกับเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 780 nm โดยเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 780 nm จะกระตุ้นอิเล็กตรอนในอะตอมรูบิเดียมจากชั้นสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นและเมื่อเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 483 nm เข้าไปในทิศทางตรงกันข้ามอิเล็กตรอนในอะตอมรูบิเดียมจะถูกกระตุ้นจากชั้นสถานะกระตุ้นไปยังชั้นสถานะริคเบิร์ก ทำให้อิเล็กตรอนบางส่วนในชั้นสถานะกระตุ้นไปอยู่ในชั้นสถานะริคเบิร์ก ทำให้อะตอมดูดกลืนแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 780 nm ได้น้อยลง แสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 780 nm จึงทะลุผ่านมากขึ้นในช่วงความถี่เดียวกับเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 483 nm ทำให้เกิดเป็นสัญญาณพิคขึ้นมาในหลุมการดูดกลืน ซึ่งลักษณะนี้เรียกว่าการเกิด EIT ซึ่งเป็นการตรวจการเกิดริคเบิร์ก ซึ่งจะดูสัญญาณการเกิดจาก PD2

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การตรวจสอบคุณสมบัติของ ECDL โดยวิธี absorption spectroscopy และศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างอะตอมริดเบิร์ก

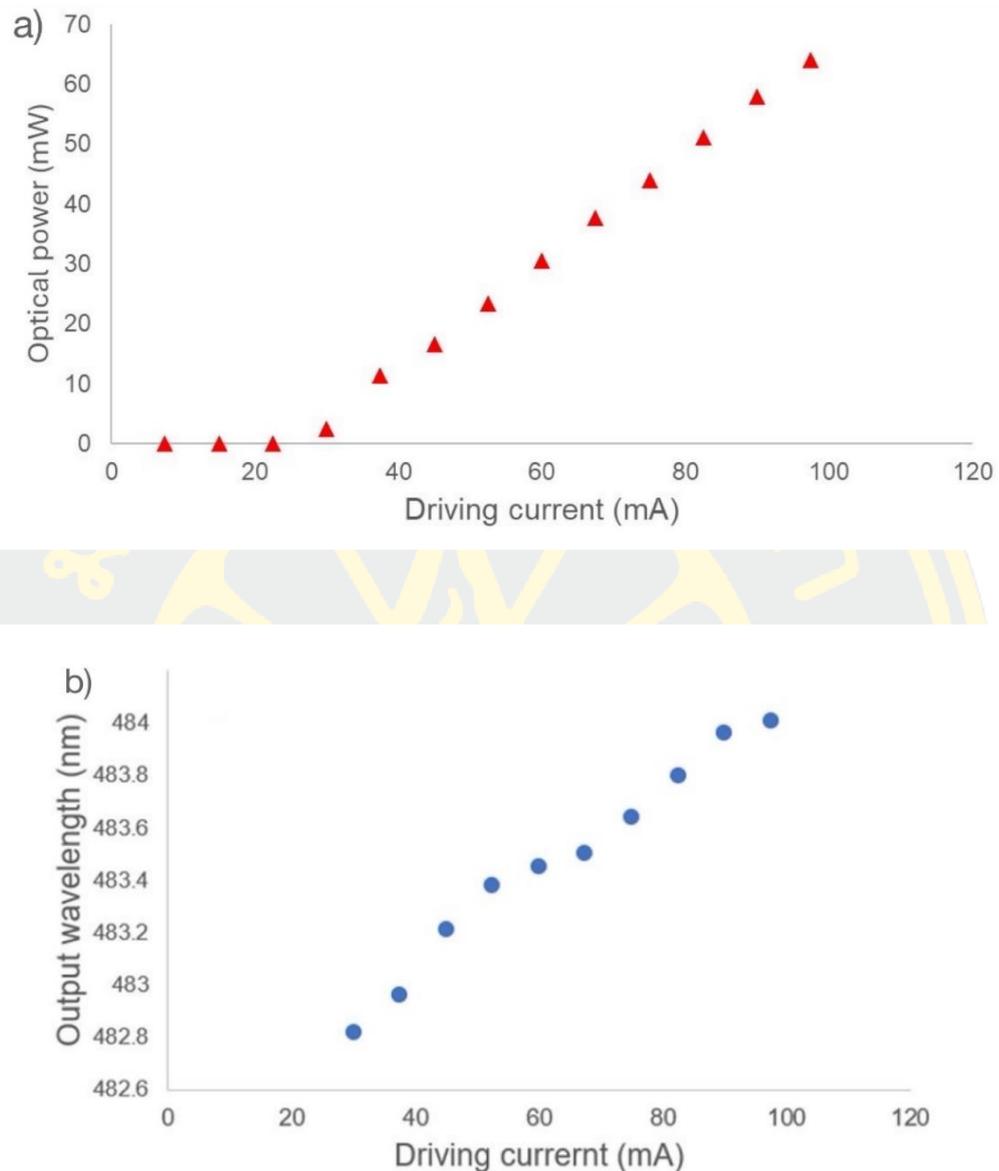
ในงานวิจัยนี้ทำการออกแบบและสร้างเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกจากเลเซอร์ไดโอดที่มีราคาไม่แพง โดยใช้การจัดวางอุปกรณ์เชิงแสงแบบตาแมวและฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอด และตรวจสอบคุณสมบัติของ ECDL ด้วยวิธี absorption spectroscopy เพื่อการรับสัญญาณการดูดกลืนของธาตุรูบิเดียมว่า แสงเลเซอร์ ECDL มีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่สั่นพ้องของธาตุรูบิเดียมที่จะเกิดการดูดกลืนของธาตุรูบิเดียม โดยโฟโต้ไดโอดจะรับสัญญาณความเข้มแสงมาแล้วแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า



รูปที่ 17 ภาพจริงแสดงองค์ประกอบของเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอก

ไดโอดเลเซอร์ (Diode laser) ; LD, โพรบวัดอุณหภูมิ (Temperature probe) ; TP, เลนส์ทำแสงขนาน (Collimating lens); CL, Polarizing Beam Splitter ; PBS, ฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอด (Interference filter) ; IF, อุปกรณ์เชิงแสงแบบตาแมว (Cateye configuration) ; L, กระจกเงา (Mirror) ; M, และเพียโซอิเล็กทริก Piezo actuator (PA)

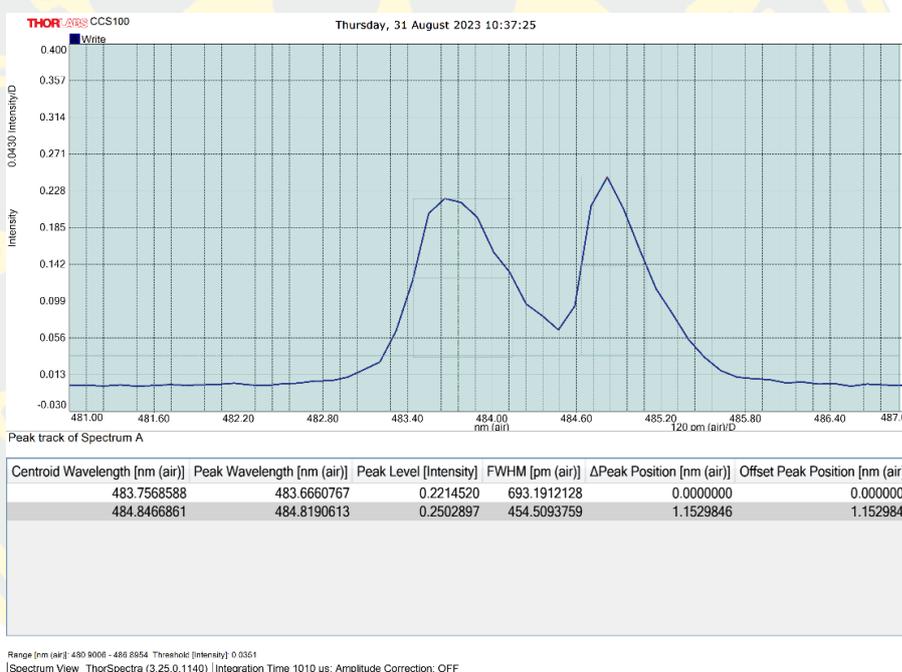
รูปที่ 17 แสดงเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกไดโอดเลเซอร์ (ECDL) โดยทำการออกแบบและสร้างเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกจากเลเซอร์ไดโอดที่มีราคาไม่แพงจากเลเซอร์ไดโอดรุ่น GH04850B2G โดยใช้การจัดวางอุปกรณ์เชิงแสงแบบตาแมวและฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอดซึ่งทำจากวัสดุ InAlGaN ใช้วงจรขับเลเซอร์ รุ่น LDTC0520 กำลังขับส่งออก 55 mW และมีช่วงความยาวคลื่นระหว่างประมาณ 480 ถึงประมาณ 495 nm โดยไดโอดเลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสง (LD) หัวตรวจวัดอุณหภูมิ (TP) วัดอุณหภูมิซึ่งความยาวคลื่นที่ได้จะขึ้นกับอุณหภูมิ จากนั้นเลนส์ทำแสงขนาน (CL) จะทำให้แสงเป็นลำขนาน แล้ว PBS จะแบ่งแสงเป็นโพลาไรซ์แนวตั้งสะท้อนออกไปใช้งาน และโพลาไรซ์แนวนอนจะทะลุผ่าน PBS มายังฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอด (IF) ที่ทำหน้าที่เลือกความยาวคลื่น จากนั้นแสงจะผ่านมายังอุปกรณ์เชิงแสงแบบตาแมว โดยจะโฟกัสแสงเป็นจุดเล็กๆเพื่อให้แสงลงที่กระจกซึ่งทำหน้าที่เป็นโพรงภายนอก สะท้อนแสงกลับไปโพรง ภายในไดโอดเลเซอร์เพื่อให้ความยาวคลื่นเปลี่ยน ซึ่งเป็ยโซ่ที่ติดอยู่กับกระจกจะถูกจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้ามา ทำให้กระจกขยับเข้าออก เป็นการสแกนระยะกระจกควิตี้เพื่อปรับความถี่หรือความยาวคลื่นให้เหมาะสม [16] ผลการทดลองเบื้องต้นจากการออกแบบและสร้าง ECDL



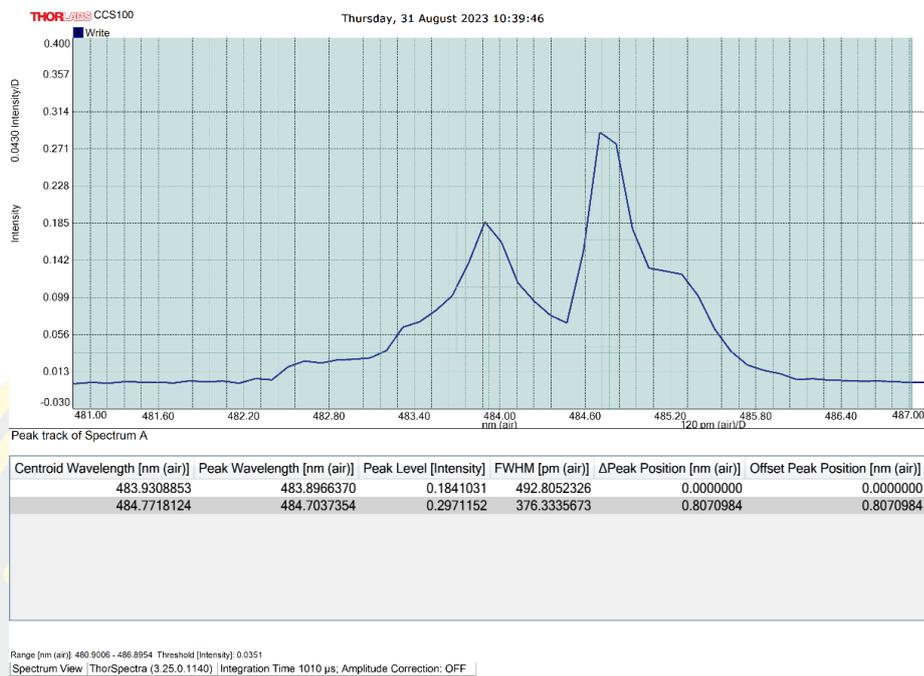
รูปที่ 18 a) กราฟแสดงกำลังแสงเป็นฟังก์ชันของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ขับเลเซอร์ b) กราฟแสดงความยาวคลื่นเอาต์พุตที่วัดได้เป็นฟังก์ชันของกระแสเลเซอร์ขับเคลื่อน

กำลังเอาต์พุตแสงจาก ECDL ที่สร้างขึ้นถูกวัดเมื่อกระแสเลเซอร์ขับเคลื่อนเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 18a) กำลังเชิงแสงเริ่มเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสไฟมีค่ามากกว่า 30 mA เป็นลักษณะความสัมพันธ์เชิงเส้นกับกระแสไฟฟ้า สเปกโตรมิเตอร์ CCS100 ถูกใช้ในการตรวจวัดความยาวคลื่นของ ECDL ที่สร้างขึ้นจากการใช้ค่ากระแสไฟฟ้าต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 18b) กระแสไฟขับที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความยาวคลื่นเอาต์พุตเปลี่ยนจาก 482.8 nm เป็น 484.0 nm ดังนั้นสามารถปรับความยาวคลื่นได้โดยการปรับกระแสไฟฟ้าที่ให้กับเลเซอร์และค่าอุณหภูมิเลเซอร์ไดโอดควัดมีค่าอยู่ที่ 25 °C

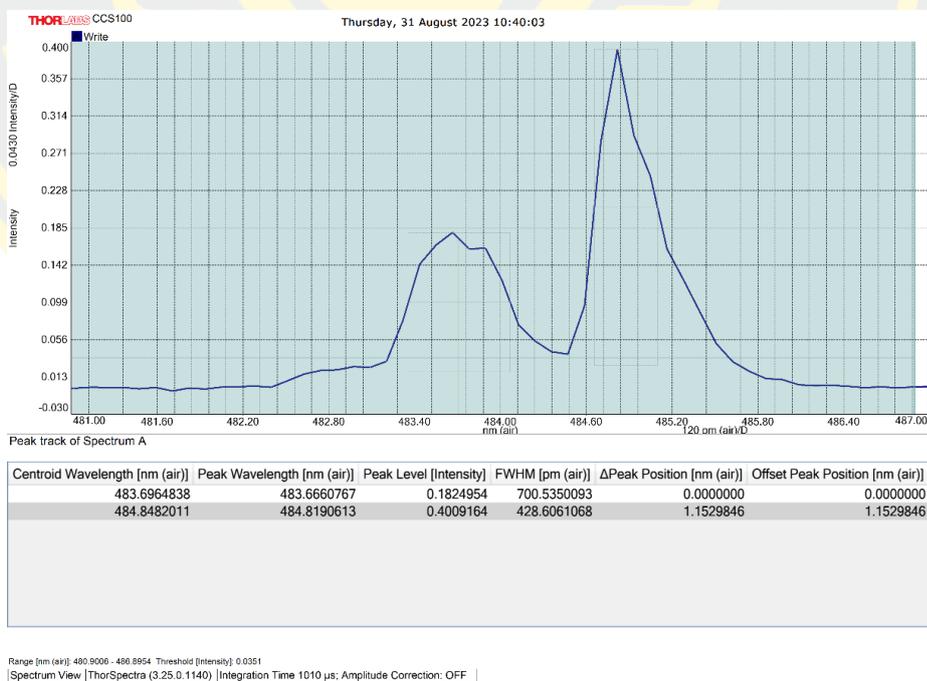
จากรูปที่ 17 เมื่อทำการทดลองจัดระยะระหว่างเลนส์และกระจกและทดลองปรับมุม
 ฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอด โดยเปิดเลเซอร์ที่ให้ความยาวคลื่นประมาณ 483 nm โดยให้ความ
 ต่างสัณฐานสำหรับวงจรคุมกระแสของระบบเลเซอร์ 0.400 V แล้วจัดระยะกระจกกับเลนส์ใน ECDL
 ให้มีระยะ 4.6 mm โดยเลื่อนเข้าหาเลเซอร์ไดโอด จากนั้นนำกระดาษปิดเปิดที่ระยะระหว่างกระจก
 กับเลนส์ในขณะที่ทำการเปลี่ยนระยะกระจกด้วยเปียโซตลอดเวลา พบว่าฟลักที่ดูจากในโปรแกรม
 สเปคโตรมิเตอร์ เมื่อนำกระดาษปิด ฟลักดูนี้ขึ้นกว่าตอนเปิดกระดาษ จากนั้นปรับฟิลเตอร์กรอง
 แสงแบบแทรกสอดจากมุมหน้าตรง 180° พบว่าเมื่อปรับไปที่มุม 176° อุณหภูมิ 23.7°C ฟลักเกิด
 การเปลี่ยนแปลงจาก 1 ฟลัก กลายเป็น 2 ฟลัก ตามภาพด้านล่าง



รูปที่ 19 แสดงภาพที่ได้จากสเปคโตรมิเตอร์ในขณะที่เปิดเลเซอร์ความยาวคลื่นประมาณ 483 nm
 แล้วจัดระยะกระจกกับเลนส์ใน ECDL และปรับฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอด มุม 176°
 อุณหภูมิ 23.7°C (บันทึกรูปครั้งที่ 1)

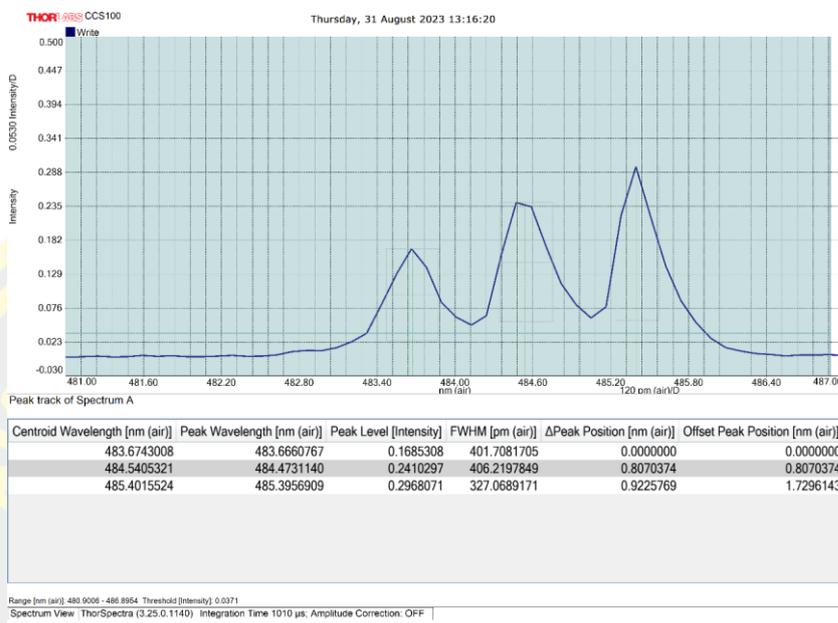


รูปที่ 20 แสดงภาพที่ได้จากสเปคโตรมิเตอร์ในขณะที่เปิดเลเซอร์ความยาวคลื่นประมาณ 483 nm แล้วจัดระยะกระจกกับเลนส์ใน ECDL และปรับฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอด มุม 176° อุณหภูมิ 23.7 °C (บันทึกรูปครั้งที่ 2)

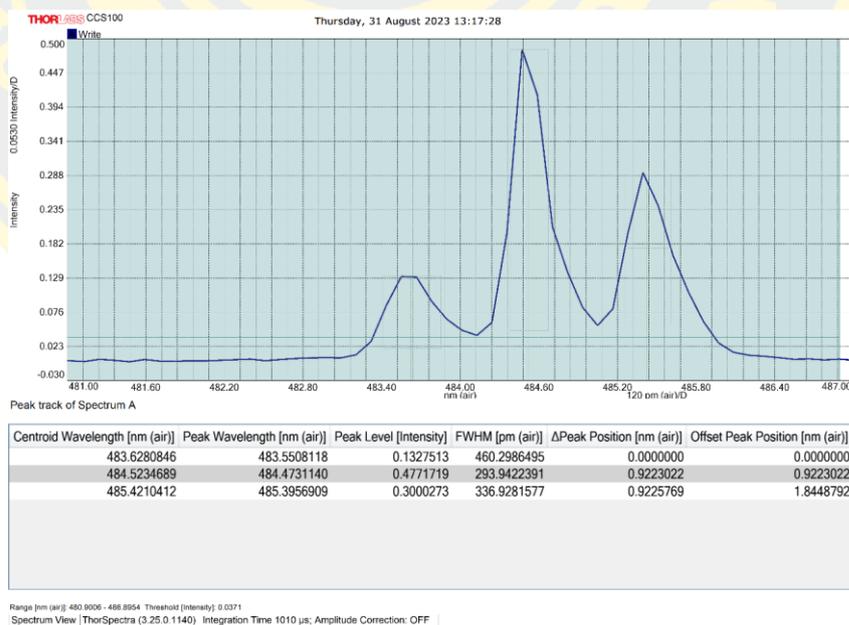


รูปที่ 21 แสดงภาพที่ได้จากสเปคโตรมิเตอร์ ในขณะที่เปิดเลเซอร์ความยาวคลื่นประมาณ 483 nm แล้วจัดระยะกระจกกับเลนส์ใน ECDL และปรับฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอด มุม 176° อุณหภูมิ 23.7 °C (บันทึกรูปครั้งที่ 3)

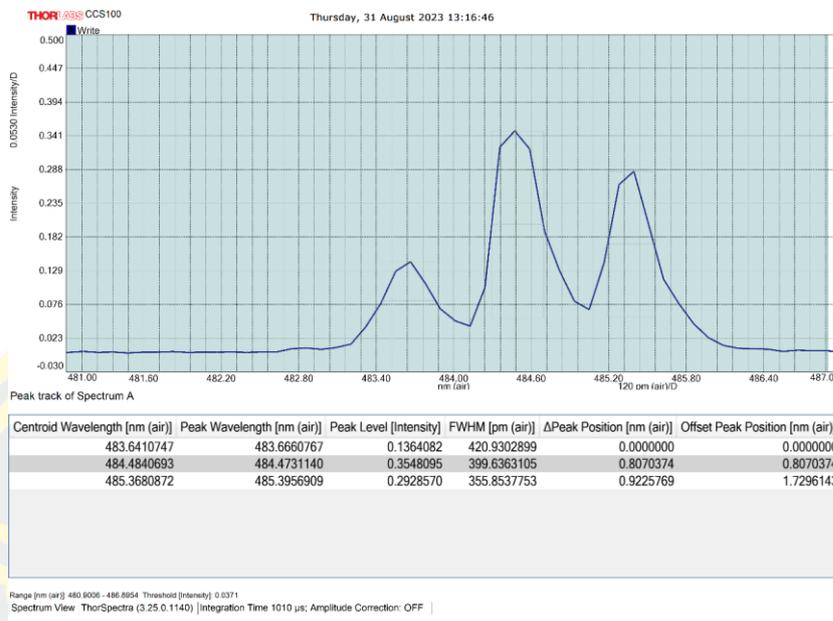
แต่เมื่อปรับมุมของฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอดที่มุม 175° อุณหภูมิ 23.5°C พบว่าฟีกจาก 2 ฟีก กลายเป็น 3 ฟีก ตามภาพด้านล่าง



รูปที่ 22 แสดงภาพที่ได้จากสเปคโตรมิเตอร์ในขณะที่เปิดเลเซอร์ความยาวคลื่นประมาณ 483 nm แล้วจัดระยะกระจกกับเลนส์ใน ECDL และปรับฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอด มุม 175° อุณหภูมิ 23.5°C (บันทึกรูปครั้งที่ 1)



รูปที่ 23 แสดงภาพที่ได้จากสเปคโตรมิเตอร์ในขณะที่เปิดเลเซอร์ความยาวคลื่นประมาณ 483 nm แล้วจัดระยะกระจกกับเลนส์ใน ECDL และปรับฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอด มุม 175° อุณหภูมิ 23.5°C (บันทึกรูปครั้งที่ 2)



รูปที่ 24 แสดงภาพที่ได้จากสเปกโตรมิเตอร์ในขณะที่เปิดเลเซอร์ความยาวคลื่นประมาณ 483 nm แล้วจัดระยะกระจกกับเลนส์ใน ECDL และปรับฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอด มุม 175° อุณหภูมิ 23.5 °C (บันทึกรูปครั้งที่ 3) และเมื่อปรับมุมฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอด 174° อุณหภูมิ 23.9 °C ฟิลกลายเป็นฟิลเดี่ยวตามภาพด้านล่าง



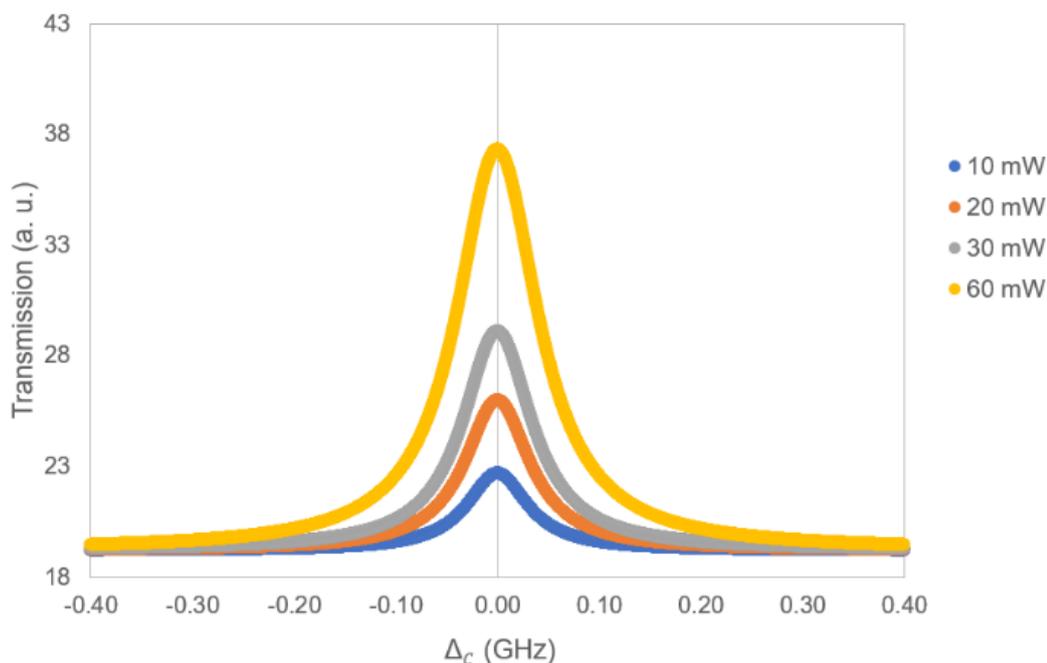
รูปที่ 25 แสดงภาพที่ได้จากสเปกโตรมิเตอร์ในขณะที่เปิดเลเซอร์ความยาวคลื่นประมาณ 483 nm แล้วจัดระยะกระจกกับเลนส์ใน ECDL และปรับฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอด มุม 174° อุณหภูมิ 23.9 °C

ระบบเลเซอร์นี้สามารถผลิตอะตอมรูบิเดียมผ่านกระบวนการการกระตุ้นโฟตอนแบบสองชั้น (two-photon excitation) ซึ่งจำเป็นต้องมี ECDL อีกระบบหนึ่งที่มีความยาวคลื่น 780 nm เพื่อกระตุ้นอะตอมรูบิเดียมจากสถานะพื้นไปยังสถานะ 5P สามารถเรียกการเปลี่ยนแปลงชั้นพลังงานนี้ว่า D2 line [31] ECDL ที่สร้างขึ้นมีความยาวคลื่น 482.8 - 484.0 nm ใช้ในการเปลี่ยนแปลงอันดับที่สองจากสถานะ 5P ไปยังสถานะริดเบิร์ก ที่มีเลขควอนตัมหลัก $n = 26-29$ [32] เทคนิคต่างๆ ในการตรวจหาอะตอมริดเบิร์กได้ถูกนำเสนอขึ้นเนื่องจากพลังงานไอออไนเซชัน (ionization) ของอะตอมริดเบิร์กมีค่าน้อยสามารถตรวจหาสถานะริดเบิร์กวัดได้โดยการใช้การเกิดไอออไนเซชันของสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ [33] หรือ สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์จากการเกิดโฟโตอ็อนไนเซชัน (photoionization) ที่เกิดจากรังสีวัดค่า [34] การเหนี่ยวนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้แสงทะลุผ่านซึ่งเป็นผลการรบกวนทางควอนตัมจากการเปลี่ยนแปลงสถานะควอนตัมที่แตกต่างกัน การตรวจสอบสถานะริดเบิร์ก [31]

สามารถกระทำผ่านการตรวจหาสเปกตรัม EIT ซึ่งตรวจวัดได้โดยการตรวจจับสัญญาณการดูดกลืนของเลเซอร์ 780 nm ที่ถูกส่งผ่าน vapor cell ของอะตอมรูบิเดียม ในการคำนวณโปรไฟล์ EIT จากสเปกโทรสโกปีการดูดกลืนแสงของลำแสงเลเซอร์ สมการออปติคัล โบลซ (Optical Bloch equations) และสมการแมกซ์เวลล์-ชโรดิงเงอร์ (Maxwell-Schrödinger equation) ได้ถูกนำมาใช้ [35] ถ้ากำหนดให้ไม่มีความถี่ $\Delta_p = 0$ detuning สำหรับเลเซอร์ตรวจวัด (probe laser) ซึ่งมีความยาวคลื่น 780 nm ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้ม I ของสัญญาณ EIT และความถี่ detuning ของแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 483 nm สามารถถูกเขียนได้เป็น

$$I(\Delta_C) = \exp\left(\frac{-\alpha((\Gamma^2(4\gamma^2+4\Delta_C^2)+2\gamma\Gamma\Omega_C^2))}{(2\gamma\Gamma+\Omega_C^2-4\Delta_C\Delta_p)^2+(4\Delta_p\gamma+2\Gamma\Delta_C)^2}\right) \quad (8)$$

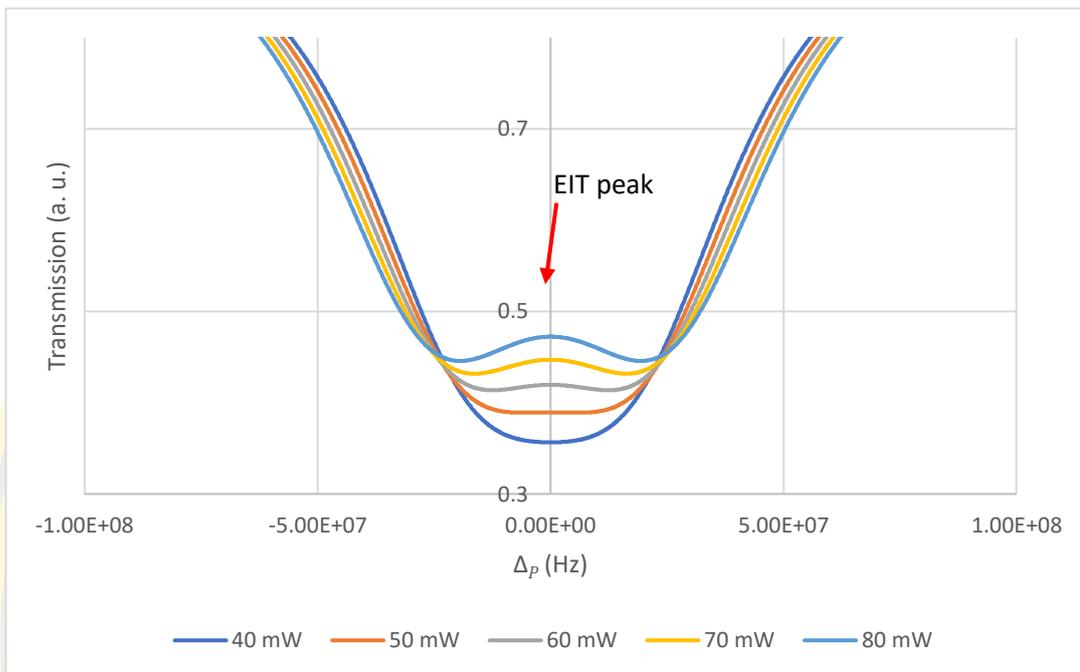
โดยที่ Γ , γ และ Ω_C แสดง spectral linewidth ของสถานะ 5P อัตราการสลายตัวระหว่างสถานะริดเบิร์กและสถานะพื้น (decay rate) และความถี่ Rabi ของการเปลี่ยนสถานะ 5P เป็นสถานะริดเบิร์ก ตามลำดับ ค่าคงที่ α จาก [29] มีค่าเท่ากับ 1.65 ผลของปรากฏการณ์ดอปเลอร์ (Doppler effect) ไม่ได้นำมาพิจารณาในสูตรและค่าคงที่ต่างๆ ใช้ข้อมูลจากงานวิจัยที่เป็นอะตอมริดเบิร์กของรูบิเดียม 87 เนื่องจากไม่มีข้อมูลของปริมาณต่างๆ สำหรับ อะตอมริดเบิร์กของรูบิเดียม 85 โดยตรง



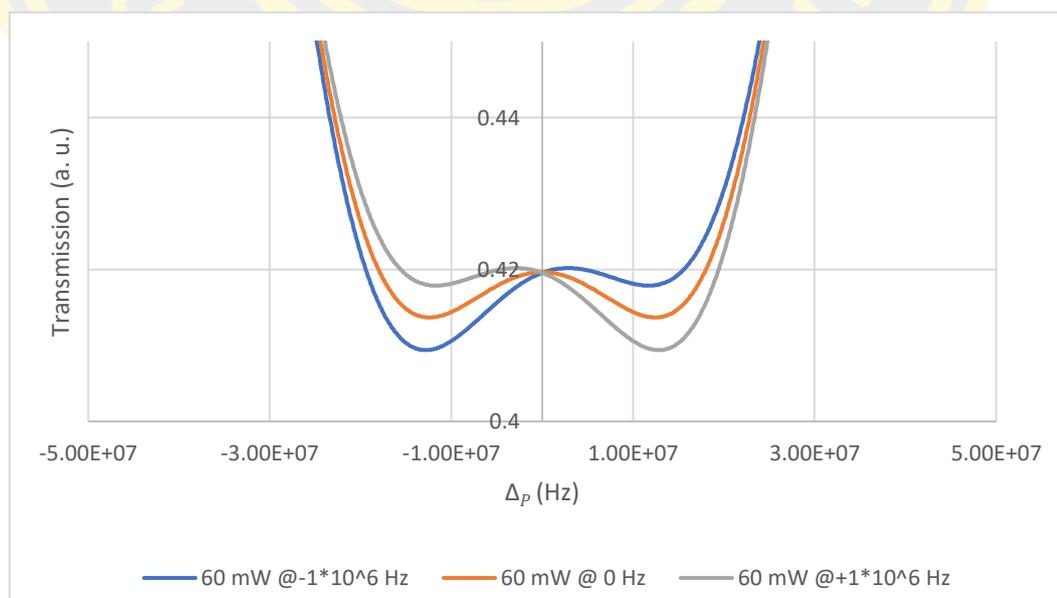
รูปที่ 26 สเปกตรัม EIT ของสถานะริดเบิร์ตที่มี $n = 27$ สำหรับอะตอมรูบิเดียม

รูปที่ 26 แสดงความสูงของสัญญาณ EIT คาดหวังที่วัดได้จากเลเซอร์ตรวจวัดเมื่อเทียบกับความถี่ detuning ของเลเซอร์คัปปลิง (coupling laser) ซึ่งมีความยาวคลื่นประมาณ 483 nm สำหรับค่ากำลังเชิงแสงที่ 10, 20, 30 และ 60 mW และสถานะริดเบิร์ตมีเลขควอนตัมหลัก $n = 27$ โดยพบว่าเมื่อกำลังเชิงแสงเลเซอร์คัปปลิงเพิ่มขึ้น จุดสูงสุดของสัญญาณ EIT ก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน

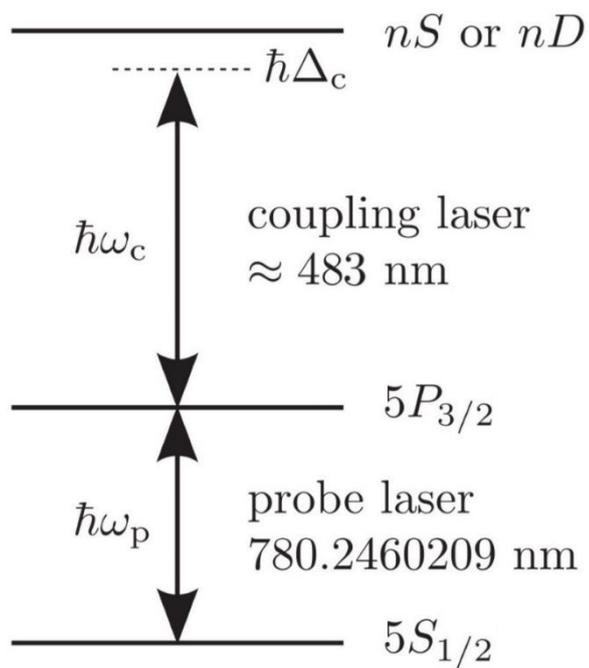
ผลจากการศึกษาทางทฤษฎีเกี่ยวกับการประมาณสัญญาณ peak EIT ภายใต้หลุมการดูดกลืนของอะตอมริดเบิร์ต ($27D_{5/2}$) ของรูบิเดียมที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันของความถี่ detuning ของเลเซอร์ตรวจวัด ที่กำลังเชิงแสงต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 27 และความถี่ detuning ของเลเซอร์คัปปลิงต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 28 โดยใช้ค่าของตัวแปรต่าง ๆ จาก [32] และ [35] พบว่า กำลังเชิงแสงของแสงเลเซอร์คัปปลิงที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้สามารถความสูงของสัญญาณ peak EIT มีค่าสูงขึ้น และเมื่อเลเซอร์คัปปลิงที่มีความถี่ detuning มีค่าเป็น -1 MHz และ $+1$ MHz จะพบว่า ตำแหน่งจุดสูงสุดของสัญญาณ EIT peak จะเคลื่อนจากแนวตรงกลางไปยังทางขวาและทางซ้ายตามลำดับ



รูปที่ 27 แสดง peak EIT ภายใต้หตุการดูดกลืน โดยที่ กำลังเชิงแสงต่าง ๆ กำหนดให้ ความถี่ detuning ของเลเซอร์ค้ปปลิง = 0 Hz



รูปที่ 28 แสดง peak EIT ภายใต้หตุการดูดกลืน โดยที่ ความถี่ detuning ของเลเซอร์ค้ปปลิง ต่าง ๆ



รูปที่ 29 แผนภาพแสดง Energy-level ของ Rb [32]

สำหรับอะตอมริดเบิร์ตของรูบิเดียม 87 [32] จำนวนเลขควอนตัมริดเบิร์ตที่ได้ดังตารางด้านล่าง

1. ที่ $nS_{1/2}$

n	$\omega_c(2\pi THz)$	δ	λ	$\Delta\omega_c(2\pi MHz)$
19	612.7288381(8)	3.1318908(5)	489.2743	-0.8
20	614.2321542(8)	3.1318083(6)	488.0768	0.5
21	615.4901687(8)	3.1317405(7)	487.0792	-0.2
22	616.5534925(8)	3.1316819(8)	486.2392	0.7
23	617.4603214(8)	3.1316328(10)	485.5251	0.5
24	618.2399264(8)	3.1315896(11)	484.9128	1
25	618.9150382(8)	3.1315541(13)	484.3839	0.2
26	619.5035327(8)	3.131521(2)	483.9237	0.7
27	620.0196148(8)	3.131496(2)	483.5209	-1
28	620.4746999(8)	3.131469(2)	483.1663	0.3
29	620.8780318(8)	3.131448(2)	482.8524	0
30	621.2371711(8)	3.131430(2)	482.5733	-0.6
31	621.5583473(8)	3.131430(2)	482.3239	-0.4
32	621.8467280(8)	3.131412(3)	482.1002	0.2
33	622.1066304(8)	3.131395(3)	481.8988	0.3
34	622.3416850(8)	3.131380(3)	481.7168	0.8
35	622.5549595(8)	3.131365(4)	481.5518	-0.2
36	622.7490663(8)	3.131342(5)	481.4017	-0.1
37	622.9262334(8)	3.131330(5)	481.2648	-1
38	623.0883784(8)	3.131319(6)	481.1395	-0.4
39	623.2371515(8)	3.131301(6)	481.0247	0.1
40	623.3739846(8)	3.131314	480.9191	1.4

ตารางที่ 1 การคำนวณเลขควอนตัมริดเบิร์ตที่ชั้น $nS_{1/2}$ [32]

2. ที่ $nD_{3/2}$

n	$\omega_c(2\pi \text{ THz})$	δ	λ	$\Delta\omega_c(2\pi \text{ MHz})$
19	615.2383571(8)	1.3461520(7)	487.2786	-0.1
20	616.3395780(8)	1.3463543(8)	486.4079	0.3
24	619.3833361(8)	1.3469144(14)	484.0176	0.3
26	620.3812369(8)	1.347100(2)	483.2391	-0.4
27	620.7949991(8)	1.347174(2)	482.9170	0.2
28	621.1630743(8)	1.347241(2)	482.6308	0.5

ตารางที่ 2 การคำนวณเลขควอนตัมริดเบิร์กที่ชั้น $nD_{3/2}$ [32]3. ที่ $nD_{5/2}$

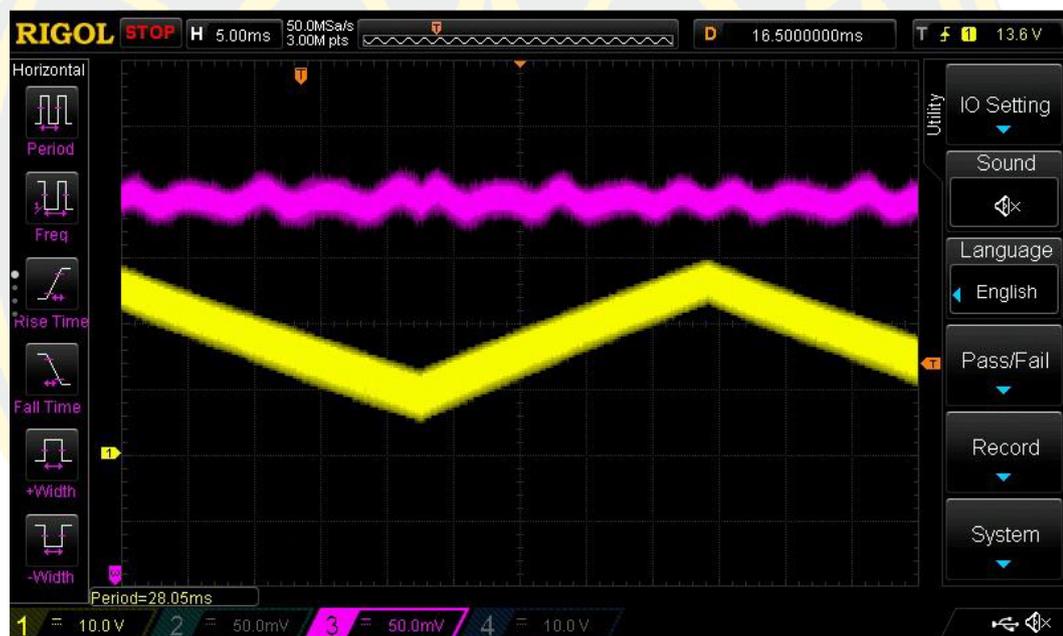
n	$\omega_c(2\pi \text{ THz})$	δ	λ	$\Delta\omega_c(2\pi \text{ MHz})$
19	615.2402660(8)	1.3445555(7)	487.2786	-0.1
20	616.3411990(8)	1.3447550(8)	486.4079	0.3
26	620.3819464(8)	1.345484(2)	483.2385	0.5
27	620.7956283(8)	1.345560(2)	482.9165	-0.2
28	621.1636344(8)	1.345629(2)	482.6304	-1.1

ตารางที่ 3 การคำนวณเลขควอนตัมริดเบิร์กที่ชั้น $nD_{5/2}$ [32]

กรณีอะตอมริดเบิร์กของรูบิเดียม 85 [36] สามารถคำนวณหาความยาวคลื่นที่ใช้กระตุ้นสร้างเป็นอะตอมริดเบิร์กชั้นที่สองที่ $n^2S_{1/2}$ เมื่อ $n=25, 26, 27$ และ 28 ได้เป็น 484.382, 483.922, 483.519 และ 483.164 nm ตามลำดับ

4.2 การตรวจสอบความสามารถเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 483 nm โดยการเปิดปิดเลเซอร์

จากผลการทดลองข้างต้นฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอด (FB480-10) ใน ECDL มีผลต่อการจัดระยะระหว่างเลนส์กับกระจก ซึ่งการหมุนของฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอดคือการเลือกความยาวคลื่นที่ต้องการ ต่อมานำฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอดแบบหมุนในรูปที่ 17 ออกเพราะ spectra peak ใน โปรแกรม Thorspectra ตอบสนองต่อการปิดเปิดกระดาศได้ไม่ดี ซึ่งจากการทดลองพบว่ายิ่งเลื่อนระยะระหว่างกระจกกับเลนส์เข้าใกล้ไดโอดเลเซอร์มากเท่าไร ยิ่งตอบสนองต่อการปิดเปิดกระดาศได้ดี จึงนำฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอดออก แล้วทำการจัดระยะระหว่างเลนส์และกระจก โดยจะทำการจัดอุปกรณ์ตามภาพที่ 17 เปิดเลเซอร์ และบันทึกภาพที่ได้จากออสซิลโลสโคป



รูปที่ 30 ภาพแสดงสัญญาณขณะเปิดเลเซอร์

จากรูปที่ 30 ได้ทำการทดลองเปิดเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 483 nm เพื่อตรวจสอบระยะควาดี โดยการควบคุมระยะกระจกควาดีทำได้โดยการปรับความถี่หรือความยาวคลื่นโดยใช้การจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปที่เพียโซอิเล็กทริกที่ติดอยู่กับกระจกระนาบ ดังรูปที่ 17 ทำให้กระจกระนาบขยับเข้าและออก ซึ่งเป็นการสแกนระยะกระจกควาดีเพื่อปรับความถี่หรือความยาวคลื่นให้เหมาะสม ซึ่งแสดงลักษณะของสัญญาณดังสัญญาณเส้นสีเหลืองในรูปที่ 30 และเมื่อแสงเลเซอร์มีความยาวคลื่นที่สั้นพ้องกับธาตุรูปเดิมจะเกิดการดูดกลืนแสง ซึ่งแสดงลักษณะของสัญญาณดังสัญญาณเส้นสีชมพูในรูปที่ 30

จากนั้นนำกระดาษมาปิดระหว่างอุปกรณ์เชิงแสงแบบตาแมวกับกระจกเงาที่อยู่นิ ECDL



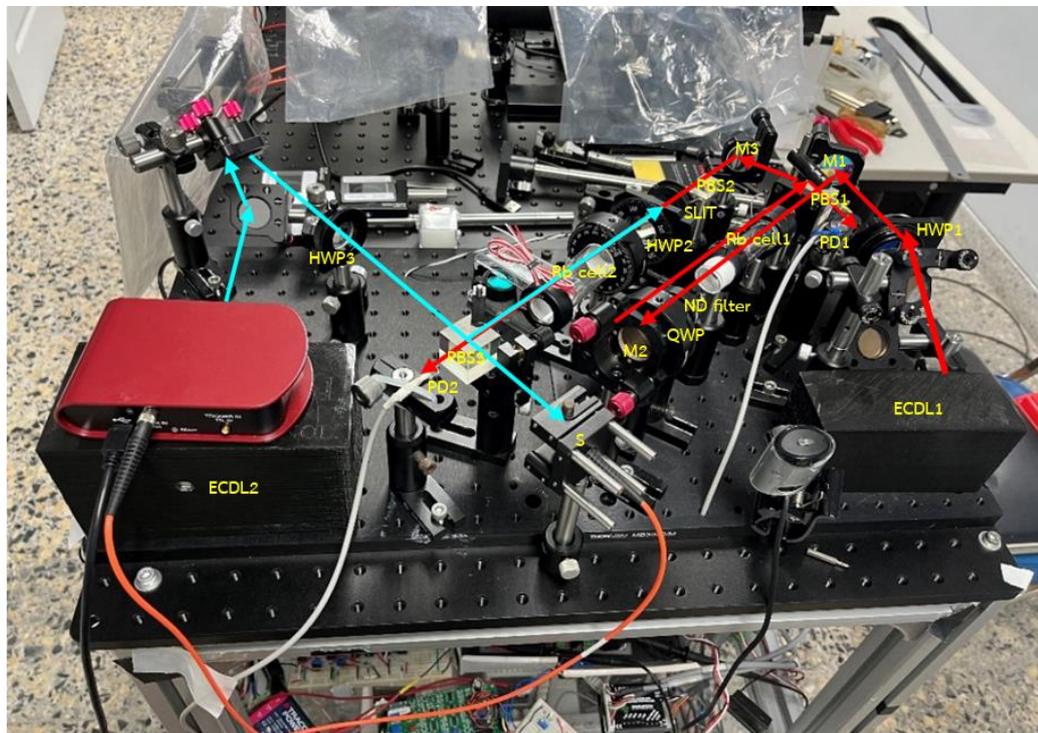
รูปที่ 31 ภาพแสดงสัญญาณขณะนำกระดาษมาปิดที่ระหว่างอุปกรณ์เชิงแสงแบบตาแมวกับกระจกเงาที่อยู่นิ ECDL

จากรูปที่ 31 จะเห็นว่าเมื่อนำกระดาษมาปิด สัญญาณดูเรียบขึ้น แสดงให้เห็นว่าระยะควิตี้ทำงานได้ดี ซึ่งวิธีนี้เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมของระยะควิตี้ภายในเลเซอร์ ECDL ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 483 nm

4.3 การจัดอุปกรณ์ของระบบการดูดกลืนพลังงานของธาตุรูบิเดียม (Absorption spectroscopy)

การจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างระบบเลเซอร์และระบบเชิงแสงสำหรับการสร้างอะตอมรีดเบิร์กของธาตุรูบิเดียม ดังรูปที่ 36 การทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการตรวจสอบการดูดกลืนสเปกตรัมของธาตุรูบิเดียม (Saturated absorption spectroscopy) ดังภาพที่ 36 (เส้นสีแดง) โดยจะยิงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 780 nm ซึ่งมีแสงโพลาไรเซชันแนวตั้งผ่าน HWP1 สะท้อนเข้ากระจก M1 แล้วผ่าน PBS1 โดยแสงโพลาไรเซชันแนวตั้งจะสะท้อนไปที่กระจก M3 ส่วนแสงโพลาไรเซชันแนวราบจะทะลุเข้าไปใน Rb cell1 จากนั้นแสงจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงในช่วงความถี่ สั้นพียงน้อยลง แล้วแสงเลเซอร์จะผ่าน ND filter เพื่อทำให้แสงจางลง จากนั้นแสงเลเซอร์จะผ่าน QWP แล้วเปลี่ยนโพลาไรเซชันเชิงเส้นของแสงเลเซอร์เป็น โพลาไรเซชันแบบวงกลมและสะท้อนกระจก M2 กลับมาแนวทางเดิมเมื่อแสงเลเซอร์ทะลุผ่าน QWP โดยแสงจะเปลี่ยนจากโพลาไรเซชันวงกลมเป็นเชิงเส้นอีกครั้ง แต่เปลี่ยนจากแสงที่มีโพลาไรเซชันแนวราบ

ไปเป็นแสงที่มีโพลาไรเซชันแนวตั้งเข้าสู่ Rb cell1 อีกครั้งทำให้เกิดยอดพีกเล็กๆ ซึ่งเกิดจากการที่อะตอมของธาตุรูบิเดียมอยู่ในชั้นสถานะถูกกระตุ้น ไม่สามารถถูกกระตุ้นซ้ำจากแสงความยาวคลื่นเดิมได้ จากนั้นแสงจะสะท้อนไปที่ PD1 เพื่อรับสัญญาณและดูการ absorption spectroscopy ของธาตุรูบิเดียมในออสซิลโลสโคป โดยแสงโพลาไรเซชันแนวตั้งที่สะท้อนไปที่กระจก M3 นั้นจะผ่าน SLIT เพื่อให้แสงทะลุผ่านมาที่ HWP2 น้อย จากนั้นแสงจะทะลุผ่าน HWP2 เข้าสู่ PBS2 โดยแสงโพลาไรซ์แนวตั้งจะสะท้อนออกไปส่วนแสงโพลาไรเซชันแนวราบจะทะลุผ่าน PBS2 มายัง Filter แล้วเข้าสู่ Rb cell2 ต่อมาส่วนที่สองเป็นการตรวจสอบการเกิดอะตอมริดเบิร์ก โดยทำการทดลองครึ่งรูปที่ 36 (เส้นสีฟ้า) โดยจะยิงแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 483 nm จากนั้นผ่าน HWP3 ผ่าน PBS3 จากนั้นแสงจะสะท้อนเข้าไปที่ Rb cell2 เป็นโพลาไรเซชันแนวตั้ง ส่วนแสงโพลาไรเซชันแนวราบจะทะลุผ่าน PBS3 เข้าไปที่สเปคโตรมิเตอร์เพื่อดูความยาวคลื่นของเลเซอร์ ส่วนแสงโพลาไรเซชันแนวตั้งจะสะท้อนเข้าไปที่ Rb cell2 ในทิศทางตรงกันข้ามกับเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 780 nm โดยเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 780 nm จะกระตุ้นอิเล็กตรอนในอะตอมรูบิเดียมจากชั้นสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นและเมื่อเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 483 nm เข้าไปในทิศทางตรงกันข้ามอิเล็กตรอนในอะตอมรูบิเดียมจะถูกกระตุ้นจากชั้นสถานะกระตุ้นไปยังชั้นสถานะริดเบิร์ก ทำให้อิเล็กตรอนบางส่วนในชั้นสถานะกระตุ้นไปอยู่ในชั้นสถานะริดเบิร์ก ทำให้อะตอมดูดกลืนแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 780 nm ได้น้อยลง แสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 780 nm จึงทะลุผ่านมากขึ้นในช่วงความถี่เดียวกับเลเซอร์ที่ความยาวคลื่นประมาณ 483 nm ทำให้เกิดเป็นสัญญาณพีกขึ้นมาในหลุมการดูดกลืน ซึ่งลักษณะนี้เรียกว่าการเกิด EIT ซึ่งเป็นการตรวจการเกิดริดเบิร์ก ซึ่งจะดูสัญญาณการเกิดจาก PD2



รูปที่ 32 ภาพชุดอุปกรณ์การสร้างระบบเลเซอร์และระบบเชิงแสงสำหรับการสร้างอะตอมริดเบิร์กของธาตุรูบิเดียมเส้นสีฟ้าแสดงค่าของแสงเลเซอร์ 780 nm และเส้นสีชมพูแสดงค่าของแสงเลเซอร์ประมาณ 483 nm

ผลที่ได้จากออสซิลโลสโคปจากการทดลองในรูป 32

ผลครั้งแรกที่เหมือนจะเจออะตอมริดเบิร์ก เมื่อปรับความถี่ให้ตรงกับความถี่ที่ควรเกิดอะตอมริดเบิร์ก โดยสัญญาณสีฟ้าในรูปที่ 33 คือการทดลองในส่วนแรกในรูปที่ 32 ซึ่งเป็นการทดลองเพื่อตรวจสอบการดูดกลืนสเปกตรัมของธาตุรูบิเดียมและสัญญาณสีชมพูในรูป 33 คือการทดลองในส่วนที่สองในรูปที่ 32 ซึ่งเป็นการตรวจสอบการเกิดอะตอมริดเบิร์กซึ่งจากผลการทดลองในรูปที่ 32 พบว่า รูปที่ 33 ในหลุมของสัญญาณเส้นสีชมพูเส้นของสัญญาณยกสูงขึ้นมาแต่สัญญาณไม่ค่อยนิ่งและสั้น ตามปกติภายในหลุมควรจะเป็นหลุมที่เรียบ แต่ในการทดลองสัญญาณของเส้นสีชมพูมีการยกตัวสูงขึ้นมา จึงมีการคาดเดาโอกาสที่จะสามารถเกิดอะตอมริดเบิร์กได้ ส่วนรูปที่ 34 และ 35 นั้นทำการปรับกระแสที่ควรเกิดอะตอมริดเบิร์กที่ค่าอื่นๆ ซึ่งมีลักษณะผลการทดลองเหมือนกับรูปที่ 33 แต่ลักษณะความสูงของสัญญาณที่ยกตัวต่างกัน



รูปที่ 33 ภาพแสดงสัญญาณเมื่อความยาวคลื่นของระบบเลเซอร์โพรงภายนอกเท่ากับ 483.92 nm อุณหภูมิของเลเซอร์ตรวจวัดเท่ากับ 18.3 °C และมีความยาวคลื่นเท่ากับ 780.24 nm



รูปที่ 34 ภาพแสดงสัญญาณเมื่อความยาวคลื่นของระบบเลเซอร์โพรงภายนอกเท่ากับ 483.51 nm อุณหภูมิของเลเซอร์ตรวจวัดเท่ากับ 18.3 °C และมีความยาวคลื่นเท่ากับ 780.24 nm



รูปที่ 35 ภาพแสดงสัญญาณเมื่อความยาวคลื่นของระบบเลเซอร์โพรงภายนอกเท่ากับ 483.15 nm อุณหภูมิของเลเซอร์ตรวจวัดเท่ากับ 18.3 °C และมีความยาวคลื่นเท่ากับ 780.24 nm

ผลการทดลองครั้งต่อมามีพีดขึ้นขนาดเล็กน้อยเมื่อปรับความถี่ให้ตรงกับความถี่ที่ควรจะเกิดอะตอมรีดเบิร์ก



รูปที่ 36 ภาพแสดงสัญญาณเมื่อความยาวคลื่นของระบบเลเซอร์โพรงภายนอกเท่ากับ 483.92 nm อุณหภูมิของเลเซอร์ตรวจวัดเท่ากับ 18.5 °C และมีความยาวคลื่นเท่ากับ 780.24 nm



รูปที่ 37 ภาพแสดงสัญญาณเมื่อความยาวคลื่นของระบบเลเซอร์โพรงภายนอกเท่ากับ 483.55 nm อุณหภูมิของเลเซอร์ตรวจวัดเท่ากับ 18.5 °C และมีความยาวคลื่นเท่ากับ 780.24 nm

ผลการทดลองครั้งต่อมา เมื่อปรับความถี่ให้ตรงกับความถี่ที่ควรจะเป็นจะเกิดอะตอมริคเบิร์ก พบว่าฟลักซ์ขึ้นมาแค่เล็กน้อย



รูปที่ 38 ภาพแสดงสัญญาณเมื่อความยาวคลื่นของระบบเลเซอร์โพรงภายนอกเท่ากับ 483.92 nm อุณหภูมิของเลเซอร์ตรวจวัดเท่ากับ 18.5 °C และมีความยาวคลื่นเท่ากับ 780.24 nm



รูปที่ 39 ภาพแสดงสัญญาณเมื่อความยาวคลื่นของระบบเลเซอร์โพรงภายนอกเท่ากับ 483.92 nm อุณหภูมิของเลเซอร์ตรวจวัดเท่ากับ 18.5 °C และมีความยาวคลื่นเท่ากับ 780.24 nm

ต่อมาทำการปรับความถี่ไม่ให้ตรงกับความถี่ที่ควรที่จะเกิดอะตอมริดเบิร์ก เพื่อดูว่ามีฟิสิกหรือสัญญาณขึ้นมาในหลุมของสัญญาณสี่ชมพูใหม่ ซึ่งจากการทดลองพบว่าในหลุมของสัญญาณสี่ชมพู ในรูปที่ 44-46 ค่อนข้างเรียบกว่า รูปที่ 40-43 ที่ปรับความถี่ให้ตรงกับความถี่ที่ควรที่จะเกิดอะตอมริดเบิร์ก



รูปที่ 40 ภาพแสดงสัญญาณเมื่อความยาวคลื่นของระบบเลเซอร์โพรงภายนอกเท่ากับ 483.75 nm อุณหภูมิของเลเซอร์ตรวจวัดเท่ากับ 18.5 °C และมีความยาวคลื่นเท่ากับ 780.24 nm



รูปที่ 41 ภาพแสดงสัญญาณเมื่อความยาวคลื่นของระบบเลเซอร์โพรงภายนอกเท่ากับ 483.62 nm อุณหภูมิของเลเซอร์ตรวจวัดเท่ากับ 18.6 °C และมีความยาวคลื่นเท่ากับ 780.24 nm

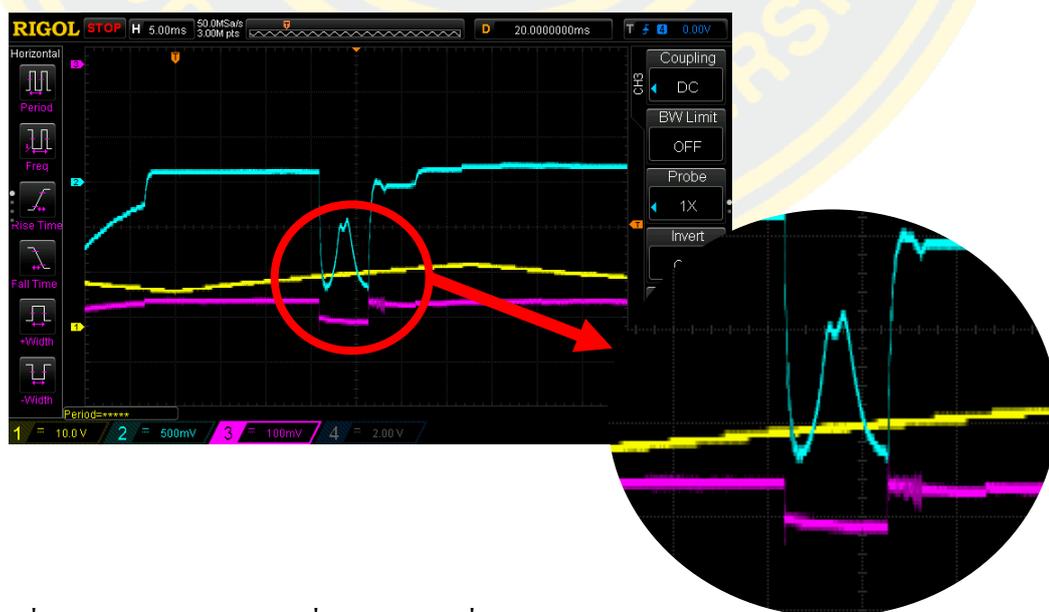


รูปที่ 42 ภาพแสดงสัญญาณเมื่อความยาวคลื่นของระบบเลเซอร์โพรงภายนอกเท่ากับ 483.7 nm อุณหภูมิของเลเซอร์ตรวจวัดเท่ากับ 18.5 °C และมีความยาวคลื่นเท่ากับ 780.24 nm

ต่อมาทำการศึกษาผลของสัญญาณ EIT ต่ออุณหภูมิ
ที่ 0 V พบว่าอุณหภูมิของหลอด Rb cell ที่วัดได้ คือ 21.2 °C

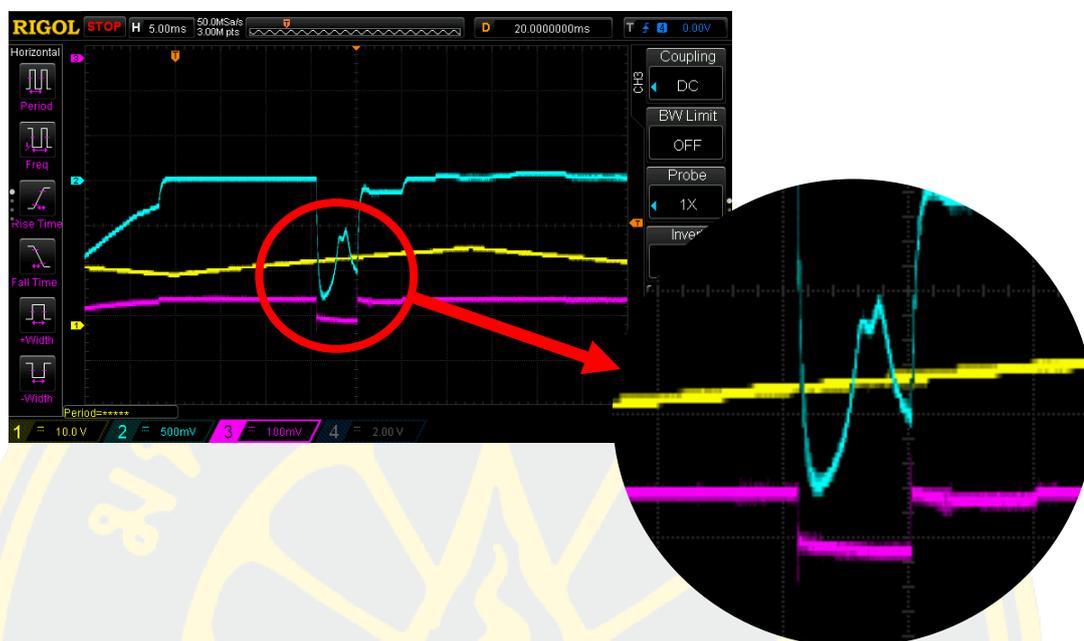


รูปที่ 43 ภาพแสดงสัญญาณเมื่อความยาวคลื่นของระบบเลเซอร์ โฟรงภายนอกเท่ากับ 483.92 nm
อุณหภูมิของเลเซอร์ตรวจวัดเท่ากับ 18.5 °C และมีความยาวคลื่นเท่ากับ 780.24 nm
ที่ 2 V พบว่าอุณหภูมิของหลอด Rb cell ที่วัดได้ คือ 21.6 °C



รูปที่ 44 ภาพแสดงสัญญาณเมื่อความยาวคลื่นของระบบเลเซอร์ โฟรงภายนอกเท่ากับ 483.92 nm
อุณหภูมิของเลเซอร์ตรวจวัดเท่ากับ 18.5 °C และมีความยาวคลื่นเท่ากับ 780.24 nm

ที่ 4 V พบว่าอุณหภูมิของหลอด Rb cell ที่วัดได้ คือ 21.8 °C



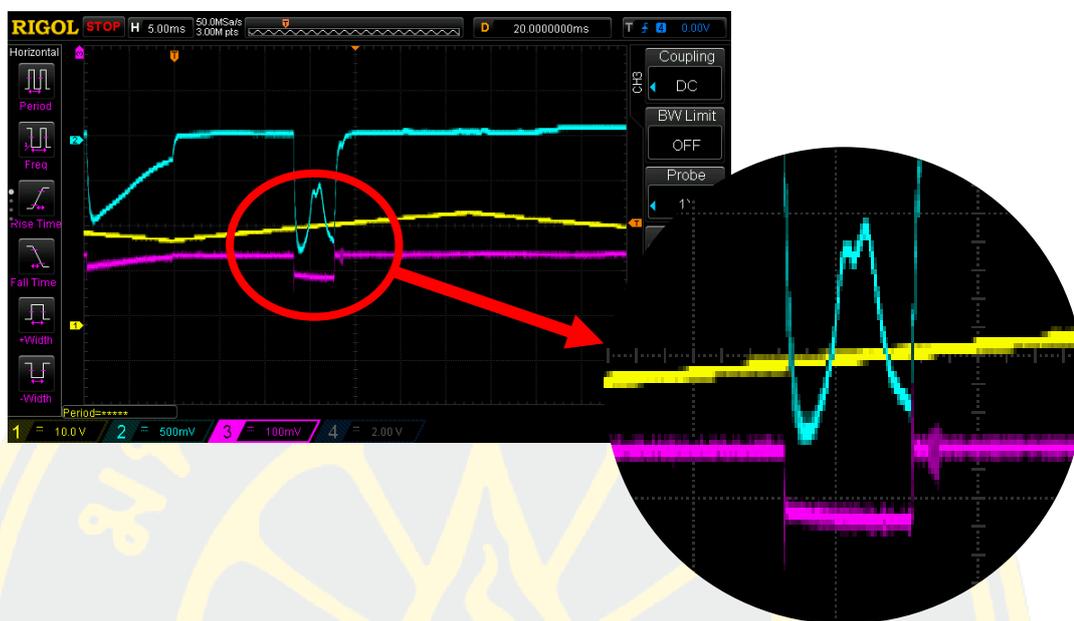
รูปที่ 45 ภาพแสดงสัญญาณเมื่อความยาวคลื่นของระบบเลเซอร์ โฟรงภายนอกเท่ากับ 483.92 nm
อุณหภูมิของเลเซอร์ตรวจวัดเท่ากับ 18.5 °C และมีความยาวคลื่นเท่ากับ 780.24 nm

ที่ 6 V พบว่าอุณหภูมิของหลอด Rb cell ที่วัดได้ คือ 22.3 °C



รูปที่ 46 ภาพแสดงสัญญาณเมื่อความยาวคลื่นของระบบเลเซอร์ โฟรงภายนอกเท่ากับ 483.92 nm
อุณหภูมิของเลเซอร์ตรวจวัดเท่ากับ 18.5 °C และมีความยาวคลื่นเท่ากับ 780.24 nm

ที่ 8 V พบว่าอุณหภูมิของหลอด Rb cell ที่วัดได้ คือ 22.7°C



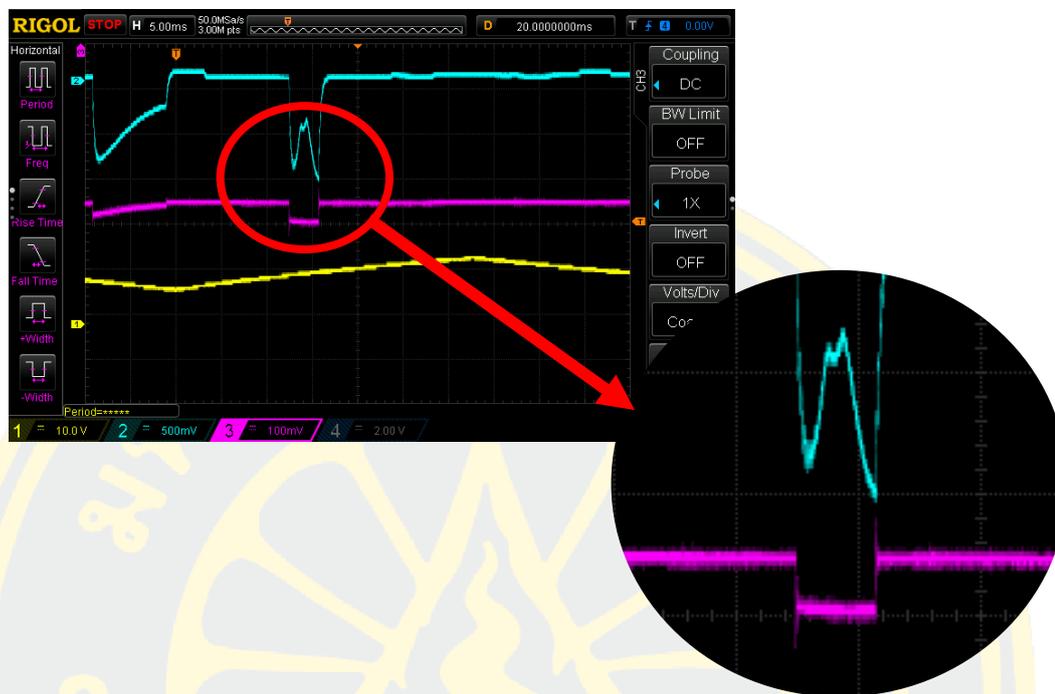
รูปที่ 47 ภาพแสดงสัญญาณเมื่อความยาวคลื่นของระบบเลเซอร์โพรงภายนอกเท่ากับ 483.92 nm
อุณหภูมิของเลเซอร์ตรวจวัดเท่ากับ 18.5°C และมีความยาวคลื่นเท่ากับ 780.24 nm

ที่ 10 V พบว่าอุณหภูมิของหลอด Rb cell ที่วัดได้ คือ 23.2°C



รูปที่ 48 ภาพแสดงสัญญาณเมื่อความยาวคลื่นของระบบเลเซอร์โพรงภายนอกเท่ากับ 483.92 nm
อุณหภูมิของเลเซอร์ตรวจวัดเท่ากับ 18.5°C และมีความยาวคลื่นเท่ากับ 780.24 nm

ที่ 12 V พบว่าอุณหภูมิของหลอด Rb cell ที่วัดได้ คือ $23.7\text{ }^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 49 ภาพแสดงสัญญาณเมื่อความยาวคลื่นของระบบเลเซอร์โฟรงภายนอกเท่ากับ 483.92 nm อุณหภูมิของเลเซอร์ตรวจวัดเท่ากับ $18.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ และมีความยาวคลื่นเท่ากับ 780.24 nm

ที่ 14 V พบว่าอุณหภูมิของหลอด Rb cell ที่วัดได้ คือ $25.6\text{ }^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 50 ภาพแสดงสัญญาณเมื่อความยาวคลื่นของระบบเลเซอร์โฟรงภายนอกเท่ากับ 483.92 nm อุณหภูมิของเลเซอร์ตรวจวัดเท่ากับ $18.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ และมีความยาวคลื่นเท่ากับ 780.24 nm

ที่ 16 V พบว่าอุณหภูมิของหลอด Rb cell ที่วัดได้ คือ $27.0\text{ }^{\circ}\text{C}$



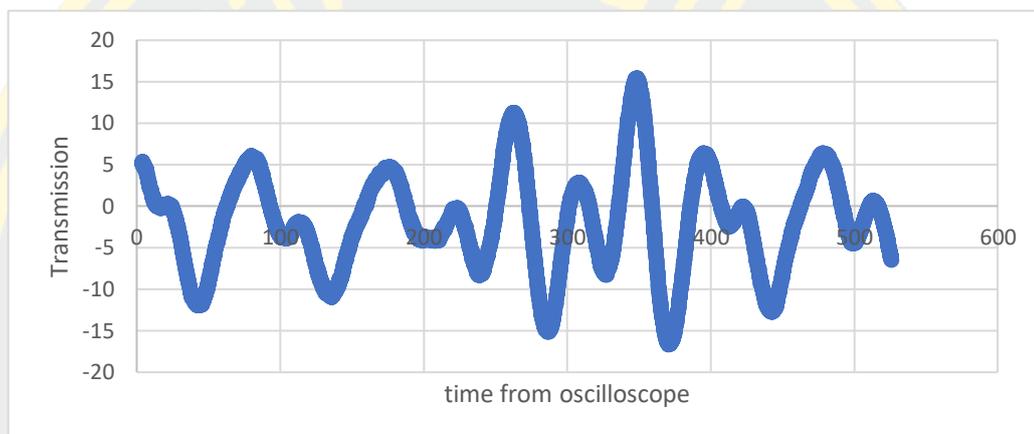
รูปที่ 51 ภาพแสดงสัญญาณเมื่อความยาวคลื่นของระบบเลเซอร์โพรงภายนอกเท่ากับ 483.92 nm อุณหภูมิของเลเซอร์ตรวจวัดเท่ากับ $18.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ และมีความยาวคลื่นเท่ากับ 780.24 nm

ที่ 18 V พบว่าอุณหภูมิของหลอด Rb cell ที่วัดได้ คือ $28.5\text{ }^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 52 ภาพแสดงสัญญาณเมื่อความยาวคลื่นของระบบเลเซอร์โพรงภายนอกเท่ากับ 483.92 nm อุณหภูมิของเลเซอร์ตรวจวัดเท่ากับ $18.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ และมีความยาวคลื่นเท่ากับ 780.24 nm

เมื่อทำการทดลองการเกิด absorption spectroscopy ของหลอดอะตอม Xenon สังเกตพบ spectrum การดูดกลืนที่มีลักษณะเปลี่ยนแปลงที่ความยาวคลื่นประมาณ 484 nm ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงสถานะ Xenon I ที่สถานะ $5p^5(^2p_{3/2})6s, J = 1$ ไปยังสถานะ $5p^5(^2p_{3/2})7p, J = 2$ และ II (Xenon⁺) สถานะ $5p^4(^3p_2)6s, J = 5/2$ ไปยังสถานะ $5p^4(^3p_2)6p, J = 7/2$ จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ การเปลี่ยนแปลงสถานะทั้งสองจะมีแนวโน้มการเกิดมากที่สุด [37] นั่นคือ เป็นสัญญาณการเกิด Xenon ที่สถานะกระตุ้นพิเศษ

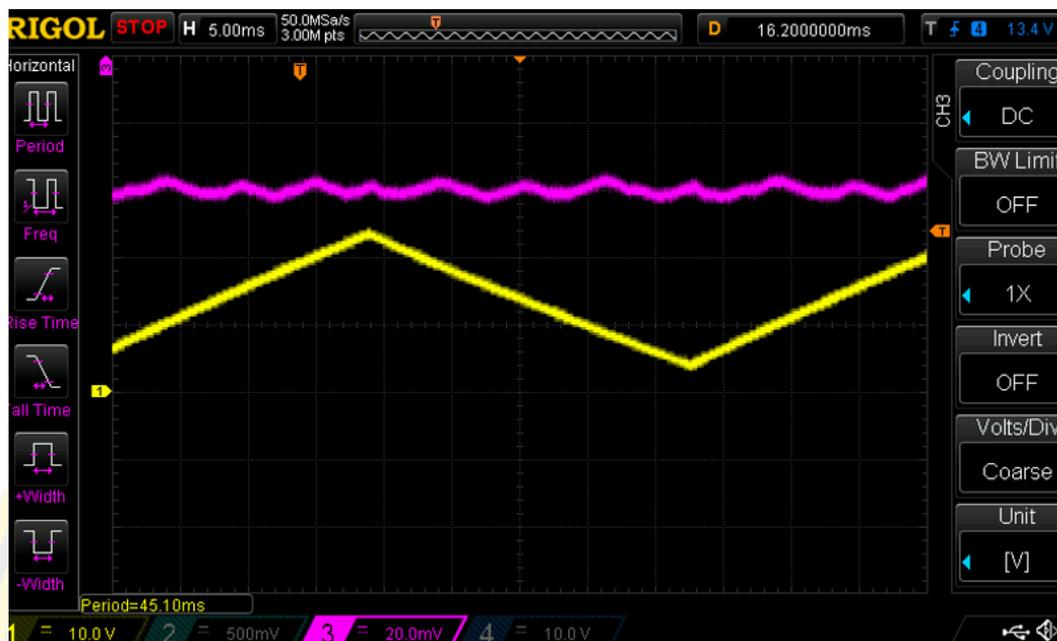


รูปที่ 54 แสดง absorption spectroscopy ของอะตอม xenon

โดยการเกิดสัญญาณที่เป็นหลุมขณะเปิดเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกที่สร้างขึ้น ความยาวคลื่นประมาณ 483 nm คือการเกิด absorption spectroscopy ดังรูปที่ 56 ซึ่งลักษณะการเกิดหลุมเป็นผลมาจากความไม่สมบูรณ์ของการสร้าง interference filter โดยรุ่นของ filter ที่ใช้ในการทดลองจะเป็น optical Filter 470 nm Band Pass Filter (NBP470) ดังรูปที่ 55

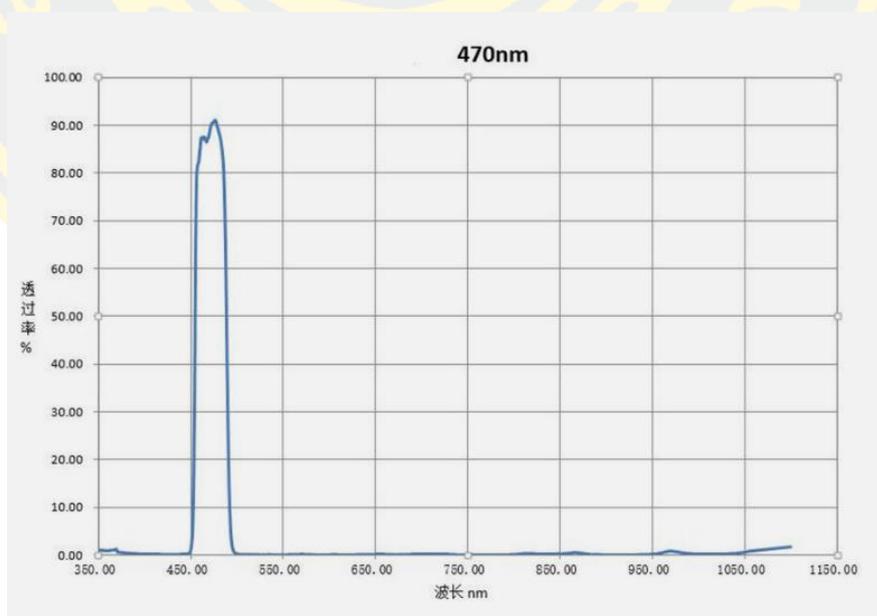


รูปที่ 55 ภาพ interference filter รุ่น optical Filter 470nm Band Pass Filter (NBP470)



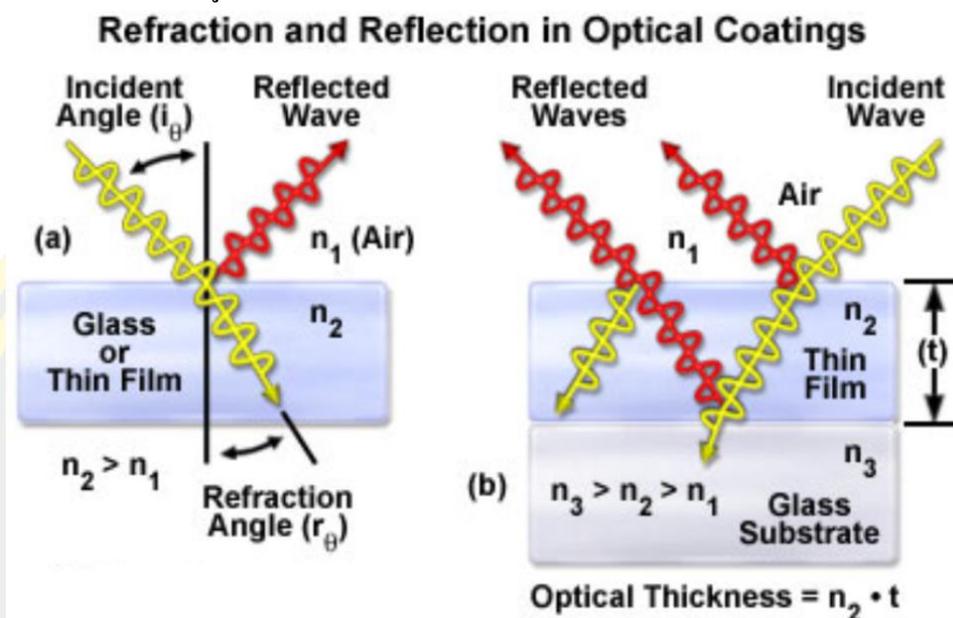
รูปที่ 56 แสดงสัญญาณการดูดกลืนของ optical filter เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นด้วยเปียโซ โดยให้สัญญาณไฟฟ้าตั้งเส้นสัญญาณสีเหลือง

ซึ่ง interference filter รุ่น optical Filter 470 nm Band Pass Filter (NBP470) จะมีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงดังรูปที่ 34



รูปที่ 57 แสดง spectrum การดูดกลืนโดย optical filter NBP470 แกนนอนเป็นแกนความยาวคลื่น แกนตั้งเป็นแกนปริมาณแสงที่สามารถส่งผ่าน optical filter นี้ได้

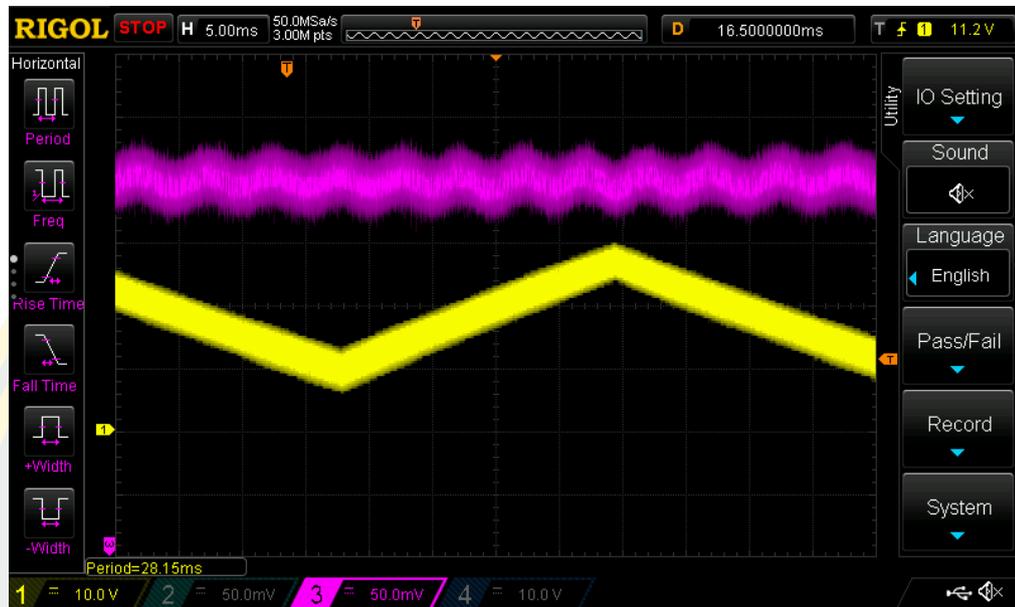
โดยทั่วไป interference filter จะถูกสร้างจากชั้นฟิล์มบางหลายๆชั้นเพื่อทำให้เกิดปรากฏการณ์การแทรกสอดของแสงโดยฟิล์มบางของลำแสงสะท้อนและลำแสงหักเหที่เกิดขึ้นภายในฟิล์มบางแสดงดังรูปที่ 58



รูปที่ 58 การแทรกสอดกันของลำแสงสะท้อนและลำแสงหักเหของชั้นฟิล์มบางต่าง ๆ [38]

ซึ่งจำนวนชั้นฟิล์มบาง ชนิดของฟิล์มบาง และลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางจะก่อให้เกิดการแทรกสอดแบบ fabry perot interferometer ที่ให้ความยาวคลื่นแตกต่างกัน เนื่องจากเลเซอร์ที่สร้างขึ้นมี spectral linewidth ที่น้อยในระดับ MHz จึงทำให้เห็นผลจากความไม่สมบูรณ์ของการสร้างชั้นฟิล์มบางของ optical filter นี้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า นอกจากจะสามารถใช้ optical filter ในการตรวจสอบการเกิด optical feedback ภายใน ECDL แล้ว ยังสามารถใช้ตรวจสอบคุณภาพของ optical filter ที่สร้างขึ้นได้ด้วย

- ต่อมาทำการทดลองปรับฟิลเตอร์ (NBP470) ให้หุลมมากที่สุดน้อยสุดดังนี้
- ปรับฟิลเตอร์ให้สัญญาณมีหุลมน้อยสุด และปรับกระแสให้เห็นหุลมชัดสุด



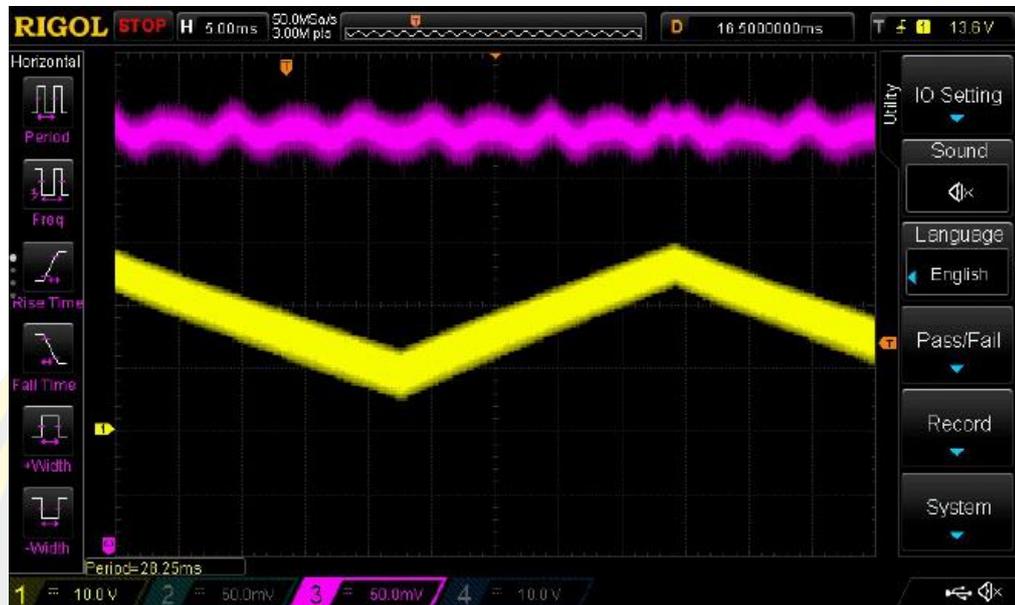
รูปที่ 59 ภาพแสดงสัญญาณเมื่อปรับฟิลเตอร์ให้มีหุลมน้อยสุด

จากนั้นปิดหลอด Xe



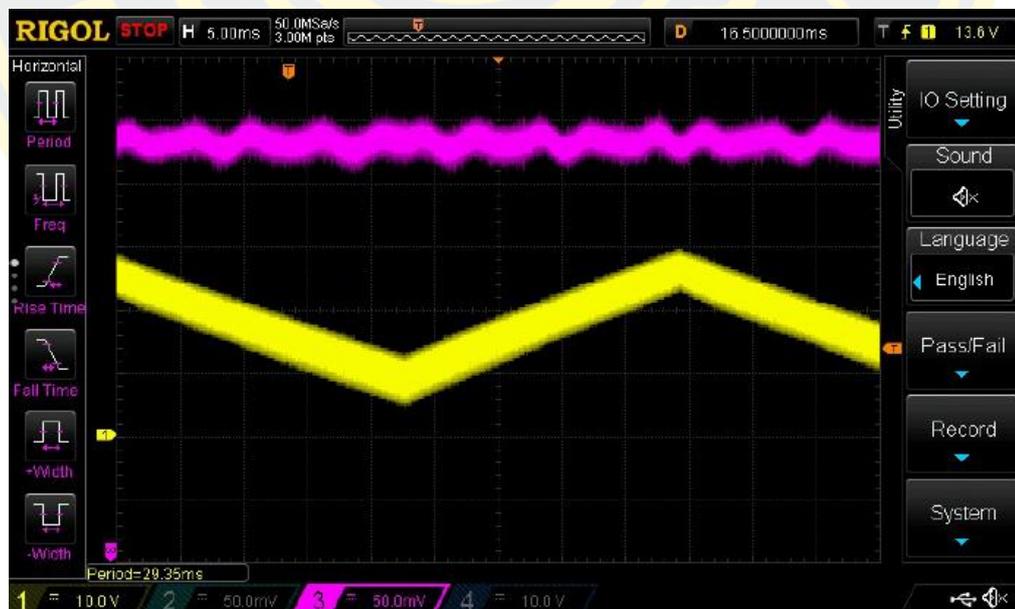
รูปที่ 60 ภาพแสดงสัญญาณเมื่อปิดหลอด Xe

-ปรับฟิลเตอร์ให้สัญญาณมีหลุมมากที่สุด และปรับกระแสให้เห็นหลุมชัดสุด



รูปที่ 61 ภาพแสดงสัญญาณเมื่อปรับฟิลเตอร์ให้มีหลุมมากที่สุด

จากนั้นปิดหลอด Xe

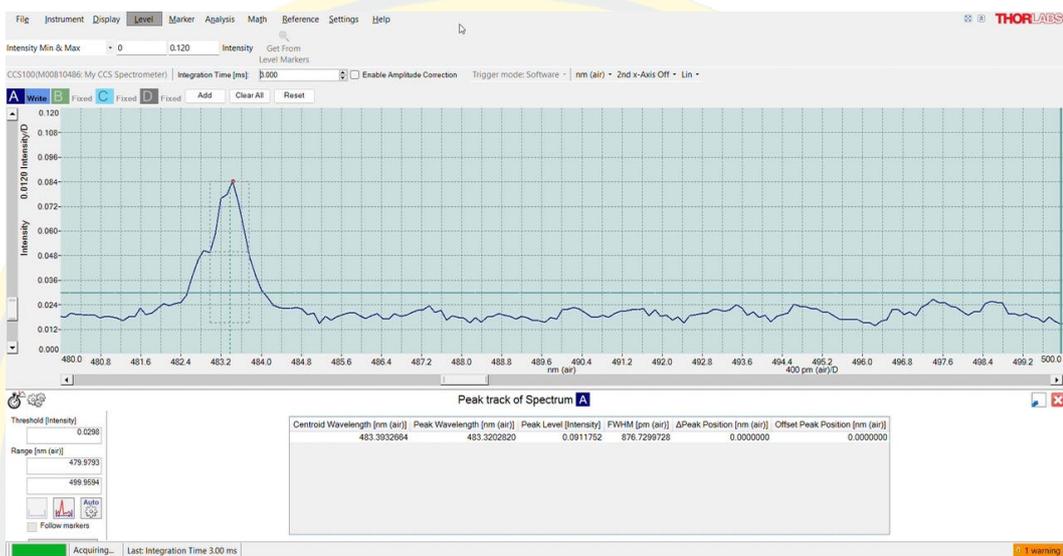


รูปที่ 62 ภาพแสดงสัญญาณเมื่อปิดหลอด Xe

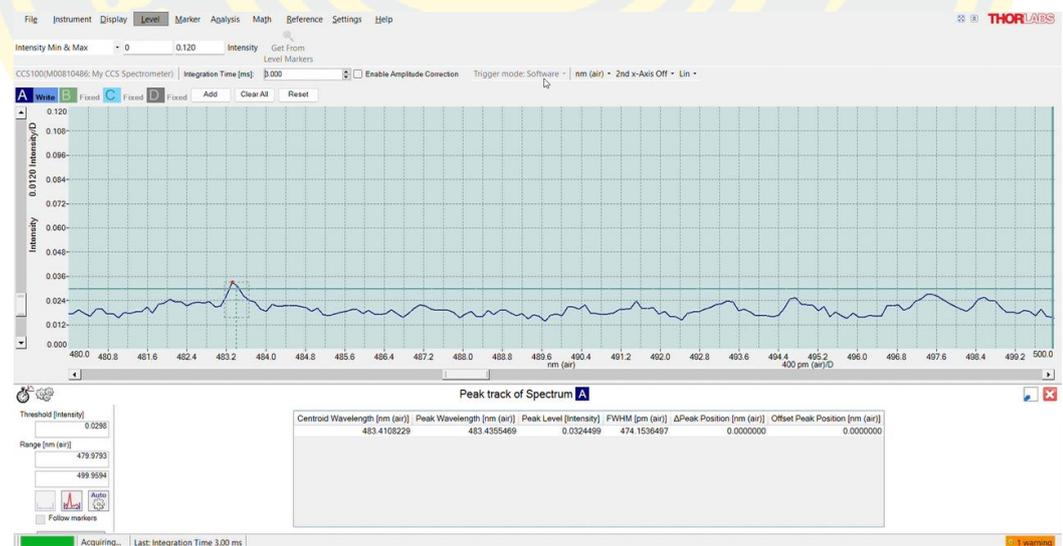
4.4 ศึกษาพฤติกรรมของหลอด Xe และศึกษาผลของสนามแม่เหล็กต่อหลอด Xe

4.4.1 ศึกษาพฤติกรรมของหลอด Xe

โดยจะทำการเปิดเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 483 nm และเปิด Xe แล้วดูช่วงความยาวคลื่น



รูปที่ 63 แสดงภาพที่ได้จาก spectrometer ในขณะที่เปิดเลเซอร์และเปิด Xe จากนั้นนำกระดาษมาปิดเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 483 nm

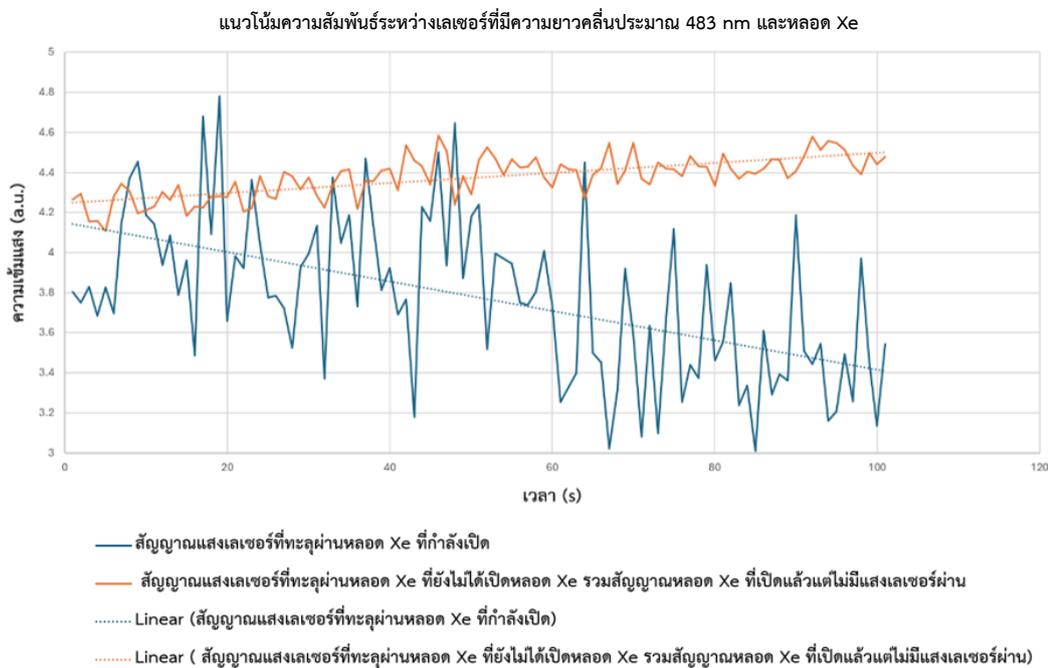


รูปที่ 64 แสดงภาพที่ได้จาก spectrometer ขณะนำกล่องมาปิดเลเซอร์

จากการศึกษาพฤติกรรมของหลอด Xe จึงได้ทำการทดลองยิงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 483 nm ผ่านหลอด Xe ที่กำลังเปิด พบว่า ในรูปที่ 63 มีฟิสิกส์ที่สูงและค่าความยาวคลื่นที่วัดได้มีค่า 483.32 nm จากนั้นนำกระดาษมาปิดแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 483 nm

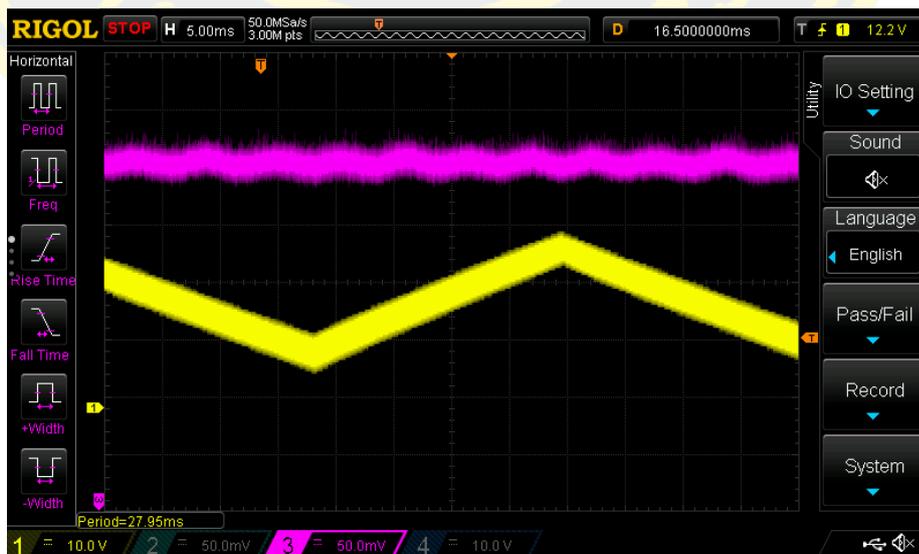
เพื่อไม่ให้แสงเลเซอร์ผ่านหลอด Xe พบว่าในรูปที่ 64 มีพีคต่ำลงและค่าความยาวคลื่นที่วัดได้จากการเปล่งแสงของหลอด Xe นั้นมีค่า 483.43 nm

สรุปผลแนวโน้มนำการเปิด Xe อย่างเดียว เปิดเลเซอร์อย่างเดียว และเปิดทั้ง Xe และเลเซอร์พร้อมกันพบว่าเมื่อเปิดทั้ง Xe และเลเซอร์พร้อมกันนั้นส่งผลให้เลเซอร์ความยาวคลื่นประมาณ 483 nm ถูกลดทอนโดยพลาสมาของ Xe เกิดอันตรกิริยากับแสงเลเซอร์ความยาวคลื่นประมาณ 483 nm เมื่อเวลานานขึ้น โดยอาจเป็นการกระเจิงแสงแบบเรย์ลีในพลาสมา (Rayleigh Scattering) [39] ซึ่งเกี่ยวข้องกับการกระเจิงแสงแบบยืดหยุ่น โดยอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าแสงที่ตกกระทบมาก เช่น พลาสมาของ Xe การกระเจิงแสงนี้เกิดขึ้น โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงในพลังงาน (ความยาวคลื่น) ของแสง หมายความว่าแสงที่กระเจิงมีความยาวคลื่นเท่ากับแสงที่ตกกระทบ การกระเจิงแสงแบบเรย์ลีมีความไวต่อความยาวคลื่นของแสงที่ตกกระทบสูง ซึ่งหมายความว่าความยาวคลื่นที่สั้นกว่าจะกระเจิงอย่างเข้มข้นมากกว่าความยาวคลื่นที่ยาวกว่า ในการวินิจฉัยพลาสมา รูปที่ 65 แสดงความเข้มแสงของแสงเลเซอร์ความยาวคลื่นประมาณ 483 nm ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาทุก ๆ 1 วินาที ที่ถูกวัดหลังหลอด Xe โดยเส้นสีส้มจะเป็นสัญญาณแสงเลเซอร์ที่ทะลุผ่านหลอด Xe ที่ยังไม่ได้เปิดหลอด Xe รวมสัญญาณหลอด Xe ที่เปิดแล้วแต่ไม่มีแสงเลเซอร์ผ่าน เส้นสีน้ำเงินจะเป็นกรณีของสัญญาณแสงเลเซอร์ที่ทะลุผ่านหลอด Xe ที่กำลังเปิด โดยเคลื่อนที่ผ่านพลาสมาของ Xe ที่เพิ่งเริ่มก่อตัวขึ้น พบว่า เมื่อเวลาผ่านไปแสงเลเซอร์จะถูกลดทอนมากยิ่งขึ้น รวมทั้งมีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณกลับไปกลับมา (fluctuation) มากกว่าเมื่อเทียบกับกรณีเส้นสีส้ม สาเหตุอาจการเกิดจากการในการกระเจิงแสงแบบไดนามิกของพลาสมา (dynamic light scattering) [40, 41] อิเล็กตรอนอิสระ (free electron) มักจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงที่ชัดเจนมากขึ้นเนื่องจากความคล่องตัวสูง (mobility) และการเคลื่อนไหวที่รวดเร็วของอนุภาคต่าง ๆ (rapid movements) ที่เกี่ยวข้องกับพลาสมา ในทางกลับกัน อะตอมที่เป็นกลางจะมีส่วนร่วมน้อยกว่าต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มนี้เนื่องจากการเคลื่อนไหวของพวกมันช้ากว่าและส่วนใหญ่ถูกขับเคลื่อนด้วยผลกระทบจากความร้อนมากกว่าจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าจากการทำให้เกิดพลาสมา ดังนั้น แม้ว่าอะตอมที่เป็นกลางจะทำให้เกิดการสั่นไหวในกระเจิงแสงแบบไดนามิกได้ แต่ระดับของการสั่นไหวเหล่านี้จะน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการสั่นไหวที่เกิดจากอิเล็กตรอนอิสระและไอออน



รูปที่ 65 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 483 nm และหลอด Xe
 4.5 ศึกษาผลของสนามแม่เหล็กต่อหลอด Xe

โดยจะนำแม่เหล็กเคลื่อนเข้าใกล้หลอด Xe ด้านข้าง โดยวัดระยะจากด้านหน้าของแม่เหล็กถึงปลายด้านข้างของหลอด Xe โดยเคลื่อนทีละ 0.2 mm ซึ่งวางแบบตั้งฉาก แล้วบันทึกภาพที่ระยะ 2.0 cm



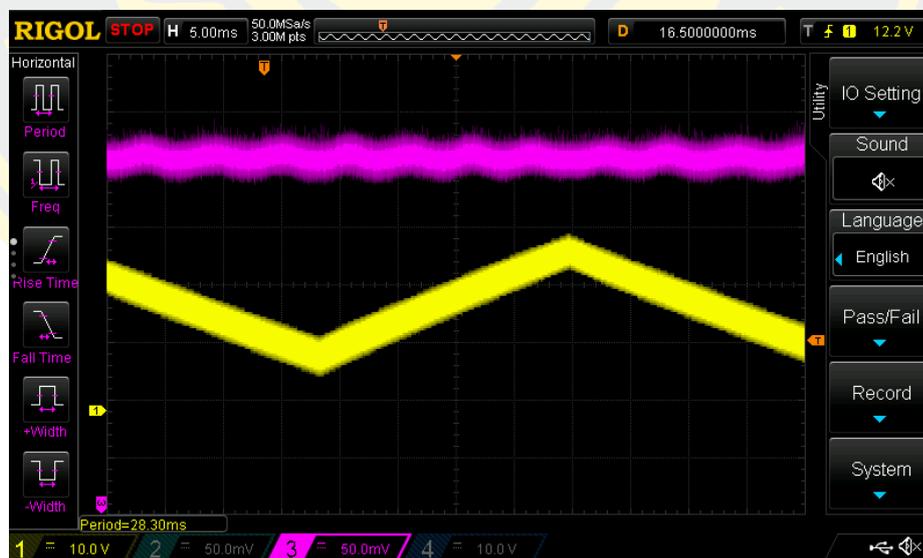
รูปที่ 66 ภาพแสดงการวัดระยะจากด้านหน้าของแม่เหล็กถึงปลายด้านข้างของหลอด Xe ที่ระยะ 2.0 cm

ที่ระยะ 2.2 cm



รูปที่ 67 ภาพแสดงการวัดระยะจากด้านหน้าของแม่เหล็กถึงปลายด้านข้างของหลอด Xe
ที่ระยะ 2.2 cm

ที่ระยะ 2.4 cm



รูปที่ 68 ภาพแสดงการวัดระยะจากด้านหน้าของแม่เหล็กถึงปลายด้านข้างของหลอด Xe
ที่ระยะ 2.4 cm

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาออกแบบและสร้างเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกจากเลเซอร์ไดโอดที่มีราคาไม่แพง จากเลเซอร์ไดโอดรุ่น GH04850B2G โดยใช้การจัดวางอุปกรณ์เชิงแสงแบบตาแมว (Cateye configuration) และฟิลเตอร์กรองแสงแบบแทรกสอด (Interference filter) เพื่อปรับความยาวคลื่นของไดโอดเลเซอร์จาก 485 nm เป็นประมาณ 483 nm พบว่าจากการทดลองการจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างระบบเลเซอร์และระบบเชิงแสงสำหรับการสร้างอะตอมริคเบิร์กของธาตุรูบิเดียม การทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการตรวจสอบ Saturated absorption spectroscopy ต่อมาส่วนที่สองเป็นการตรวจสอบการเกิดอะตอมริคเบิร์ก ซึ่งจากผลการทดลองพบว่ามีโอกาสที่จะเกิดอะตอมริคเบิร์ก แต่ด้วยปัจจัยหลายอย่าง เช่น การปรับอุณหภูมิของเลเซอร์ให้คงที่และการเกิดสัญญาณรบกวนของวงจรต่างๆทำให้ผลการทดลองไม่เสถียร จึงเห็นการเกิดอะตอมริคเบิร์กไม่ชัดเจน พร้อมกันนี้ยังนำแสงเลเซอร์จากระบบเชิงแสงที่สร้างขึ้นไปศึกษาพฤติกรรมการกระเจิงของแสงผ่านพลาสมาของ Xe ในเบื้องต้นด้วย ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถนำไปต่อยอดในการทำเซนเซอร์ วัดค่าสนามแม่เหล็กได้ในอนาคตโดยใช้เลเซอร์ ECDL ที่ออกแบบสร้างขึ้นรวมทั้งศึกษาคุณสมบัติของการเกิดพลาสมาได้



บรรณานุกรม

1. Ding, K., et al., *Research on Narrow Linewidth External Cavity Semiconductor Lasers*. Crystals, 2022. 12(7): p. 956.
2. Ye, C., *Tunable external cavity diode lasers*. 2004: World Scientific.
3. Labaziewicz, J., et al., *Compact, filtered diode laser system for precision spectroscopy*. Optics letters, 2007. 32(5): p. 572-574.
4. Wang, W., A. Major, and J. Paliwal, *Grating-stabilized external cavity diode lasers for Raman spectroscopy—A review*. Applied Spectroscopy Reviews, 2012. 47(2): p. 116-143.
5. Gao S, W.J.B., Liu Y K, Ma S, Niu Y J and Yang H S, *Chin. Opt.* 2020. 13(6): p. 1171-1181.
6. Chang, P., et al., *Stabilizing diode laser to 1 Hz-level Allan deviation with atomic spectroscopy for Rb four-level active optical frequency standard*. Applied Physics B, 2019. 125(11): p. 196.
7. Keeley, J., et al., *Measurement of the emission spectrum of a semiconductor laser using laser-feedback interferometry*. Scientific reports, 2017. 7(1): p. 7236.
8. Takei, Y., et al., *Development of an optical pressure measurement system using an external cavity diode laser with a wide tunable frequency range*. Measurement, 2020. 151: p. 107090.
9. Bayrakli, I., *Breath analysis using external cavity diode lasers: a review*. Journal of biomedical optics, 2017. 22(4): p. 040901-040901.
10. Isakova, A.A., et al., *Specific features of oscillation regimes of an external cavity diode laser under microwave modulation*. Quantum Electronics, 2017. 47(7): p. 610.
11. Wicht, A., et al. *Narrow linewidth diode laser modules for quantum optical sensor applications in the field and in space*. in *Components and packaging for laser systems III*. 2017. SPIE.
12. Mroziewicz, B., *External cavity wavelength tunable semiconductor lasers-a review*. Opto-Electronics Review, 2008. 16: p. 347-366.
13. Guo, Y., et al., *Hybrid integrated external cavity laser with a 172-nm tuning range*. APL Photonics, 2022. 7(6).
14. Yan, Z.-H. and S. Zhou, *Study of the characteristics of 976 nm Bragg grating external cavity semiconductor lasers*. Modern Physics Letters B, 2018. 32(19): p. 1850214.

15. Temnuch, W., et al. *Low-cost external cavity diode laser for cold atom experiments*. in *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. IOP Publishing.
16. Thompson, D.J. and R.E. Scholten, *Narrow linewidth tunable external cavity diode laser using wide bandwidth filter*. *Review of scientific instruments*, 2012. 83(2).
17. Koglbauer, A., et al., *A laser system for the excitation of rubidium Rydberg states using second harmonic generation in a PPLN waveguide crystal*. *Applied Physics B*, 2011. 104: p. 577-581.
18. Ding, D., et al., *Tunable high-power blue external cavity semiconductor laser*. *Optics & Laser Technology*, 2017. 94: p. 1-5.
19. Chi, M., O.B. Jensen, and P.M. Petersen, *Tuning range and output power optimization of an external-cavity GaN diode laser at 455 nm*. *Applied optics*, 2016. 55(9): p. 2263-2269.
20. Mukhtar, S., et al., *Blue laser diode system with an enhanced wavelength tuning range*. *IEEE Photonics Journal*, 2020. 12(2): p. 1-10.
21. Sheng, Q., et al., *Continuous-wave long-distributed-cavity laser using cat-eye retroreflectors*. *Optics Express*, 2021. 29(21): p. 34269-34277.
22. Wei, C.-h., et al., *Compact external cavity diode laser for quantum experiments*. *Optoelectronics letters*, 2020. 16(6): p. 433-436.
23. Jacques, V., et al., *Nonlinear spectroscopy of rubidium: an undergraduate experiment*. *European journal of physics*, 2009. 30(5): p. 921.
24. Zhang, Z., et al., *Observation of electromagnetically induced Talbot effect in an atomic system*. *Physical Review A*, 2018. 97(1): p. 013603.
25. Rau, A., *Rydberg states in electric and magnetic fields: near-zero-energy resonances*. *Journal of Physics B: Atomic and Molecular Physics*, 1979. 12(6): p. L193.
26. Gudmundsson, J.T., et al., *On the plasma parameters of a planar inductive oxygen discharge*. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2000. 33(11): p. 1323.
27. Hu, J., et al., *Improvement of response bandwidth and sensitivity of Rydberg receiver using multi-channel excitations*. *EPJ Quantum Technology*, 2023. 10(1): p. 51.
28. Grimmel, J., et al., *Measurement and numerical calculation of Rubidium Rydberg Stark spectra*. *New Journal of Physics*, 2015. 17(5): p. 053005.
29. Zimmerman, M.L., et al., *Stark structure of the Rydberg states of alkali-metal atoms*.

- Physical Review A, 1979. 20(6): p. 2251.
30. Walker, I.C., et al., *Dissociative electron attachment (DEA) in ozone 0-10 eV*. Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 1996. 29(20): p. 4749.
 31. Mohapatra, A., T. Jackson, and C. Adams, *Atomic, Molecular, and Optical Physics- Coherent Optical Detection of Highly Excited Rydberg States Using Electromagnetically Induced Transparency*. Physical Review Letters, 2007. 98(11): p. 113003-113003.
 32. Mack, M., et al., *Measurement of absolute transition frequencies of Rb 87 to nS and nD Rydberg states by means of electromagnetically induced transparency*. Physical Review A, 2011. 83(5): p. 052515.
 33. Jones, R., D. You, and P. Bucksbaum, *Ionization of Rydberg atoms by subpicosecond half-cycle electromagnetic pulses*. Physical review letters, 1993. 70(9): p. 1236.
 34. Spencer, W.P., et al., *Photoionization by blackbody radiation*. Physical Review A, 1982. 26(3): p. 1490.
 35. Su, H.-J., et al., *Optimizing the Rydberg EIT spectrum in a thermal vapor*. Optics Express, 2022. 30(2): p. 1499-1510.
 36. Sansonetti, C.J. and K.-H. Weber, *High-precision measurements of Doppler-free two-photon transitions in Rb: new values for proposed dye-laser reference wavelengths*. JOSA B, 1985. 2(9): p. 1385-1391.
 37. Saloman, E.B., *Energy levels and observed spectral lines of xenon, Xe I through Xe LIV*. Journal of physical and chemical reference data, 2004. 33(3): p. 765-921.
 38. Davidson, M.W., *Institute of Molecular Biophysics and Center for Materials Research and Technology The Florida State University, Tallahassee, Florida 32306*.
 39. Kempkens, H. and J. Uhlenbusch, *Scattering diagnostics of low-temperature plasmas (Rayleigh scattering, Thomson scattering, CARS)*. Plasma Sources Science and Technology, 2000. 9(4): p. 492.
 40. Berne, B.J. and R. Pecora, *Dynamic light scattering: with applications to chemistry, biology, and physics*. 2000: Courier Corporation.
 41. Jia, Z., et al., *Dynamic light scattering: a powerful tool for in situ nanoparticle sizing*. Colloids and Interfaces, 2023. 7(1): p. 15.



ประวัติย่อของผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นางสาวพรชนัน รัตนะธรรมมากร
วัน เดือน ปี เกิด	3 มกราคม 2543
สถานที่เกิด	จังหวัดชลบุรี
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	6/2 หมู่ 5 ต.นามะตูม อ.พนัสนิคม จ.ชลบุรี 20140
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยบูรพา

