



การออกแบบและการสร้างไดโอดเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกแบบไม่มีฟิลเตอร์กรองแสง

ณัฐวุฒิ สุขสวัสดิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

2565

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

การออกแบบและการสร้างไดโอดเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกแบบไม่มีฟิลเตอร์กรองแสง

ณัฐภูมิ สุขสวัสดิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

2565

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

Design and construction of a non-filtered external-cavity diode laser

NATTAWUT SUKSAWAT

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR MASTER DEGREE OF SCIENCE
IN PHYSICS
FACULTY OF SCIENCE
BURAPHA UNIVERSITY
2022

COPYRIGHT OF BURAPHA UNIVERSITY



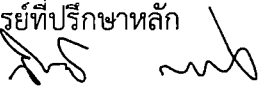
2031790634

BUU iThesis 63910192 thesis / recv: 27112565 19:04:43 / seq: 63

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้พิจารณา
วิทยานิพนธ์ของ ณัฐฉัตร สุขสวัสดิ์ ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

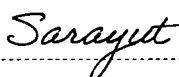
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก



(ดร.สิทธิ บัวทอง)

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

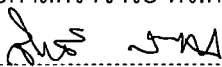


(รองศาสตราจารย์ ดร.สรายุทธ เดชะปัญญา)

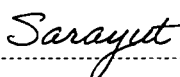
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

 ประธาน

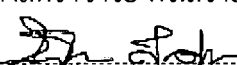
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดริศ สามารถ)

 กรรมการ

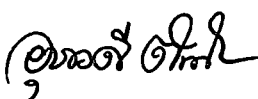
(ดร.สิทธิ บัวทอง)

 กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สรายุทธ เดชะปัญญา)

 กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สรไกร ศรีศุภผล)

 คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. อุษาวดี ตันติวรานุรักษ์)

วันที่ 8 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2566

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการ
การศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยบูรพา

 คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. วิทวัส แจ้งเอี่ยม)

วันที่ 19 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2566



63910192: สาขาวิชา: ฟิสิกส์; วท.ม. (ฟิสิกส์)

คำสำคัญ: เลเซอร์ 780 นาโนเมตร, ไม่มีฟิลเตอร์กรองแสง, การสะท้อนแบบตาแมว, ผลกระทบของอุณหภูมิต่อความยาวคลื่นของ ECDL, การดูดกลืนสเปกตรัมของ ธาตุรูบิเดียม

ณัฐวุฒิ สุขสวัสดิ์ : การออกแบบและการสร้างไดโอดเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกแบบไม่มีฟิลเตอร์กรองแสง. (Design and construction of a non-filtered external-cavity diode laser) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: สิทธิ บัวทอง, สราวุธ เดชะปัญญา ปี พ.ศ. 2565.

ในงานวิจัยนี้จะสร้างไดโอดเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอก (ECDL) ที่มีความยาวคลื่น 780 นาโนเมตร และใช้เทคนิคของการสะท้อนแบบตาแมว (Cateye reflector) โดยจะไม่ใช่ฟิลเตอร์กรองแสง เพื่อทำการลดระยะของโพรงภายนอกซึ่งจะช่วยเพิ่มความเสถียรให้กับ ECDL สามารถล็อกความยาวคลื่นที่ 780 นาโนเมตรได้สูงสุดที่ 2 ชั่วโมง 20 นาที โดยที่สามารถตรวจสอบความแม่นยำของ ECDL ได้ด้วยการติดตั้งระบบดูดกลืนพลังงานของธาตุรูบิเดียม (Absorption spectroscopy) Thorlabs Spectrometers (CCS175/M) และ Thorlabs Fabry-Perot Interferometers (SA210-5B) ทั้งนี้ได้สร้างวงจรควบคุมความยาวคลื่นของ ECDL และวงจรควบคุมอุณหภูมิของเลเซอร์ให้คงที่เป็นเวลานานโดยอุณหภูมิความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 0.1 องศาเซลเซียสจากค่าที่ตั้งไว้ ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อความยาวคลื่นของ ECDL

63910192: MAJOR: PHYSICS; M.Sc. (PHYSICS)

KEYWORDS: D2 hyperfine transitions, ECDL non-filter, Cateye reflector, 780 nm,
Influence of the temperature on ECDL

NATTAWUT SUKSAWAT : DESIGN AND CONSTRUCTION OF A NON-FILTERED
EXTERNAL-CAVITY DIODE LASER. ADVISORY COMMITTEE: SITTI BUATHONG, Ph.D.,
SARAYUT DEACHAPUNYA, Ph.D. 2022.

In this work, we constructed an external cavity diode laser with 780 nm in a cateye reflector mirror type without using an interference filter. The ECDL could be locked at 780 nm for the longest time period of 2 hours and 20 minutes. Thorlabs Spectrometers (CCS175/M), Thorlabs Fabry-Perot Interferometers (SA210-5B), and rubidium absorption spectroscopy were used to confirm the wavelength spectrum of the ECDL. We built laser temperature and cavity length control systems. The measured ECDL temperature distribution had a standard deviation less than 0.1 degrees Celsius from the setting value. It was found that the temperature had a strong effect on the ECDL and, as a result, a study of the temperature variation was conducted.



กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ดร.สิทธิ บัวทอง และ รองศาสตราจารย์ ดร.สรายุธ เดชะปัญญา อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งกรุณาสละเวลาเพื่อให้ความรู้และคำแนะนำตลอดการจัดทำวิทยานิพนธ์ มอบโอกาสในการศึกษาเรื่องที่ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์สนใจ

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สรไกร ศรีสุขผล และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดริส สามารถ ที่ให้ความกรุณาเป็นกรรมการสอบ ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์รู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ และภาควิชาฟิสิกส์คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่เอื้อเฟื้อสถานที่วัสดุอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับทำวิทยานิพนธ์นี้

สุดท้ายนี้ขอบพระคุณ ดร.รัฐชัย ปิ่นชัยพัฒน์ และ ดร.วิภาวี เต็มหนู ที่ให้คำปรึกษาด้านวิชาการทางอิเล็กทรอนิกส์เป็นอย่างยิ่ง และกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนให้กำลังใจ และให้โอกาสทางการศึกษาอันมีค่ายิ่ง และขอบคุณเพื่อนภาควิชาฟิสิกส์ นางสาวจิรภัทร จันทร์พูล นายจตุพร นิสัยชื่อ และนายศุภณัฐ มะเชิง ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และสนับสนุนในทุกๆ เรื่องและเป็นที่กำลังใจที่ดีโดยตลอดมาทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงด้วยดี

ณัฐวุฒิ สุขสวัสดิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1	1
บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2	5
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.2 เลเซอร์และองค์ประกอบของเลเซอร์	5
2.2.1 ตัวกลาง (Lasing medium)	5
2.2.3 แหล่งพลังงานกระตุ้นภายนอก (Pump source).....	6
2.2.3 ออปติคัลเรโซเนเตอร์ (Optical resonator).....	6
2.2.4 ระบบหล่อเย็น (Cooling system).....	7
2.3 ลักษณะเฉพาะและหลักการของเลเซอร์.....	7

2.3.1 โคฮีเรนต์ (coherent)	7
2.3.2 การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการกระตุ้น (absorption)	8
2.3.3 การแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยธรรมชาติ (spontaneous emission)	9
2.3.4 การแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการกระตุ้น (stimulated emission)	9
2.3.5 ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ (Energy band gap of semiconductor)	10
2.3.5 โพลาไรเซชันของแสงเลเซอร์ (Polarization of Laser light)	11
2.4 ไดโอดเลเซอร์	13
2.4 ไดโอดเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกแบบใช้เกรตติง	15
2.5 ไดโอดเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกแบบใช้ฟิลเตอร์	16
2.6 การสั่นพ้องและการดูดกลืนพลังงานของธาตุรูบี้เดี่ยว	19
2.7 ฟาบริ-เปโรต์ อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (Fabry–Pérot interferometer)	22
บทที่ 3	23
วิธีการทดลอง	23
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้วิจัย	23
3.2 ออกแบบและสร้างเลเซอร์ชนิดโพรงภายในแบบไม่มีฟิลเตอร์กรองแสง	25
3.3 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับเลเซอร์ชนิดโพรงภายในแบบไม่มีฟิลเตอร์กรองแสง	25
3.3.1 แหล่งควบคุมกระแสไฟฟ้าให้ไดโอดเลเซอร์	26
3.3.2 วงจรควบคุมอุณหภูมิ	27
3.3.3 วงจรรับสัญญาณการดูดกลืนของธาตุรูบี้เดี่ยว	29
3.3.4 วงจรควบคุมระยะกระจกาวที่	30
3.3.5 วงจรวัดความยาวคลื่นของเลเซอร์ชนิดโพรงภายในแบบไม่มีฟิลเตอร์กรองแสง	31
3.4 การติดตั้งระบบดูดกลืนพลังงานของธาตุรูบี้เดี่ยว (Absorption spectroscopy)	32



3.5 การตรวจสอบความแม่นยำของความยาวคลื่นของเลเซอร์ชนิดโพรงภายในแบบไม่มีฟิลเตอร์	
กรองแสง	33
บทที่ 4	35
ผลการทดลอง	35
4.1 การออกแบบและสร้างเลเซอร์ชนิดโพรงภายในแบบไม่มีฟิลเตอร์กรองแสง	35
4.2 การสร้างเครื่องมือควบคุมอุณหภูมิ	36
4.2.1 การวัดประสิทธิภาพการทำงานของวงจรควบคุมอุณหภูมิ	38
4.3 ผลกระทบของการปรับกระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิของไดโอดเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกแบบไม่มีฟิลเตอร์	39
4.4 ผลการติดตั้งระบบควบคุมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของธาตุรูบิเดียม	40
4.5 ผลการล๊อคความยาวคลื่น ECDL	42
4.6 ผลความแม่นยำของเลเซอร์ชนิดโพรงภายในแบบไม่มีฟิลเตอร์กรองแสง	44
บทที่ 5	47
สรุปผลการทดลอง	47
ภาคผนวก	48
บรรณานุกรม	2
ประวัติย่อของผู้วิจัย	5

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ชุดข้อมูลผลการทดลองของความยาวคลื่นต่ออุณหภูมิของ ECDL	54
ตารางที่ 2 ชุดข้อมูลผลการทดลองของการปรับกระแสไฟฟ้าให้ ECDL ที่อุณหภูมิต่างๆ ให้เกิดการ ดูดกลืนของรูบิเดียม 85.....	55
ตารางที่ 3 ชุดข้อมูลผลการทดลองของอุณหภูมิต่อแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรควบคุมอุณหภูมิ	56
ตารางที่ 4 ข้อมูลผลการทดลองวัดความยาวคลื่นจากสเปกโตรมิเตอร์ขณะที่ล๊อคความถี่.....	58



2031790634

BUU iThesis 63910192 thesis / recv: 27112565 19:04:43 / seq: 63

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1 แผนผังเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกแบบสองฟิลเตอร์ [7]	2
รูปที่ 2 (a) แผนผังด้านข้างของ IF-ECDL และ (b) กล้องควบคุมอุณหภูมิสำหรับล็อกความยาวคลื่น [8]	3
รูปที่ 3 ตัวกลางชนิดต่างๆ ในช่วงความยาวคลื่นที่ต่างกัน [12]	6
รูปที่ 4 องค์ประกอบที่สำคัญของเลเซอร์ [13]	7
รูปที่ 5 (a) ตัวอย่างแสงที่มีความเป็นโคฮีเรนต์ (Coherent light) และ (b) ตัวอย่าง แสงที่ไม่มีความเป็นโคฮีเรนต์ (Incoherent light) [14]	8
รูปที่ 6 แสดงอะตอมที่มี 3 สถานะที่สามารถให้แสงเลเซอร์ [15]	9
รูปที่ 7 กระบวนการอธิบายการแผ่พลังงานของอะตอม โดยลูกศรสีแดงบอกถึงการเลื่อนชั้นพลังงานของอะตอม [16]	10
รูปที่ 8 แผนผังของแถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำ	10
รูปที่ 9 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือคลื่นแสงที่มี E คือสนามไฟฟ้า B คือ สนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกัน และ v คือ ทิศทางความเร็วของการเคลื่อนที่ [17]	12
รูปที่ 10 โพลาไรเซชันของแสงเลเซอร์ที่มีลักษณะแตกต่างกัน คือ โพลาไรเซชันเชิงเส้นในแนวราบ (Horizontal polarization) โพลาไรเซชันเชิงเส้นในแนวดิ่ง (Vertical polarization) โพลาไรเซชันเชิงเส้นหมุนซ้าย (Left circular polarization) และโพลาไรเซชันเชิงเส้นหมุนขวา (Right circular polarization) [17]	13
รูปที่ 11 แผนผังองค์ประกอบของเลเซอร์ไดโอด [18]	14
รูปที่ 12 แผนผังองค์ประกอบ PN-Junction ของไดโอดเลเซอร์ [19]	15
รูปที่ 13 (a) เลเซอร์ ลิทโทรว์ (Littrow configuration) [22] และ (b) เลเซอร์แบบ ลิทมัน-เมทคาล์ฟ (Littman-Metcalf configuration) [3]	16
รูปที่ 14 แผนผังไดโอดเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกแบบใช้ฟิลเตอร์ [2] , a). ไดโอดเลเซอร์ (LD), เลนส์ทำลำขนาน (CL), ฟิลเตอร์กรองแสง (IF), เลนส์ตาแมว (L1), กระจกสะท้อนแสงบางส่วน (OC) ที่ติด	

อยู่กับเพียโซอิเล็กทริก (PZT), เลนส์ทำลำขนานอีกครั้ง (L2) และ b). ตัวแยกแสงชนิดลูกบาศก์ (BS), กระจกเงา (M)	17
รูปที่ 15 ผลเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนเชิงกลขององค์ประกอบตามแนวกับเลเซอร์แบบลิทโทว์ [2]	19
รูปที่ 16 คือ การดูดกลืนสเปกโทรสโกปี(Absorption spectroscopy) ประกอบด้วย เลเซอร์ (Laser), ไอโซเลเตอร์ (Isolator), ฮาล์ฟเวฟเพลท ($\lambda/2$), ผลึกแยกแสงโพลาไรเซชัน (PBS), โฟโตไดโอด (PD), ควอเตอร์เวฟเพลท ($\lambda/4$), หลอดแก้วรูบิเดียม (Rb cell), กระจกเงา (Mirror) [5]	20
รูปที่ 17 แถบการดูดกลืนสเปกตรัมของธาตุรูบิเดียมที่ความถี่ต่างๆ [23]	21
รูปที่ 18 แผนผังฟาบรี-เปโรต์ อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ [25]	22
รูปที่ 19 แผนผังการสร้างเลเซอร์ชนิดโพรงภายในไม่มีฟิลเตอร์กรองแสง โดยใช้ PBS ในการแยกลำแสงเลเซอร์.....	25
รูปที่ 20 วงจรควบคุมกระแสไฟฟ้า.....	26
รูปที่ 21 วงจรวางควบคุมอุณหภูมิ	27
รูปที่ 22 แผนผังมอนิเตอร์โดยใช้บอร์ด Arduino nano.....	28
รูปที่ 23 วงจรรับสัญญาณการดูดกลืนของธาตุรูบิเดียม	29
รูปที่ 24 วงจรควบคุมระยะจากควิตี้	30
รูปที่ 25 วงจรลือความยาวคลื่นของ ECDL	31
รูปที่ 26 แผนผังติดตั้งระบบดูดกลืนพลังงานของธาตุรูบิเดียม	32
รูปที่ 27 แผนผังติดตั้งชุดตรวจสอบความแม่นยำของความยาวคลื่นของเลเซอร์ชนิดโพรงภายในไม่มีฟิลเตอร์กรองแสง.....	34
รูปที่ 28 องค์ประกอบเลเซอร์ชนิดโพรงภายในไม่มีฟิลเตอร์กรองแสงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (ไม่มีฝาครอบ).....	35
รูปที่ 29 วงจรมอนิเตอร์โดยใช้บอร์ด Arduino nano.....	36

รูปที่ 30 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิที่ใช้จริงในงานทดลอง (ซ้าย) และแผ่น PCB วงจรวงจรควบคุมอุณหภูมิ (ขวา).....	37
รูปที่ 31 ผลการควบคุมอุณหภูมิ ECDL	38
รูปที่ 32 ผลของอุณหภูมิต่อแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรควบคุมอุณหภูมิ.....	39
รูปที่ 33 (ซ้าย) ปรับกระแสไฟฟ้าให้ ECDL ที่อุณหภูมิต่างๆ ให้เกิดการดูดกลืนของรูบิเดียม 85 (ขวา) ผลของต่ออุณหภูมิของ ECDL ต่อความยาวคลื่น	40
รูปที่ 34 ชุดติดตั้งระบบดูดกลืนพลังงานของธาตุรูบิเดียม และหลอดแก้วรูบิเดียมที่ดูดกลืนแสงเลเซอร์	41
รูปที่ 35 สัญญาณการดูดกลืนของธาตุรูบิเดียม (สีฟ้า) และสัญญาณสามเหลี่ยม (สีเหลือง)	41
รูปที่ 36 แสดงจุดที่จะล็อกความยาวคลื่นของ ^{85}Rb $F = 3 \rightarrow F'$	42
รูปที่ 37 วงจร PCB ที่ใช้ในการล็อกความยาวคลื่นและดูสัญญาณการดูดกลืนของรูบิเดียม.....	43
รูปที่ 38 (ซ้าย) ความยาวคลื่นที่วัดจากสเปกโตรมิเตอร์ขณะที่ล็อกความถี่, (ขวา) ภาพถ่ายสัญญาณจากการดูดกลืนรูบิเดียมขณะที่ล็อกความถี่ (สีฟ้า) และศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้เพียโซอิเล็กทริก (สีเหลือง)	44
รูปที่ 39 ความยาวคลื่นที่วัดได้จากการใช้ สเปกโตรมิเตอร์.....	45
รูปที่ 40 Single-mode ของ ECDL ขณะเปิดใช้งานเครื่อง Fabry-Perot Spectrometers	46
รูปที่ 41 แผ่น PCB ขนาดจริงของวงจรควบคุมอุณหภูมิ	49
รูปที่ 42 แผ่นผัง PCB ของวงจรควบคุมอุณหภูมิจากโปรแกรม Proteus.....	49
รูปที่ 43 แผ่น PCB ขนาดจริงของวงจรล็อกความยาวคลื่นและดูสัญญาณการดูดกลืนของรูบิเดียม...50	
รูปที่ 44 แผ่นผัง PCB ของวงจรล็อกความยาวคลื่นและดูสัญญาณการดูดกลืนของรูบิเดียมจากโปรแกรม Proteus.....	51
รูปที่ 45 แผ่นผังรวมทั้งหมดของวงจรล็อกความยาวคลื่นและดูสัญญาณการดูดกลืนของรูบิเดียม	52
รูปที่ 46 โค้ดภาษา C ใช้ควบคุมการแสดงผลของบอร์ด Arduino จากโปรแกรม Arduino IDE.....	53

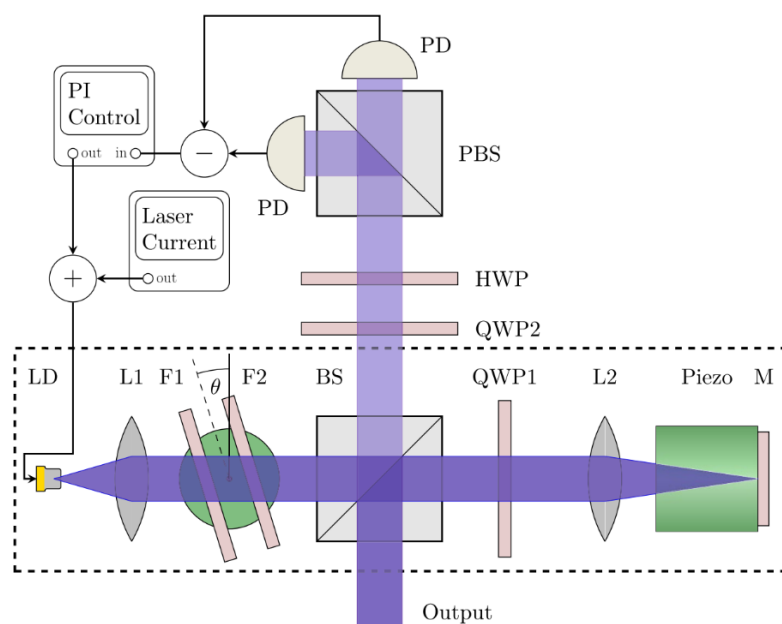
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

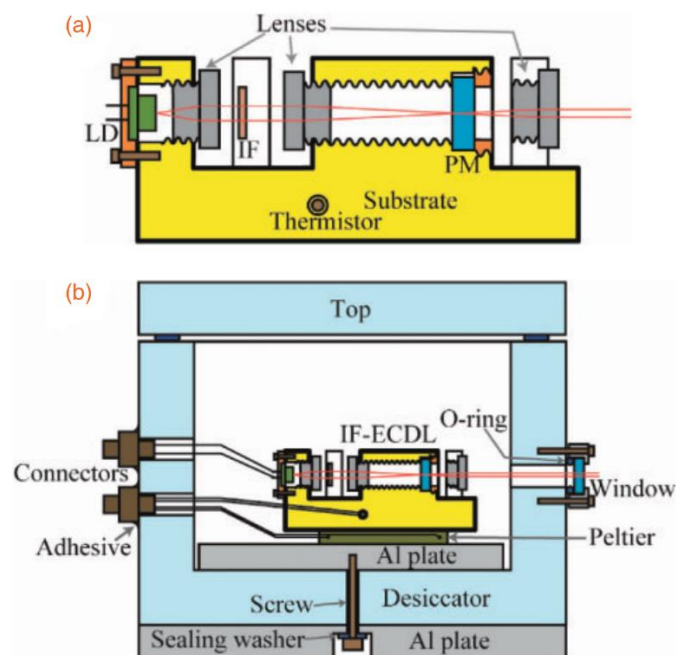
ในปัจจุบันไดโอดเลเซอร์ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการศึกษาทางด้านกลศาสตร์ควอนตัมและทัศนศาสตร์ควอนตัม แต่อย่างไรก็ตามไดโอดเลเซอร์มีความเสถียรที่ต่ำและการกระจายตัวของความยาวคลื่นมาก [1] ซึ่งการศึกษาทางด้านกลศาสตร์ควอนตัมและทัศนศาสตร์ควอนตัมมีความจำเป็นอย่างมากที่ต้องมีความละเอียด ความเสถียรและความแม่นยำของความยาวคลื่นไดโอดเลเซอร์สูง [2] จึงมีการคิดค้นและสร้างไดโอดเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกโดยใช้การแทรกสอดของเกรตติงในปี 1991 [3] เพื่อให้ได้ความยาวคลื่นที่ต้องการและมีความเสถียรสูง แต่วิธีดังกล่าวนี้มีความยากในการสร้างไดโอดเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกเนื่องจากต้องใช้ความระมัดระวังในการให้แสงเลเซอร์เกิดการแทรกสอดบนเกรตติง จนกระทั่งในปี 2008 ได้มีการออกแบบและสร้างเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกแบบที่ใช้ฟิลเตอร์กรองแสงแทนการใช้เกรตติง [4] ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมที่สุดเนื่องจากมีความแม่นยำ ความเสถียร และวิธีการสร้างไดโอดเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกนี้มีความซับซ้อนและต้นทุนที่น้อยกว่าการใช้การแทรกสอดแบบเกรตติง

การสร้างอะตอมเย็น (cold atom) ของธาตุรูบิเดียมซึ่งใช้เลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นสั้นพ้องที่ 780.24 nm [5] ในการทำให้อะตอมรูบิเดียมเคลื่อนที่ช้าลง นั้นไม่สามารถหาได้ทั่วไป จึงมีความจำเป็นที่ต้องใช้เลเซอร์ความยาวคลื่นอื่นๆ ที่ใกล้เคียงราคาถูกและหาซื้อได้ง่ายทั่วไป อาทิเช่น ไดโอดเลเซอร์ความยาวคลื่น 785 nm มาทำการสร้างเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกแบบใช้ฟิลเตอร์กรองแสง เพื่อทำการปรับความยาวคลื่นให้ตรงกับความยาวคลื่นสั้นพ้อง (780.24 nm) ของธาตุรูบิเดียม 85 [6] โดยการสร้างเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกแบบใช้ฟิลเตอร์นั้นจะให้แสงเลเซอร์สะท้อนกระจก (Cateye reflector) เข้าไปที่ไดโอดเลเซอร์ เพื่อทำการเพิ่มการกระตุ้นไดโอดเลเซอร์ โดยมีอุปกรณ์ที่ช่วยในการปรับระยะน้อยๆ ของกระจกโพรงภายนอกเรียกว่า เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) และใช้ฟิลเตอร์กรองความยาวคลื่นของไดโอดเลเซอร์ให้เหลือเพียง 780.24 nm แต่การใช้ฟิลเตอร์กรองแสงก็ส่งผลให้ต้องเสียความเข้มแสงบางส่วนไป เมื่อลำแสงเลเซอร์ที่ออกมามีความยาวคลื่นที่ใกล้เคียงกับความยาวคลื่นสั้นพ้องของธาตุรูบิเดียมแล้ว จะทำการยิงแสงเลเซอร์นี้เข้าไปที่หลอดแก้วที่บรรจุของธาตุรูบิเดียม (Rb cell) เพื่อสังเกตการดูดกลืนแสงของธาตุรูบิเดียม



รูปที่ 1 แผนผังเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกแบบสองโพลาไรซ์ [7]

จากการศึกษาเกี่ยวกับการสร้างเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอก (External cavity diode laser (ECDL)) พบปัญหาคือ ค่าใช้จ่ายในการสร้างที่ค่อนข้างสูง และความไม่เสถียรของ ECDL ไม่ว่าจะเป็น อุณหภูมิ ระยะของโพรงภายนอกที่มากเกินไป (Cavity length) หรือกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ ไดโอดเลเซอร์ที่ไม่คงที่ ทำให้ไม่สามารถได้ความยาวคลื่นที่เสถียร[2] จึงได้มีการพัฒนา ECDL ให้สามารถล็อกความยาวคลื่นให้อยู่เป็นเวลานาน ตัวอย่างเช่น การสร้างเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกแบบสองโพลาไรซ์ดังรูปที่ 1 [7] ซึ่งสามารถให้เลเซอร์ล็อกความยาวคลื่นได้เป็นเวลามากที่สุดถึง 2 วัน หรือการออกแบบสร้างกล่องควบคุมอุณหภูมิสำหรับล็อกความยาวคลื่นสามารถล็อกได้เป็นเวลานาน 110 วัน ดังรูปที่ 2 [8]



รูปที่ 2 (a) แผนผังด้านข้างของ IF-ECDL และ (b) กล่องควบคุมอุณหภูมิสำหรับล็อกความยาวคลื่น [8]

ในงานวิจัยนี้จะทำการลดค่าใช้จ่ายการสร้างเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกโดยไม่ใช้ฟิลเตอร์กรองแสง ซึ่งช่วยลดระยะของโพรงภายนอกและความเข้มแสงที่ต้องเสียไปจากการใช้ฟิลเตอร์กรองแสง และ ต้องมีความยาวคลื่นที่เสถียรและสั้นพ้องกับธาตุรูบิเดียมที่ 780.24 nm สามารถล็อกความยาวคลื่นที่ต้องการได้อย่างน้อย 1 ชั่วโมง เพียงพอต่อการทำการทดลองอะตอมเย็น (Cold atom) ทั้งนี้ได้สร้าง วงจรควบคุมความยาวคลื่นของ ECDL และวงจรควบคุมอุณหภูมิของเลเซอร์ให้คงที่เป็นเวลานานมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ จากค่าที่ตั้งไว้

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาออกแบบและสร้างเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกแบบไม่มีฟิลเตอร์กรองแสง

1.2.2 เพื่อปรับความยาวคลื่นของไดโอดเลเซอร์จาก 785 nm เป็น 780.24 nm

1.2.3 เพื่อศึกษาการดูดกลืนพลังงานของธาตุรูบิเดียมที่ความยาวคลื่น 780.24 nm เพื่อนำไปใช้กับการทดลองอะตอมเย็น (Cold Atom)

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 สร้างต้นแบบเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกแบบไม่มีฟิลเตอร์กรองแสง ที่มีความยาวคลื่นสั้นพ้องกับธาตุรูบิเดียมที่ 780.24 nm และสามารถล็อกความยาวคลื่นให้คงที่อย่างน้อย 1 ชั่วโมง

1.3.2 ศึกษาและเก็บผลทดลองการดุดกลืนพลังงานของธาตุรูบิเดียม

1.3.3 สามารถควบคุมอุณหภูมิให้มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่า 0.1 C°

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 วิธีการสร้างเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกแบบไม่มีฟิลเตอร์กรองแสง

1.4.2 ต้นแบบอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิสำหรับหล่อเย็นให้กับไดโอดเลเซอร์

1.4.3 ได้รับความรู้เกี่ยวกับการดุดกลืนพลังงานของธาตุรูบิเดียมกับแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 780.24 nm



บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้ศึกษาวิทยานิพนธ์มีความสนใจในการสร้างเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกแบบไม่ใช้ฟิลเตอร์กรองแสง ที่จะสามารถลดต้นทุนการสร้าง ECDL ได้ โดยแสงที่ได้รับต้องตรงกับความยาวคลื่นสั้นพ้องของธาตุรูบิเดียมที่ 780.24 nm เพื่อสังเกตการดูดกลืนพลังงานของธาตุรูบิเดียมในหลอดแก้ว (Vapor cell) นอกจากนี้ยังมีการสร้างอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิและระยะกระจกของโพรงภายนอก ซึ่งจะมีหัวข้อดังต่อไปนี้

1. เลเซอร์และองค์ประกอบของเลเซอร์
2. ลักษณะเฉพาะและหลักการของเลเซอร์
3. ไดโอดเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกแบบใช้เกรตติง
4. ไดโอดเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกแบบใช้ฟิลเตอร์
5. การสั้นพ้องและการดูดกลืนพลังงานของธาตุรูบิเดียม

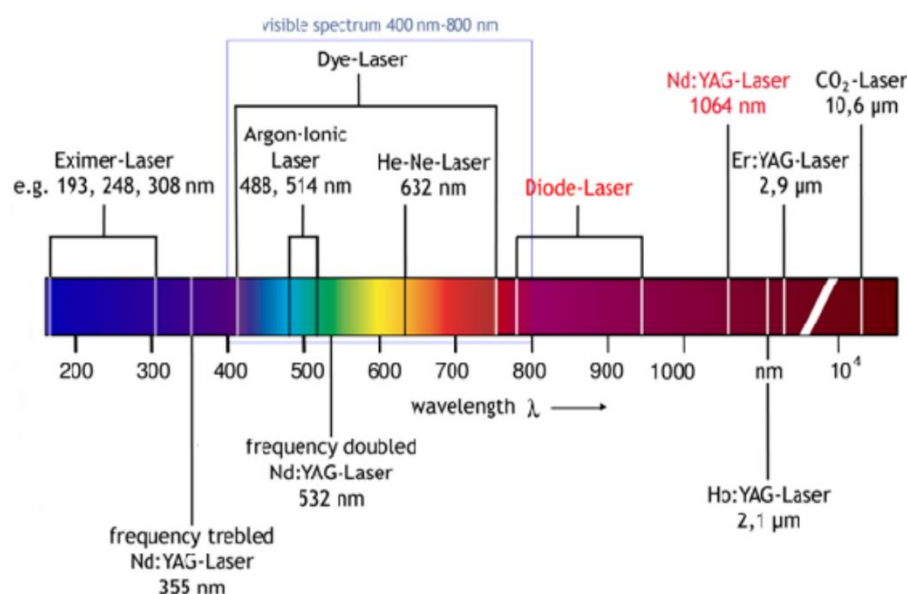
2.2 เลเซอร์และองค์ประกอบของเลเซอร์

ในปี 1917 อัลเบิร์ต ไอน์สไตน์ได้คิดค้นทฤษฎีการแผ่รังสี (Einstein's theory of radiation) ซึ่งเป็นทฤษฎีพื้นฐานที่อธิบายหลักการทำงานของเลเซอร์ โดยทฤษฎีได้แบ่งกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกเป็น 3 ประเภทคือ การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการกระตุ้น (stimulated absorption) การปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยธรรมชาติ (spontaneous emission) และการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการกระตุ้น (stimulated emission) [9] ในปี 1957 ทฤษฎีการแผ่รังสีของไอน์สไตน์ได้ถูกพิสูจน์โดยการสร้างเลเซอร์ขึ้นจริงโดย ทาวนส์ [10] และไมแมน โดยคำว่าเลเซอร์ (Laser) ย่อมาจาก Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation ซึ่งเลเซอร์เครื่องแรกของไมแมนผลิตจากตัวกลางของแข็งจากผลึกรูบี้ [11] มีองค์ประกอบที่สำคัญของเลเซอร์ ดังรูปที่ 4.

2.2.1 ตัวกลาง (Lasing medium)

คือธาตุต่างๆ ที่กำหนดลักษณะของเลเซอร์ ตัวอย่างเช่นความยาวคลื่น ความถี่หรือความเข้มแสงของเลเซอร์ ซึ่งจะถูกปลดปล่อยออกมาหลังจากการถูกกระตุ้นโดยแหล่งพลังงานภายนอก โดยตัวกลางของเลเซอร์จะมีอยู่ด้วยกันหลากหลายชนิดทำให้ได้ประเภทของเลเซอร์ตามชนิดของตัวกลาง

ได้แก่ เลเซอร์สถานะของแข็ง (Solid-State Lasers) เลเซอร์ของเหลว (Liquid Lasers) เลเซอร์แก๊ส (Gas Lasers) และเลเซอร์กึ่งตัวนำ (Semiconductor Lasers หรือ Laser Diodes) เป็นต้น ซึ่งลักษณะของตัวกลางที่แตกต่างกันนี้จะให้ความยาวคลื่นที่แตกต่างกันไปตั้งแต่ความยาวคลื่นในช่วงอุลตราไวโอเลตจนถึงช่วงอินฟราเรด ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ตัวกลางชนิดต่างๆ ในช่วงความยาวคลื่นที่ต่างกัน [12]

2.2.3 แหล่งพลังงานกระตุ้นภายนอก (Pump source)

คือแหล่งพลังงานภายนอกที่จะใช้ในการกระตุ้นตัวกลางจากสถานะพื้นไปเป็นสถานะถูกกระตุ้นก่อให้เกิดกระบวนการประชากรผกผัน (Population inversion) นั่นคือ มีจำนวนอิเล็กตรอนอยู่ในสถานะการถูกกระตุ้นมากกว่าสถานะพื้น โดยแหล่งพลังงานภายนอกนี้อาจเป็นพลังงานความร้อน พลังงานไฟฟ้า หรือ พลังงานแสง โดยที่พลังงานภายนอกจำเป็นต้องมีพลังงานเท่ากับพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของตัวกลางไปยังสถานะถูกกระตุ้น

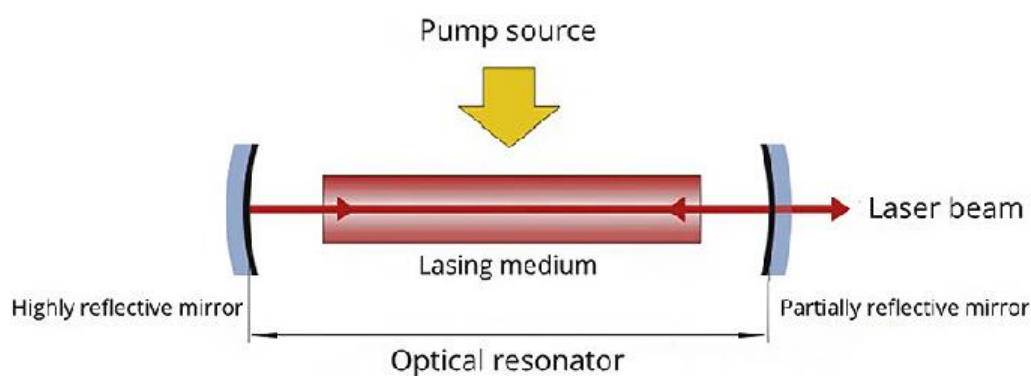
2.2.3 ออปติคอลเรโซเนเตอร์ (Optical resonator)

จะทำหน้าที่ในการสะท้อนแสงที่เกิดจากตัวกลาง ทำให้เกิดการสะท้อนภายในควาติดังรูปที่ 4 เพื่อทำการกระตุ้นตัวกลางซ้ำๆ หลายๆ ครั้งก่อนที่จะปล่อยแสงเลเซอร์ที่มีความเข้มสูงขึ้นออกมาภายนอก โดยสำหรับเรโซเนเตอร์นี้จะใช้กระจกสองด้าน ด้านหนึ่งจะสะท้อนแสงได้ทั้งหมด (Highly

reflective mirror) อีกด้านสะท้อนแสงได้บางส่วน (Partially reflective mirror) ซึ่งแสงที่ผ่านกระจกบางส่วนไปได้นั้นคือลำแสงเลเซอร์ที่ถูกนำไปใช้งาน

2.2.4 ระบบหล่อเย็น (Cooling system)

เป็นอุปกรณ์ภายนอกที่มีความสำคัญในการทำงานของเลเซอร์ โดยจากการที่ตัวกลางถูกกระตุ้นโดยแหล่งพลังงานภายนอกอาจเกิดความร้อนขึ้นภายในเรโซเนเตอร์จะทำให้เลเซอร์มีประสิทธิภาพลดลง จึงจำเป็นต้องมีการใช้ระบบหล่อเย็นเข้าช่วย โดยวิธีการหล่อเย็นนี้มีหลายแบบ เช่น การใช้อากาศ การใช้ระบบไหลเวียนของน้ำ หรือ การใช้แผ่นทำความเย็นที่อาศัยปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric effect)



รูปที่ 4 องค์ประกอบที่สำคัญของเลเซอร์ [13]

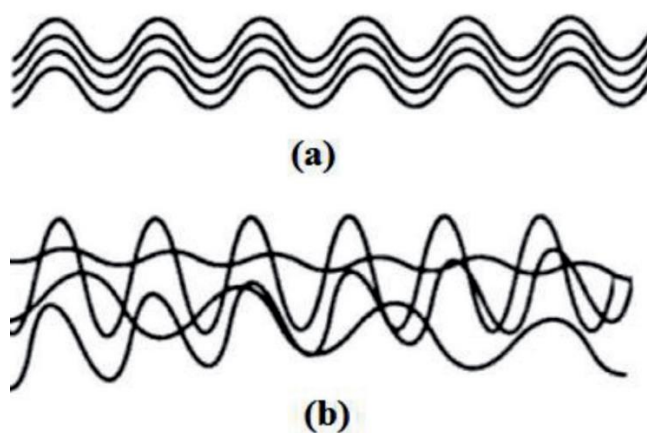
2.3 ลักษณะเฉพาะและหลักการของเลเซอร์

คุณลักษณะของแสงเลเซอร์ที่ทำให้แตกต่างจากแสงโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ลักษณะคือ มีความยาวคลื่นเดียว มีหน้าคลื่นคงที่สม่ำเสมอ มีทิศทางที่แน่นอน และมีความเข้มสูงหรือมีจำนวนโฟตอนต่อพื้นที่สูง โดยสามารถเรียกรวมๆ คุณลักษณะทั้ง 3 ลักษณะที่กล่าวมาข้างต้นนี้ได้ว่า คุณสมบัติโคฮีเรนต์ (coherent) หลักการของการเกิดเลเซอร์สามารถถูกอธิบายโดย ทฤษฎีการแผ่รังสีของไอน์สไตน์ (Einstein's theory of radiation) [9]

2.3.1 โคฮีเรนต์ (coherent)

แหล่งกำเนิดแสงที่พบได้ในปัจจุบันสามารถแยกออกได้เป็น 2 ชนิด คือ แหล่งกำเนิดแสงที่ไม่มีความเป็นโคฮีเรนต์ (Incoherent light) และแหล่งกำเนิดแสงที่มีความเป็นโคฮีเรนต์ (Coherent

light) แสดงที่ดังรูปที่ 5 ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับเลเซอร์ คือความเป็นโคฮีเรนต์ของแสง ประกอบด้วยโคฮีเรนต์มีทั้งตามยาว และโคฮีเรนต์ตามขวาง (longitudinal and transverse coherence) โดยโคฮีเรนต์ตามยาวจะหมายถึงการมีความยาวคลื่นเดียวของแสงเลเซอร์ ส่วนโคฮีเรนต์ตามขวางจะเกี่ยวข้องกับเฟสหรือหน้าคลื่นของแสงที่มีความเป็นระเบียบสม่ำเสมอและคงที่ตลอดจนกว่าจะเกินระยะทางของความเป็นโคฮีเรนต์ตามขวาง (coherent length)

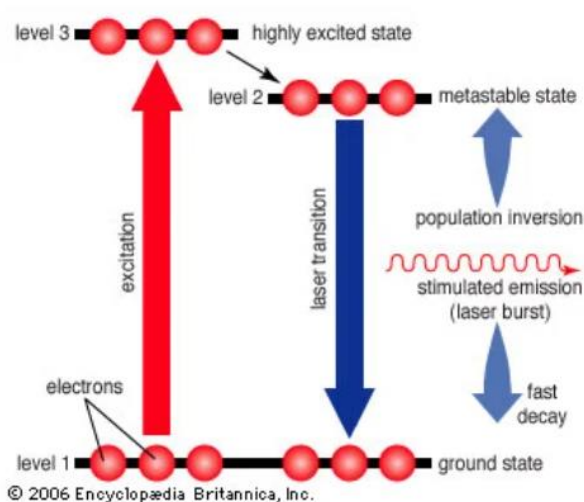


รูปที่ 5 (a) ตัวอย่างแสงที่มีความเป็นโคฮีเรนต์ (Coherent light) และ (b) ตัวอย่าง แสงที่ไม่มีความเป็นโคฮีเรนต์ (Incoherent light) [14]

2.3.2 การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการกระตุ้น (absorption)

จากหัวข้อ 2.2.3 ได้อธิบายว่าแหล่งพลังงานภายนอกจำเป็นต้องมีพลังงานพอดีกกับพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานของตัวกลางจากสถานะพื้น (E_1) ไปยังสถานะการกระตุ้น (E_2) ดังแผนผังรูปที่ 7 ซึ่งเป็นระดับชั้นพลังงานแบบสองระดับ (two energy levels) โดยจะต้องใช้พลังงานภายนอกที่เข้าไปกระตุ้นมีค่า $E_2 - E_1 = h\nu$ เมื่อ h คือค่าคงที่ของพลังค์ 6.626×10^{-34} Js (Planck's constant) และ ν คือความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จึงจะสามารถทำให้อะตอมของตัวกลางเปลี่ยนชั้นพลังงานจากสถานะพื้นไปยังสถานะถูกกระตุ้นได้ เมื่อผ่านกระบวนการการดูดกลืนโดยการกระตุ้นนี้แล้วอะตอมจำนวนมากจะขึ้นไปอยู่ที่สถานะกระตุ้นสามารถเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ประชากรผกผัน (Population inversion) ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้ธาตุที่มีโครงสร้างอะตอมอย่างน้อย 3 สถานะ (three-state atoms) แสดงดังรูปที่ 6 โดยอิเล็กตรอนภายในอะตอมจะถูกกระตุ้นจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นที่มีระดับชั้นพลังงานสูงสุด (ชั้นพลังงานที่ 3) ผ่านการใช้แหล่งพลังงาน

ภายนอก ซึ่งที่สถานะนี้อะตอมจะไม่เสถียรและอิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานสู่ระดับชั้นพลังงานที่มีพลังงานลดหลั่นลงมา (ชั้นพลังงานที่ 2) อย่างรวดเร็ว ถ้าอัตราการเปลี่ยนแปลงชั้นพลังงานจากชั้นที่ 2 ไปชั้นที่ 1 น้อยกว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงชั้นพลังงานจากชั้นที่ 3 ไปชั้นที่ 2 แล้ว อิเล็กตรอนจะสะสมอยู่ที่ระดับชั้นพลังงานที่ 2 มากกว่าที่สถานะพื้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ประชากรผกผัน (population inversion) เมื่ออิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานจากชั้นพลังงานที่ 2 สู่สถานะพื้น เกิดขึ้น อิเล็กตรอนจำนวนมากจะถูกเหนี่ยวนำกลับเข้าสู่สถานะพื้นพร้อม ๆ กันโดยอาศัยกระบวนการการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการกระตุ้น (stimulated emission) เปล่งแสงเลเซอร์ที่มีความเป็นโคฮีเรนต์



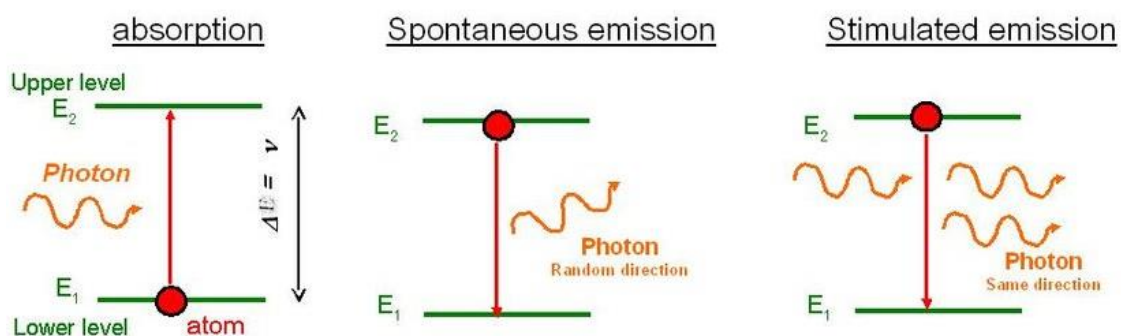
รูปที่ 6 แสดงอะตอมที่มี 3 สถานะที่สามารถให้แสงเลเซอร์ [15]

2.3.3 การแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยธรรมชาติ (spontaneous emission)

อะตอมที่สถานะกระตุ้น (E_2) จะไม่เสถียร และจะเปลี่ยนชั้นพลังงานกลับมาสู่สถานะพื้น (E_1) แล้วปลดปล่อยพลังงานในรูปแบบของโฟตอนได้เอง แต่โฟตอนที่ได้นั้น จะมีทิศทาง หน้คลื่น หรือเฟส พลังงาน ความถี่ และโพลาไรเซชันไม่แน่นอน หรือสามารถเรียกว่าโฟตอนไม่มีคุณสมบัติโคฮีเรนต์ (incoherent) เพราะฉะนั้นโฟตอนที่เกิดจากกระบวนการนี้ จึงไม่ถือว่าเป็นแสงเลเซอร์

2.3.4 การแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการกระตุ้น (stimulated emission)

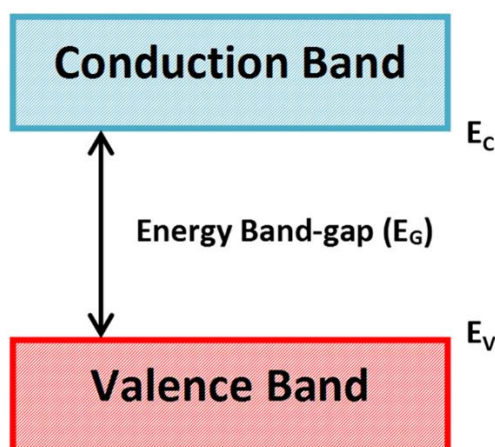
อะตอมที่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นจะทำอันตรกิริยากับแสงโฟตอนภายนอก ทำให้อะตอมนี้ปลดปล่อยโฟตอนออกมาใหม่ ซึ่งมีคุณสมบัติเหมือนโฟตอนภายนอกทุกประการ ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 กระบวนการอธิบายการแผ่พลังงานของอะตอม โดยลูกศรสีแดงบอกถึงการเลื่อนชั้นพลังงานของอะตอม [16]

2.3.5 ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ (Energy band gap of semiconductor)

ในสารกึ่งตัวนำมีอะตอมหลายอะตอมอยู่ใกล้ชิดกัน จึงทำให้วงโคจรของอิเล็กตรอนหรือระดับพลังงานของอิเล็กตรอนมีการเปลี่ยนแปลงจากระดับพลังงานจะกลายเป็นแถบพลังงานแสดงดังรูปที่ 8 โดยอิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ (Valence band) สามารถข้ามไปยังแถบตัวนำ (Conduction band) จะต้องมีพลังงานที่เท่ากับ Energy Band Gap (E_G)



รูปที่ 8 แผนผังของแถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำ

ซึ่ง E_G นั้นสามารถเพิ่มหรือลดพลังงานได้โดยการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และแถบพลังงาน ดังสมการที่ 1

$$E_G = E_0 - \frac{\alpha T^2}{(T + \beta)} \quad (1)$$

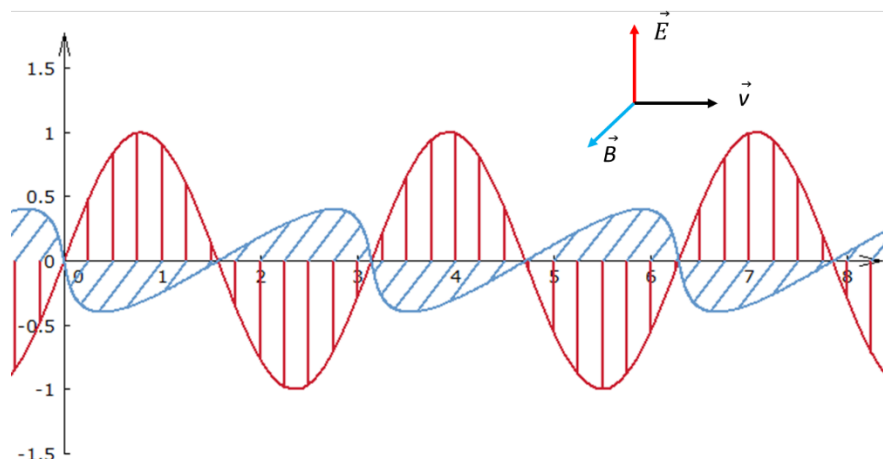
เมื่อ E_G คือ Energy band gap , E_0 คือ แถบพลังงานจำกัดที่อุณหภูมิ 0 K , T คือ อุณหภูมิใดๆ α , และ β คือ ค่าคงที่ของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ โดยสมการของ Energy band gap นี้สามารถนำมาใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนความยาวคลื่นของไดโอดเลเซอร์ได้ โดยจะใช้ร่วมกับ สมการของพลังค์ (Planck's Equation) ที่เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระดับขนาดที่เล็กมากๆ สำหรับอนุภาคอย่างเช่น อิเล็กตรอนและโฟตอน ดังสมการที่ 2

$$\lambda = \frac{hc}{E_G} \quad (2)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นชั้นพลังงาน E_G , h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (6.626×10^{-34} J.s) และ คือ ความเร็วของแสงในสุญญากาศ (2.997×10^8 m/s)

2.3.5 โพลาริเซชันของแสงเลเซอร์ (Polarization of Laser light)

คลื่นทุกชนิดไม่ว่าจะเป็นคลื่นตามยาวหรือคลื่นตามขวางจะมีปรากฏการณ์การแทรกสอด และการเลี้ยวเบนได้ ในขณะที่แสงที่มีโพลาริเซชัน (Polarization) เกิดได้เฉพาะกับคลื่นตามขวาง (transverse wave) เท่านั้น ซึ่งแสงเลเซอร์คือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic waves) ที่ ประกอบด้วยสนามแม่เหล็ก (ฟ้า) และสนามไฟฟ้า (แดง) เคลื่อนที่ท่ามมั่งคั่งฉากกันแสดงดังรูปที่ 9 [17] โดยโพลาริเซชันของแสง



รูปที่ 9 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือคลื่นแสงที่มี $\vec{E}$ คือสนามไฟฟ้า $\vec{B}$ คือ สนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกัน และ $\vec{v}$ คือ ทิศทางความเร็วของการเคลื่อนที่ [17]

เมื่อพิจารณาแสงโพลาไรเซชันเชิงเส้นตามแนวการสั่นของสนามไฟฟ้าเท่านั้น ที่มีทิศทางการสั่นเป็นคลื่นสลับขึ้นลง นั่นคือ ปรากฏการณ์โพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นเฉพาะกับคลื่นตามขวางเท่านั้น จะมี โพลาไรเซชันเชิงเส้นในแนวตั้ง โพลาไรเซชันเชิงเส้นในแนวราบ โพลาไรเซชันเชิงเส้นหมุนซ้าย และโพลาไรเซชันเชิงเส้นหมุนขวา แสดงดังรูปที่ 9 และจะมีสมการเชิงเส้นในแนวราบ และแนวตั้งดังนี้

$$\vec{E}_x = E_{0x} \sin(\omega t - kz + \phi_0) \hat{i} \quad (3)$$

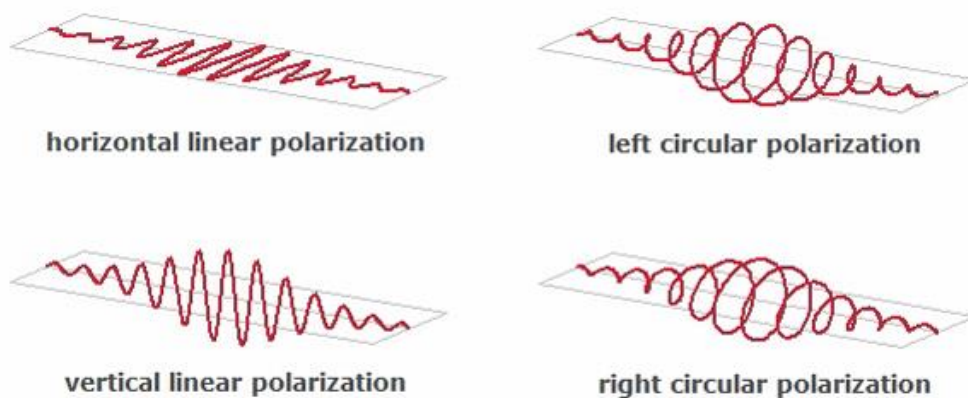
$$\vec{E}_y = E_{0y} \sin(\omega t - kz + \phi_0) \hat{j} \quad (4)$$

เมื่อ E_{0x} และ E_{0y} คือแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้า โดยมี $\hat{i}$ และ $\hat{j}$ คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยตามแนวแกน x และ y ตามลำดับ ϕ เป็นค่าคงที่ของเฟส โดยมีความถี่เชิงมุมคือ $\omega = 2\pi\nu$ และมีเลขคลื่น คือ $k = 2\pi/\lambda$ แสงโพลาไรเซชันเชิงเส้นหมุนซ้าย และโพลาไรเซชันเชิงเส้นหมุนขวา สามารถอธิบายได้ด้วยสมการดังนี้

$$\vec{E}_{RCP} = E_0 [\sin(\omega t - kz + \phi_0) \hat{i} + \cos(\omega t - kz + \phi_0) \hat{j}] \quad (5)$$

$$\vec{E}_{LCP} = E_0 [\sin(\omega t - kz + \phi_0) \hat{i} - \cos(\omega t - kz + \phi_0) \hat{j}] \quad (6)$$

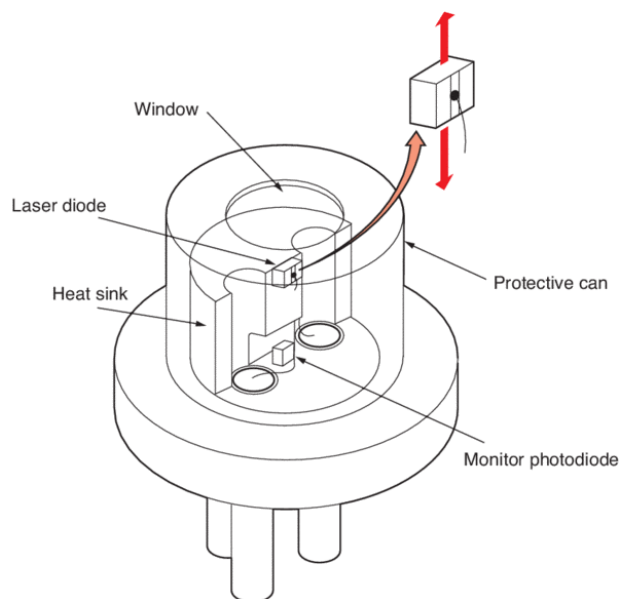
เมื่อ $\vec{E}_{RCP}$ และ $\vec{E}_{LCP}$ คือ โพลาริเซชันเชิงเส้นหมุนขวา และซ้าย ตามลำดับ



รูปที่ 10 โพลาริเซชันของแสงเลเซอร์ที่มีลักษณะแตกต่างกัน คือ โพลาริเซชันเชิงเส้นในแนวราบ (Horizontal polarization) โพลาริเซชันเชิงเส้นในแนวตั้ง (Vertical polarization) โพลาริเซชันเชิงเส้นหมุนซ้าย (Left circular polarization) และโพลาริเซชันเชิงเส้นหมุนขวา (Right circular polarization) [17]

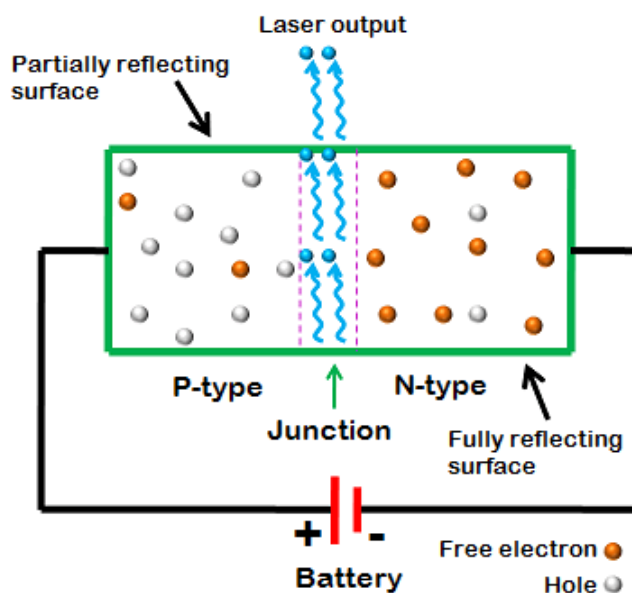
2.4 ไดโอดเลเซอร์

ไดโอดเลเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่บรรจุสารกึ่งตัวนำที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ ซึ่งใช้ทฤษฎีการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการกระตุ้น (stimulated emission) เป็นพื้นฐานในการสร้างแสงเลเซอร์ โดยไดโอดเลเซอร์จะใช้แรงดันไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานกระตุ้นภายนอก (Pump source) ประกอบไปด้วย กระจกหน้าต่าง (Window) ทำหน้าที่ให้แสงเลเซอร์ออกมาจากเลเซอร์ไดโอด แหล่งรับความร้อน (Heat sink) ก่อป้องกันไดโอดเลเซอร์ (Protective can) และโฟโตไดโอดที่ใช้สำหรับตรวจสอบความเข้มของไดโอดเลเซอร์ (Monitor photodiode) แสดงดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 แผนผังองค์ประกอบของเลเซอร์ไดโอด [18]

โดยการเกิดแสงเลเซอร์ คือ มีการโดปสารกึ่งตัวนำให้มีชนิด P-type และ N-type เมื่อแหล่งพลังงานกระตุ้นภายนอกหรือแรงดันไฟฟ้าไหลผ่านไดโอดเลเซอร์ ส่งผลให้อิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนตัวจาก N-type ไปยัง P-type โดยในระหว่างกระบวนการนี้จะมีอิเล็กตรอนอิสระบางส่วนทำอันตรกิริยากับเวเลนซ์อิเล็กตรอน (Valence electron) ของสารกึ่งตัวนำ ส่งผลให้เปลี่ยนสถานะจากพื้นสู่สถานะการถูกกระตุ้น และปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาเมื่อกลับมายังสถานะพื้นอีกครั้ง เรียกกระบวนการนี้ว่าการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยธรรมชาติ (spontaneous emission) โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือโฟตอนจากกระบวนการดังกล่าวจะทำอันตรกิริยากับแหล่งกำเนิดพลังงานภายนอก ส่งผลให้มีโฟตอนออกมาเป็นคู่แฝดที่มีคุณสมบัติเหมือนกันกับแหล่งกำเนิดพลังงานภายนอกทุกประการ เรียกกระบวนการนี้ว่าการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการกระตุ้น (stimulated emission) โดยจะอยู่ในพื้นที่ของจังก์ชัน (Junction region) ซึ่งสารกึ่งตัวนำนี้ที่ด้านขอบสามารถจะสะท้อนโฟตอนจากกระบวนการนี้ได้ โดยสะท้อนด้านหนึ่งทั้งหมด และอีกด้านหนึ่งจะสะท้อนโฟตอนได้แค่บางส่วนเพื่อนำโฟตอนออกไปใช้งานเป็นแสงเลเซอร์ต่อไป ดังที่แสดงในรูปที่ 12



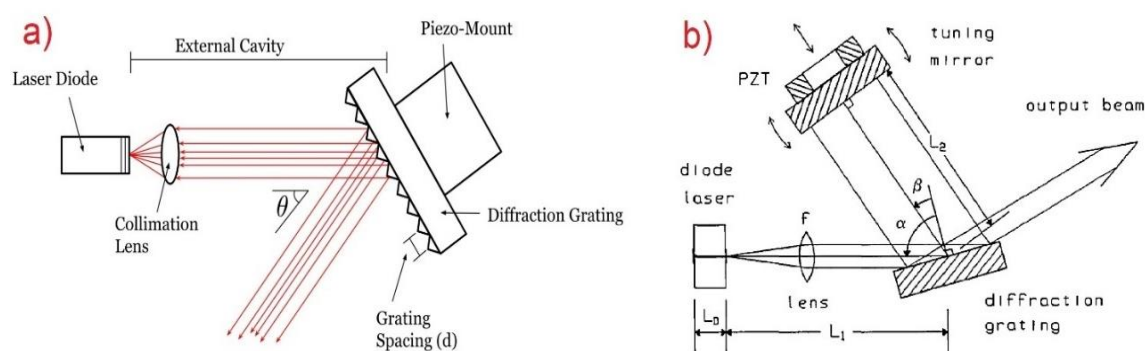
รูปที่ 12 แผนผังองค์ประกอบ PN-Junction ของไดโอดเลเซอร์ [19]

2.4 ไดโอดเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกแบบใช้เกรตติง

การสร้างเลเซอร์ชนิดปรับความยาวคลื่นได้นั้นในเริ่มแรกมีการพัฒนาโดยใช้เกรตติง ซึ่งสามารถเรียกระบบเลเซอร์แบบนี้ได้ว่า ลิตโตรว์ (Littrow configuration) [20] ดังรูปที่ 13(a) และ ลิตมัน-เมทคาล์ฟ (Littman-Metcalf configuration) [21] ดังรูปที่ 13(b) ทั้งสองวิธีจะใช้การแทรกสอดของแสงเลเซอร์ผ่านเกรตติง โดยทั่วไปจะใช้แสงเลเซอร์ที่เกิดจากรีฟlection การแทรกสอดแสงเลเซอร์อันดับแรก (First-order diffraction) สะท้อนกระจกกลับเข้าหาไดโอดเลเซอร์ และแสงเลเซอร์ที่เกิดจากรีฟlection การแทรกสอดอันดับศูนย์ (Zeroth-order diffraction) ใช้เป็นลำแสงเลเซอร์ (Laser output) ในการนำไปใช้งาน การปรับความยาวคลื่นหรือความถี่ของเลเซอร์สามารถทำได้ด้วยการปรับมุมของกระจกในกรณีระบบเลเซอร์แบบลิตมัน-เมทคาล์ฟ หรือปรับมุมเกรตติงที่สะท้อนแสงในกรณีระบบเลเซอร์แบบลิตโตรว์ ผ่านการควบคุมด้วยเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric หรือ PZT) โดยความยาวคลื่นของเลเซอร์แบบลิตมัน-เมทคาล์ฟ (Littman-Metcalf configuration) [3] และเลเซอร์แบบ ลิตโตรว์ (Littrow configuration) [22] สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 7

$$\lambda_L = \frac{d}{m}(\sin\alpha + \sin\beta) \quad (7)$$

เมื่อ λ_L คือ ความยาวคลื่นของเลเซอร์ d คือ ระยะห่างระหว่างช่องเกรตติง m คือ ลำดับการแทรกสอดของแสง α คือ มุมที่สะท้อนกลับไปยังไดโอดเลเซอร์ และ β คือ มุมที่สะท้อนเข้าหากระจก ดังรูปที่ 13(b)



รูปที่ 13 (a) เลเซอร์ ลิตโทรว์ (Littrow configuration) [22] และ (b) เลเซอร์แบบ ลิตมัน-เมทคาล์ฟ (Littman-Metcalf configuration) [3]

ความแตกต่างระหว่างเลเซอร์แบบลิตโทรว์ และเลเซอร์แบบลิตมัน-เมทคาล์ฟ คือเลเซอร์แบบลิตมัน-เมทคาล์ฟจะสะท้อนแสงเลเซอร์ที่เกิดจากการแทรกสอดอันดับแรก (First order diffraction) ผ่านกระจกกลับไปเกรตติงและเข้าสู่ไดโอดเลเซอร์ ซึ่งต่างกับเลเซอร์แบบลิตโทรว์ที่สะท้อนแสงเลเซอร์การแทรกสอดอันดับแรกกลับเข้าสู่ไดโอดเลเซอร์ได้โดยตรง เลเซอร์แบบลิตมัน-เมทคาล์ฟ มีความซับซ้อนกว่าเลเซอร์แบบลิตโทรว์ เพราะต้องใช้อุปกรณ์ทางแสงมากขึ้น เช่น กระจกที่ใช้ในการสะท้อน และเกรตติงที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งระยะของควิตี้ที่มากขึ้นก็ส่งผลต่อความเสถียรของเลเซอร์ [7] แต่อย่างไรก็ตามทั้งสองวิธีที่ได้นำเสนอไปในข้างต้นมีความซับซ้อนและยากต่อการจัดวางตำแหน่ง (alignment) ของเกรตติง และสูญเสียผลลัพธ์ของแสงเลเซอร์ (Laser output) ไปกับการสะท้อนเกรตติงทำให้ความเข้มของแสงเลเซอร์ที่สามารถนำไปใช้งานได้ลดลง

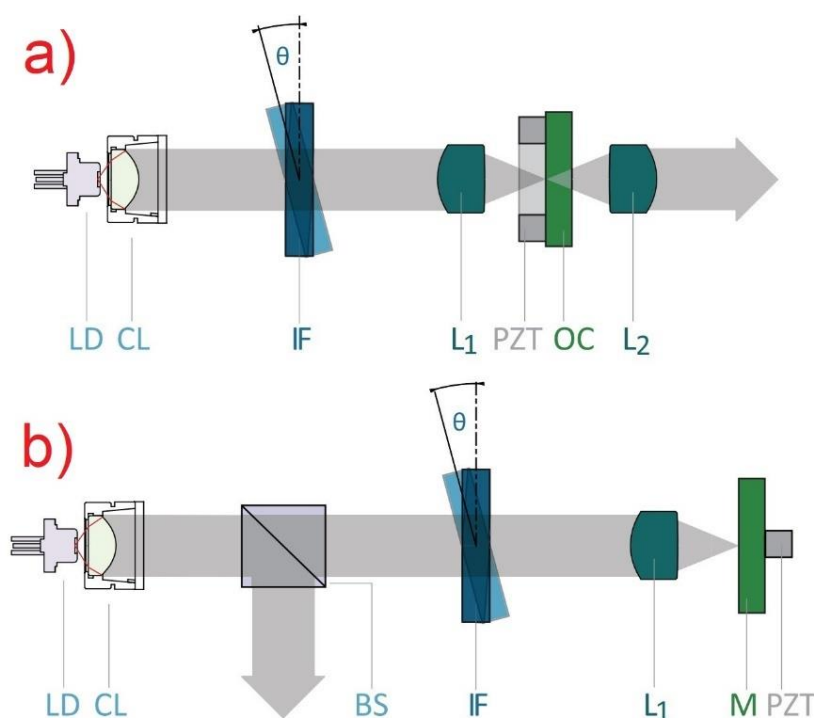
2.5 ไดโอดเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกแบบใช้ฟิลเตอร์

จากหัวข้อ 2.4 ได้มีการพัฒนาเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกแบบใช้เกรตติงที่สามารถปรับความยาวคลื่นได้แต่มีความซับซ้อนมากจึงได้มีการพัฒนาใหม่โดยการใช้ฟิลเตอร์กรองแสงแทนการใช้เกรต

ติง และใช้เลนส์แบบตาแมว (Cateye reflector) ดังรูปที่ 14 เลนส์ตาแมวนั้นเป็นชิ้นส่วนสำคัญที่ช่วยลดความผิดพลาดจากการจัดตำแหน่งของอุปกรณ์ต่างๆ ภายในโพรงภายนอกของเลเซอร์โดยจัดวางเลนส์ตาแมวให้ระยะโฟกัสของเลนส์ตาแมว (Cateye lens) ตกบนกระจกเพื่อสะท้อนแสงเลเซอร์กลับไปยังไดโอดเลเซอร์ ฟิลเตอร์กรองแสงทำหน้าที่คัดเลือกย่านความยาวคลื่นที่ต้องการโดยการหมุนระนาบของฟิลเตอร์กรองแสง จะได้ความยาวคลื่นดังสมการที่ 8 [2]

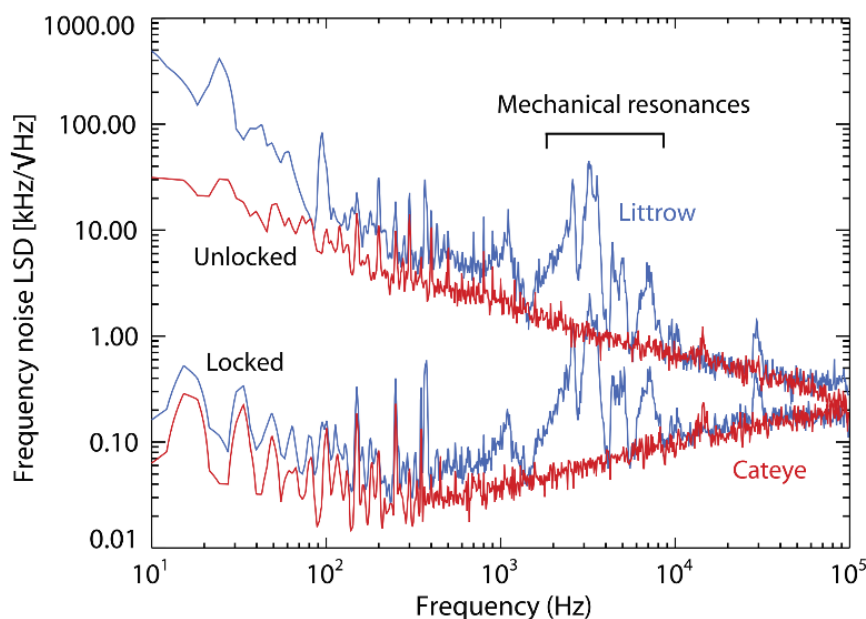
$$\lambda_{\theta} = \lambda_0 \sqrt{1 - \left(\frac{\sin\theta}{n_{eff}}\right)^2} \quad (8)$$

เมื่อ θ คือ มุมระนาบของฟิลเตอร์ λ_0 คือ ความยาวคลื่นเริ่มต้นของเลเซอร์ λ_{θ} คือ ความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่ผ่านฟิลเตอร์ n_{eff} คือ ดัชนีการหักเหของฟิลเตอร์กรองแสง



รูปที่ 14 แผนผังไดโอดเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกแบบใช้ฟิลเตอร์ [2] , a). ไดโอดเลเซอร์ (LD), เลนส์ทำลำขนาน (CL), ฟิลเตอร์กรองแสง (IF), เลนส์ตาแมว (L1), กระจกสะท้อนแสงบางส่วน (OC) ที่ติดอยู่กับเพียโซอิเล็กทริก (PZT), เลนส์ทำลำขนานอีกครั้ง (L2) และ b). ตัวแยกแสงชนิดลูกบาศก์ (BS), กระจกกระนาบ (M)

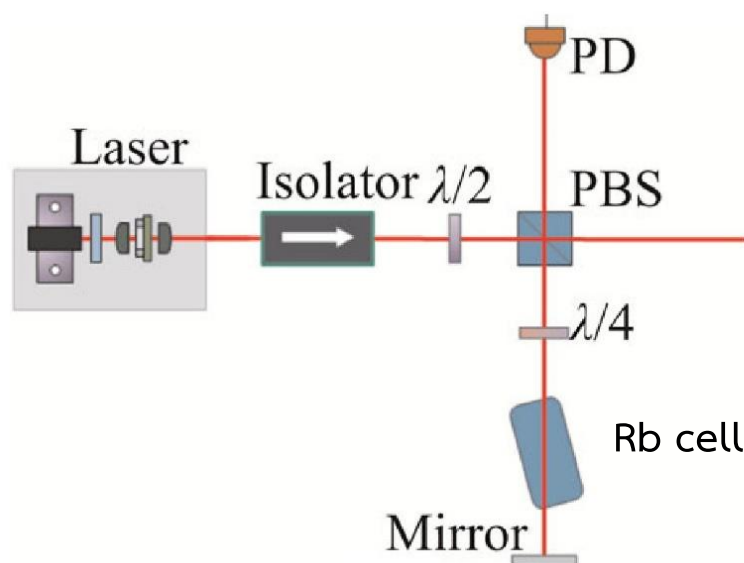
ระบบเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกแบบใช้ฟิลเตอร์มีการจัดตำแหน่งของอุปกรณ์ทางแสงแบบองค์ประกอบตาแมว (Cateye configuration) มีรูปแบบการแบ่งแสงเลเซอร์เพื่อนำไปใช้งานอยู่สองรูปแบบคือ แบบการใช้เอาต์พุตคัพเลอร์สะท้อนแสงเพียงบางส่วน (Output Coupler (OC)) และการใช้ตัวแยกแสงชนิดลูกบาศก์ (Beam Splitter (BS)) ดังรูปที่ 14 a) และรูปที่ 14 b) ตามลำดับ จากรูปที่ 14 a) แสงจากไดโอดเลเซอร์ถูกทำให้เป็นลำขนานโดยผ่านเลนส์ Collimated lens (CL) และผ่านฟิลเตอร์กรองแสง (Interference filter (IF)) โดยแสงที่มีความยาวคลื่นที่ต้องการ จะขึ้นกับการปรับมุมฟิลเตอร์กรองแสงตามสมการที่ 8 เมื่อแสงเลเซอร์มาถึงเลนส์ตาแมว L1 (Cateye lens) จะถูกโฟกัสตกลงกระจากควิตี้ที่ติดอยู่กับเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric (PZT)) โดยแสงเลเซอร์จะสะท้อนส่วนหนึ่งกลับไปหาไดโอดเลเซอร์ และอีกส่วนหนึ่งใช้เป็นแสงเลเซอร์ที่ออกมาจาก ECDL ซึ่งลำเลเซอร์นี้ถูกทำให้ขนานอีกครั้งเพื่อจะนำแสงเลเซอร์ไปใช้งานด้วยเลนส์ L2 จากรูปที่ 14 b) การออกแบบจะคล้ายกับวิธี a) แต่เปลี่ยนจากเอาต์พุตคัพเลอร์ (OC) มาเป็นการใช้ตัวแยกแสงชนิดลูกบาศก์ (BS) และใช้เลนส์ตาแมว L1 (Cateye lens) โฟกัสแสงลงบนกระจากควิตี้ที่สะท้อนแสงทั้งหมดกลับมาหาไดโอดเลเซอร์ ทำให้สามารถควบคุมระยะของกระจากควิตี้ได้โดยใช้เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric (PZT)) โดยจากงานวิจัยของ Thompson และ Scholten ได้อธิบายไว้ว่าการใช้การสะท้อนแสงเลเซอร์แบบตาแมว (Cateye reflector) นั้นช่วยให้ไลน์วิดท์ (Linewidth) ของ ECDL แคบลง [2] แต่อย่างไรก็ตามยังมีอีกหลายวิธีที่สามารถทำให้ไลน์วิดท์แคบลงได้อย่างเช่น การเพิ่มความเข้มแสงที่สะท้อนกลับไปหาไดโอดเลเซอร์ [22] หรือการลดระยะของควิตี้ [2] เป็นต้น และการลดระยะของควิตี้ยังสามารถเพิ่มความเสถียรของ ECDL ได้ [7] นอกจากนี้พวกเขายังได้ทำการทดลองเปรียบเทียบความเสถียรของเลเซอร์ 2 ชนิดระหว่างเลเซอร์แบบองค์ประกอบตาแมวกับเลเซอร์แบบลิทโทรว์ที่มีสัญญาณรบกวนเชิงกล (Mechanical disturbance) จากการสั่น โดยแสดงให้เห็นสัญญาณในขณะที่ล็อกความถี่ และไม่ได้ล็อกความถี่ของเลเซอร์ทั้ง 2 ซึ่งพวกเขาได้ข้อสรุปว่าเลเซอร์แบบองค์ประกอบตาแมวถูกรบกวนเชิงกลน้อยกว่าเลเซอร์แบบลิทโทรว์ แสดงได้ดังรูปที่ 15 [2]



รูปที่ 15 ผลเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนเชิงกลขององค์ประกอบตาแมวกับเลเซอร์แบบลิทโทรว์ [2]

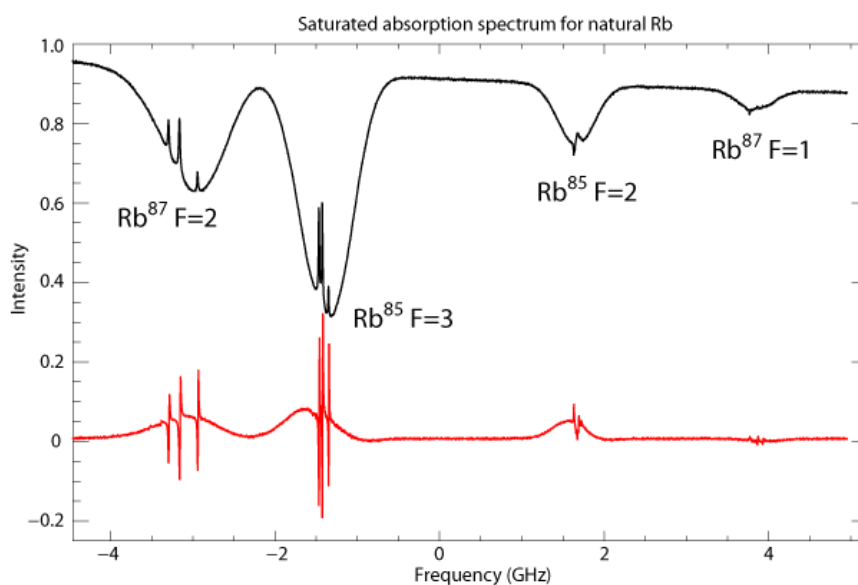
2.6 การสั่นพ้องและการดูดกลืนพลังงานของธาตุรูบิเดียม

ในงานวิจัยนี้ใช้การดูดกลืนพลังงานของธาตุรูบิเดียมเพื่อตรวจสอบความแม่นยำของความยาวคลื่นหรือความถี่ของ ECDL โดยใช้วิธี Doppler-free saturated absorption spectroscopy of rubidium มีการติดตั้งชุดอุปกรณ์ดังรูปที่ 16 [5] ซึ่งเป็นระบบเชิงแสงที่ใช้การดูดกลืนแสงเลเซอร์จาก ECDL ของธาตุรูบิเดียม รวมทั้งใช้ในการตรวจสอบว่า ECDL มีความเสถียรต่อการสั่นพ้องของธาตุรูบิเดียมที่ 780.24 nm หรือไม่ ถ้า ECDL ให้แสงเลเซอร์ที่ความยาวคลื่นสั่นพ้องแล้วหลอดแก้วรูบิเดียมจะเกิดการดูดกลืนแสงเลเซอร์ และในขณะเดียวกันก็จะเปล่งแสงในช่วงความยาวคลื่นอินฟราเรด ออกมา (Fluorescent) [6] โดยโฟโตไดโอด (PD) จะถูกใช้รับสัญญาณความเข้มแสงที่ผ่านการดูดกลืนของธาตุรูบิเดียม ดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 คือ การดูดกลืนสเปกโทรสโกปี(Absorption spectroscopy) ประกอบด้วย เลเซอร์ (Laser), ไอโซเลเตอร์ (Isolator), ฮาล์ฟเวฟเพลท ($\lambda/2$), ผลึกแยกแสงโพลาไรเซชัน (PBS), โฟโตไดโอด (PD), ควอเตอร์เวฟเพลท ($\lambda/4$), หลอดแก้วรูบิเดียม (Rb cell), กระจกเงา (Mirror) [5]

จากรูปที่ 16 เมื่อแสงออกจากเลเซอร์ (Laser) แล้วผ่านไอโซเลเตอร์ (Isolator) เพื่อป้องกันแสงย้อนกลับไปรบกวนไดโอดเลเซอร์ การกำหนดทิศทางและแบ่งความเข้มของแสงจะใช้แผ่นฮาล์ฟเวฟเพลท ($\lambda/2$) ร่วมกับผลึกแยกแสงโพลาไรเซชัน (PBS) โดยแสงที่มีโพลาไรเซชันแนวราบ (P-Polarization) ทะลุผ่าน PBS เพื่อนำออกไปใช้งาน และแสงที่มีโพลาไรเซชันแนวตั้ง (S-Polarization) สะท้อนเข้าสู่หลอดแก้วรูบิเดียม (Rb cell) โดยใช้แผ่นควอเตอร์เวฟเพลท ($\lambda/4$) เพื่อเปลี่ยนโพลาไรเซชันเชิงเส้นของแสงเลเซอร์ให้เป็นวงกลม สะท้อนกับกระจกเงา (Mirror) เพื่อเปลี่ยนโพลาไรเซชันของแสงให้หมุนวนอีกด้าน ส่งผลให้เมื่อแสงเลเซอร์ทะลุผ่านแผ่นควอเตอร์เวฟเพลท ($\lambda/4$) จะเปลี่ยนจากแสงโพลาไรเซชันวงกลมให้กลับมาเป็นเชิงเส้นอีกครั้ง แต่เปลี่ยนจากแสงที่มีโพลาไรเซชันแนวตั้ง (S-Polarization) ไปเป็นแสงที่มีโพลาไรเซชันแนวราบ (P-Polarization) ส่งผลให้แสงเลเซอร์ผ่าน PBS ไปยังโฟโตไดโอดเพื่อรับสัญญาณการดูดกลืนแสงเลเซอร์ของธาตุรูบิเดียมดังรูปที่ 17 โดยการผ่านหลอดแก้วรูบิเดียมในครั้งแรกแสงจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงในช่วงความถี่สั้นพองน้อยลง และการสะท้อนกลับจากกระจกเงาของแสง (Mirror) ให้ผ่านหลอดแก้วรูบิเดียมอีกครั้งจะเกิดยอดพิคเล็กๆ (Saturated absorption peak) เป็นเพราะว่าอะตอมธาตุรูบิเดียมที่อยู่บนสถานะถูกกระตุ้น ไม่สามารถถูกกระตุ้นซ้ำจากแสงความยาวคลื่นเดิม



รูปที่ 17 แลบบการดูดกลืนสเปกตรัมของธาตุรูบิเดียมที่มีความถี่ต่างๆ [23]

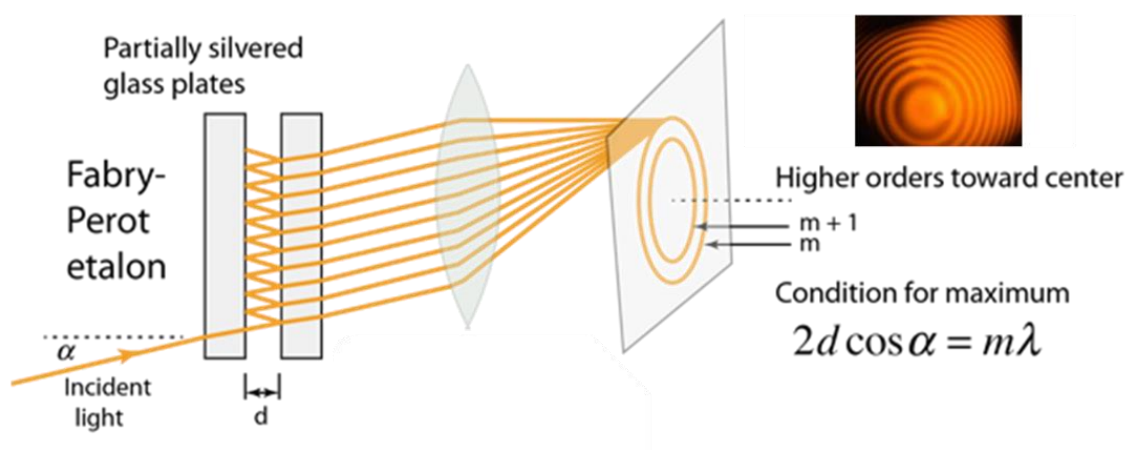
เส้นสีดำในรูปที่ 17 แสดงแลบบการดูดกลืนสเปกตรัมของธาตุรูบิเดียม (Saturated absorption spectra of D2 transition in Rb) ที่มีความถี่ประมาณ 8 GHz ซึ่งสามารถเปลี่ยนความถี่ได้โดยใช้การสแกนระยะกระจากคาร์ดิผ่านเพียโซอิเล็กทริกของ ECDL โดยแลบบการดูดกลืนจะมีรูปร่างแตกต่างกันออกไปอย่างชัดเจน และเส้นสีแดงคือ อนุพันธ์ของแลบบการดูดกลืนสเปกตรัมของธาตุรูบิเดียม

2.7 ฟาบริ-เปร์อต อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (Fabry-Pérot interferometer)

ฟาบริ-เปร์อต อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ เกิดขึ้นในปี 1899 โดย ชาร์ลส์ ฟาบริ และอัลเฟรด เปโรต์ [24] ใช้กระจก 2 บานวางขนานกัน และให้แสงเลเซอร์เกิดการสะท้อนภายในกระจกทั้ง 2 จนเกิดการเปลี่ยนเฟสของแสงทำให้เกิดการแทรกสอดขึ้นดังรูปที่ 18 โดยแสงที่เกิดจากการแทรกสอดของวิธีดังกล่าว จะคล้ายการแทรกสอดของเกรตติงหรือสลิตที่มีความละเอียดสูง ซึ่งสามารถใช้ในการตรวจสอบความแม่นยำของความยาวคลื่นได้ โดยอันดับของรีฟlection การแทรกสอดจะมีค่าสูงสุดที่บริเวณตรงกลางของรีฟlection การแทรกสอด และตำแหน่งของรีฟlection การแทรกสอดอันดับต่างๆ จะขึ้นกับมุมการกระทบ α สามารถเขียนสมการการแทรกสอดสำหรับการแทรกสอดแบบเสริมกันได้เป็น

$$2d \cdot \cos \alpha = m\lambda \quad (9)$$

เมื่อ d คือ ระยะระหว่างกระจกขนาน และ λ คือ ความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่ตกกระทบ ฟาบริ-เปร์อต อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์



รูปที่ 18 แผนผังฟาบริ-เปร์อต อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ [25]

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

จุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้คือการออกแบบและสร้างเลเซอร์ชนิดโพรงภายในแบบไม่มีฟิลเตอร์กรองแสงโดยต้องมีความยาวคลื่นสั้นพ้องกับธาตุรูบิเดียมที่ 780.24 nm และสามารถตรวจสอบได้โดยการติดตั้งระบบดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของธาตุรูบิเดียม (Absorption spectroscopy) มีวงจรไฟฟ้าที่ใช้ควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ เช่น วงจรควบคุมอุณหภูมิ วงจรรับข้อมูลการดูดกลืนของธาตุรูบิเดียม วงจรควบคุมระยะกระจากควิตี้ วงจรล็อคความยาวคลื่นของ ECDL และแหล่งควบคุมกระแสไฟฟ้าให้เลเซอร์ ทั้งหมดนี้เพื่อให้ ECDL มีความยาวคลื่นที่ 780.24 nm และสามารถถูกล็อคที่ความยาวคลื่นนี้เป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง

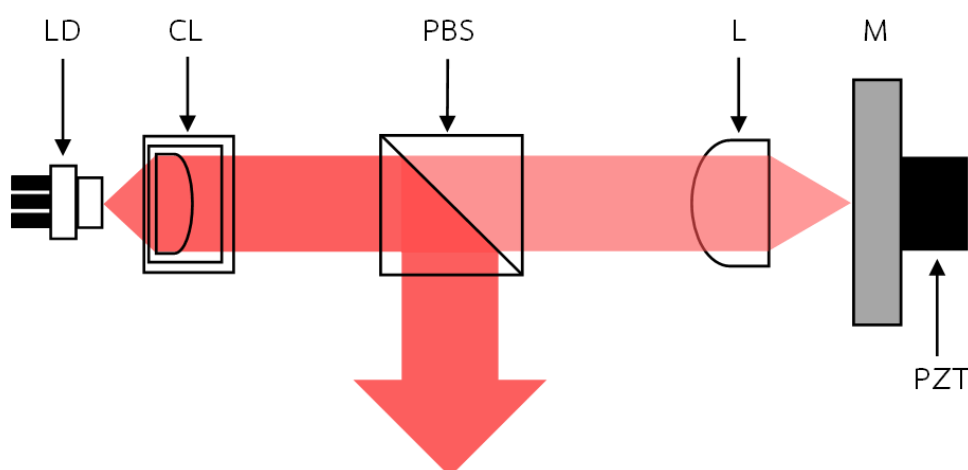
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้วิจัย

1. Laser diode (Thorlabs, L785H1)
2. Collimation tube (Thorlabs, LT110P-B)
3. Polarizing beam splitters (Thorlabs, PBS102)
4. Polarizing beam splitters (Thorlabs, PBS202)
5. Convex lens, $f = 4.5$ mm (Thorlabs, C230TMD-B)
6. Mirror (Thorlabs, PF10-03-M01)
7. Mirror (Thorlabs, BB1-E03)
8. Convex lens, $f = 7.5$ mm (Thorlabs, Thorlabs, CP1TM09/M)
9. Convex lens, $f = 25$ mm (Thorlabs, LB1761-B-ML Coating 650-1050nm)
10. Computer
11. Laser block, (Thorlabs, CBB1/M)
12. Laser Diode Driver (Thorlabs, IP500-ASSY1)
13. Home-made servo-lock circuit
14. Temperature control circuit
15. Thermoelectric (TEC1-12706)
16. Thermistor (NTC, B57881S Series)
17. Half-wave plate (Thorlabs, WPH10M-780.24)

18. Quarter-wave plate (Thorlabs, WPQ10M)
19. Rb cell (Thorlabs, GC19100-I)
20. Piezo actuator (Thorlabs, TA0505D024W)
21. Photo diode (Osram, SFH213)
22. Web cam (Oker, 088)
23. Arduino nano
24. OLED module, 0.96-inch 128x64 Blue I2C
25. 3Dprinter, Prusa i3 mk3
26. RIGOL DS1054Z 50MHz 4CH Digital Oscilloscope
27. เครื่องวัดอุณหภูมิ ดิจิตอล LCD
28. Thorlabs Fabry-Perot Interferometers SA201-5B
29. Thorlabs Compact CCD Spectrometers CCS175/M

3.2 ออกแบบและสร้างเลเซอร์ชนิดโพรงภายในแบบไม่มีฟิลเตอร์กรองแสง

ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอการออกแบบและสร้างเลเซอร์ชนิดโพรงภายในแบบไม่มีฟิลเตอร์กรองแสงซึ่งวิธีที่ใช้ในการสร้างจะใช้พื้นฐานจากหัวข้อที่ 2.5 คือ ใช้การใช้สะท้อนแสงเลเซอร์แบบตาแมว (Cateye reflector) และใช้การแยกลำแสงเลเซอร์ด้วย PBS (Polarizing Beam Splitter) แทนการใช้ BS (Beam Splitter) โดยมีองค์ประกอบดังรูปที่ 19 คือ ไดโอดเลเซอร์ LD, เลนส์ทำลำแสงขนาน CL, PBS (Polarizing Beam Splitter), เลนส์ตาแมว L, กระจกขนาน M, และ เพียโซอิเล็กทริก (PZT)



รูปที่ 19 แผนผังการสร้างเลเซอร์ชนิดโพรงภายในแบบไม่มีฟิลเตอร์กรองแสง โดยใช้ PBS ในการแยกลำแสงเลเซอร์

3.3 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับเลเซอร์ชนิดโพรงภายในแบบไม่มีฟิลเตอร์กรองแสง

การปรับความยาวคลื่นของ ECDL ได้นั้นมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การปรับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับไดโอดเลเซอร์ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของระบบหล่อเย็น และการปรับระยะของกระจกควิตี้ของ ECDL เป็นต้น ในงานวิจัยนี้จะมีวงจรควบคุมความถี่หรือความยาวคลื่นของ ECDL แบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ วงจรควบคุมระยะกระจกควิตี้ วงจรรับสัญญาณการดูดกลืนของธาตุรูบิเดียม และวงจรล็อคความยาวคลื่นของ ECDL การปรับระยะของกระจกควิตี้จะสอดคล้องกับหัวข้อที่ 2.6 เรื่องการดูดกลืนแม่เหล็กไฟฟ้าของธาตุรูบิเดียม โดยถ้าแสงเลเซอร์จาก ECDL มีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่สั้น

ห้องของธาตุรูบี้เดียมแล้วจะเกิดการดูดกลืนแสงเลเซอร์โดยใช้ชุดอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 16 โดยลักษณะการดูดกลืนของแสงดังรูปที่ 17 เกิดจากการสแกนระยะกระจากควิตี้เรียกว่า สเปกตรัมการดูดกลืนของธาตุรูบี้เดียม แผนผังวงจรรับสัญญาณการดูดกลืนของธาตุรูบี้เดียมดังรูปที่ 23 จะถูกใช้งานร่วมกับออสซิลโลสโคป (RIGOL DS1054Z 50MHz 4CH Digital Oscilloscope) การปรับความถี่หรือความยาวคลื่นสามารถทำได้โดยใช้วงจรควบคุมระยะระหว่างกระจากควิตี้ดังรูปที่ 24 และจ่ายกระแสไฟฟ้าไปที่เพียโซอิเล็กทริกที่ติดอยู่กับกระจากควิตี้ เพื่อทำการขยายหรือย่อขนาดเพียโซอิเล็กทริก (PZT) ความยาวคลื่นที่ออกจาก ECDL จะถูกล็อคโดยการใช่วงจรล็อคความยาวคลื่นแสดงดังรูปที่ 25 ซึ่งจะล็อคจากสัญญาณสเปกตรัมการดูดกลืน โดยวงจรล็อคความยาวคลื่นจะทำการเปลี่ยนระยะกระจากควิตี้ตอบสนองกับสัญญาณการดูดกลืนของรูบี้เดียมที่เปลี่ยนแปลงไป

3.3.1 แหล่งควบคุมกระแสไฟฟ้าให้ไดโอดเลเซอร์

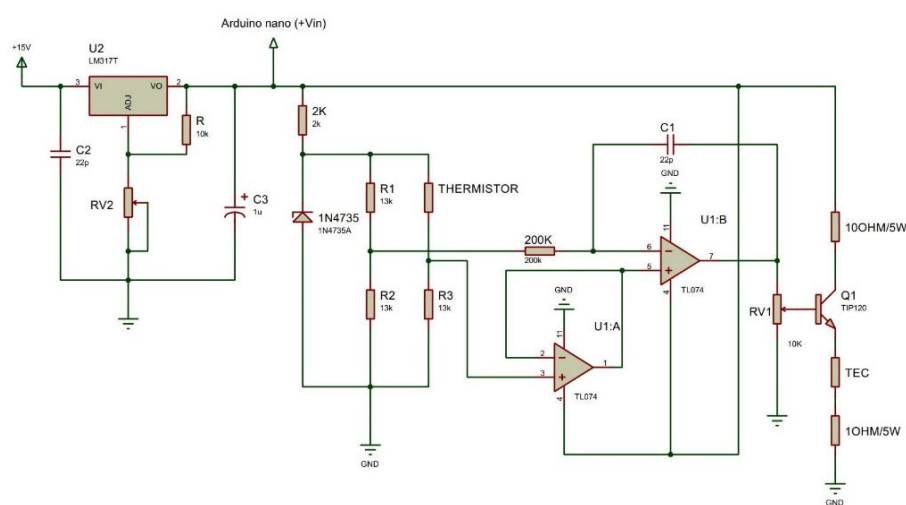
วงจรควบคุมกระแสไฟฟ้า (Thorlabs, IP500-ASSY1) ดังรูปที่ 20 ทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้ไดโอดเลเซอร์ (Thorlabs, L785H1) โดยวงจรนี้สามารถแจ้งเตือนอัตโนมัติเมื่อเกิดปัญหาการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับไดโอดเลเซอร์ได้ สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้มากที่สุดที่ 500 mA โดยสามารถปรับการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับไดโอดเลเซอร์ได้ด้วยการปรับตัวต้านทาน P/I ADJ ใช้ตัวต้านทาน PLIM ADJ ในการกำหนดกำลังวัตต์สูงสุดที่จ่ายให้ไดโอดเลเซอร์ และใช้ ILIM ADJ กำหนดกระแสไฟฟ้าสูงสุดให้กับไดโอดเลเซอร์ โดยจะต้องทำการปรับตามสเปกของไดโอดเลเซอร์ ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้ไดโอดเลเซอร์ (Thorlabs, L785H1) ที่รับกระแสไฟฟ้าได้มากที่สุด 200 mA



รูปที่ 20 วงจรควบคุมกระแสไฟฟ้า

3.3.2 วงจรควบคุมอุณหภูมิ

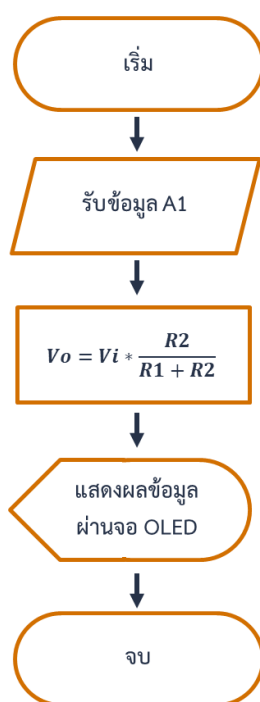
จากหัวข้อ 2.2.4 ระบบหล่อเย็นมีความสำคัญต่อความเสถียรของไดโอดเลเซอร์ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของ ECDL จะส่งผลต่อค่าความยาวคลื่นที่ได้ไม่คงที่มีความเสถียรลดลง จึงได้มีการสร้างวงจรควบคุมอุณหภูมิ [26] และเพิ่มวงจรมอนิเตอร์โดยใช้บอร์ด Arduino nano และจอ OLED (0.96-inch 128x64 Blue I2C) ทั้งนี้การควบคุมอุณหภูมิยังมีส่วนต่อการเลือกความยาวคลื่นที่ปล่อยออกมาจากไดโอดเลเซอร์ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วแสงจากไดโอดเลเซอร์จะมีความยาวคลื่นลดลงตามอุณหภูมิของไดโอดเลเซอร์



รูปที่ 21 วงจรควบคุมอุณหภูมิ

รูปที่ 21 เป็นวงจรควบคุมอุณหภูมิมีการปรับปรุงจากงานวิจัยของ [26] โดยมีส่วนที่ได้เพิ่มขึ้นมาคือวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ให้กับวงจรควบคุมอุณหภูมิ ที่ใช้ไอซีเรกกูเลเตอร์ U2 (LM317T) และปรับแรงดันไฟฟ้าได้ด้วยการปรับตัวต้านทานปรับค่าได้ RV2 (5 kΩ) ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวงจรควบคุมอุณหภูมิจะถูกป้องกันการลัดวงจรด้วยการใช้ซีเนอร์ไดโอด 1N4735 โดยวงจรนี้จะควบคุมอุณหภูมิโดยใช้ วงจรบริดจ์ (Bridge circuit) ประกอบด้วยตัวต้านทาน 4 ตัว มี R1, R2, R3, และ Thermistor หลักการทำงานของวงจรบริดจ์คือ เมื่อค่าของตัวต้านทานทั้ง 4 ตัวมีค่าเท่ากันก็จะไม่จ่ายแรงดันไฟฟ้าไปยังออปแอมป์ U1:A และ U1:B แต่ถ้าค่าของตัวต้านทานทั้ง 4 ตัวมีตัวใดตัวหนึ่งไม่เท่ากับตัวที่เหลือก็จะเริ่มจ่ายแรงดันไฟฟ้าจะถูกจ่ายไปยังออปแอมป์ทั้งสอง ซึ่ง Thermistor (NTC, B57881S Series) คือ ตัวต้านทานที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ และถูกติดไว้ใกล้กับไดโอดเลเซอร์เพื่อให้ Thermistor มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิของไดโอดเลเซอร์ ขณะที่วงจร

บริดจ์จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับออปแอมป์ U1:A และ U1:B ซึ่งทำหน้าที่เป็น PI controller โดยเป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ซึ่งนำค่าไปใช้ในการคำนวณเพื่อลดค่าความผิดพลาดจากความแตกต่างระหว่างค่าจริงและค่าที่ต้องการ ใช้ PV1 ในการปรับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ Q1 และแผ่นทำความเย็น TEC (TEC1-12706) โดยการทำงานของแผ่น TEC คือ รับแรงดันไฟฟ้าส่งผลให้ด้านหนึ่งจะเย็นและอีกด้านจะร้อนตามลำดับ ซึ่งจะติดแผ่น TEC ไว้ใต้ของบล็อกเลเซอร์ (Thorlabs, CBB1/M) โดยให้ด้านเย็นของ TEC ใช้หล่อเย็นให้กับไดโอดเลเซอร์ และด้านร้อนระบายออกที่พื้นของโต๊ะแสง เมื่ออุณหภูมิของไดโอดเลเซอร์เป็นไปตามค่าที่ต้องการ วงจรบริดจ์จะหยุดจ่ายแรงดันไฟฟ้า



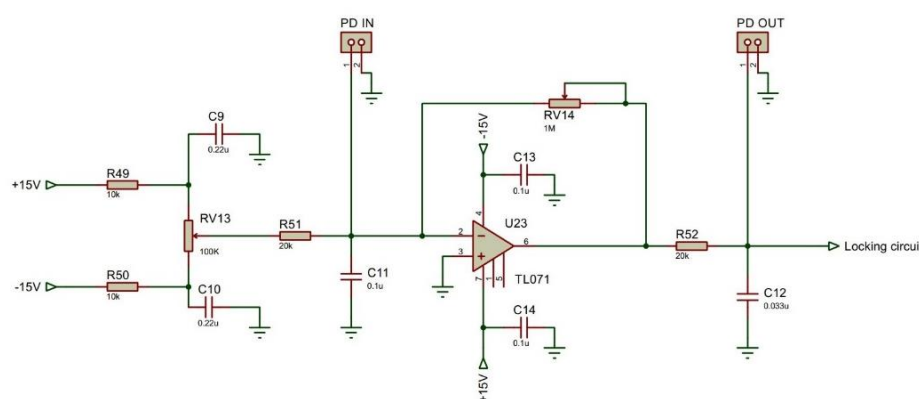
รูปที่ 22 แผนผังมอนิเตอร์โดยการใช้บอร์ด Arduino nano

เนื่องจากวงจรควบคุมอุณหภูมิสามารถปรับแรงดันไฟฟ้าที่ให้กับ TEC ผ่านการปรับความต้านทานค่าแรงดันไฟฟ้า เพื่อเลือกค่าของอุณหภูมิได้ จึงได้มีการสร้างหน้าจอมอนิเตอร์แรงดันไฟฟ้าขึ้นโดยใช้บอร์ด Arduino nano สำหรับการมอนิเตอร์ค่าแรงดันไฟฟ้ามีแผนผังการทำงานให้ของบอร์ด Arduino nano แสดงดังรูปที่ 22 เริ่มต้นบอร์ด Arduino nano รับข้อมูลแรงดันไฟฟ้าเป็นสัญญาณอนาล็อกที่ขา A1 จากนั้นนำแรงดันไฟฟ้ามาแปลงโดยใช้วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า (voltage divider circuit) เพื่อป้องกันไม่ให้บอร์ด Arduino nano เสียหายที่เกิดจากการรับแรงดันไฟฟ้าที่

เกินไป และสามารถแสดงเป็นค่าที่วัดได้จริงโดยใช้สมการแบ่งแรงดันในโค้ด และแสดงผลผ่านจอ OLED

3.3.3 วงจรรับสัญญาณการดุดกลืนของธาตุรูบิเดียม

จากหัวข้อที่ 2.6 เมื่อติดตั้งชุดทดลองดังรูปที่ 16 จะรับสัญญาณการดุดกลืนของธาตุรูบิเดียมด้วยการใช้โฟโตไดโอด PD (Osram, SFH213) ซึ่งโฟโตไดโอดจะรับสัญญาณความเข้มแสงมาแล้วถูกแปลงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าโดยใช้วงจรดังรูปที่ 23 ซึ่งถูกแสดงผลโดยใช้ออสซิลโลสโคป (RIGOL DS1054Z 50MHz 4CH Digital Oscilloscope)

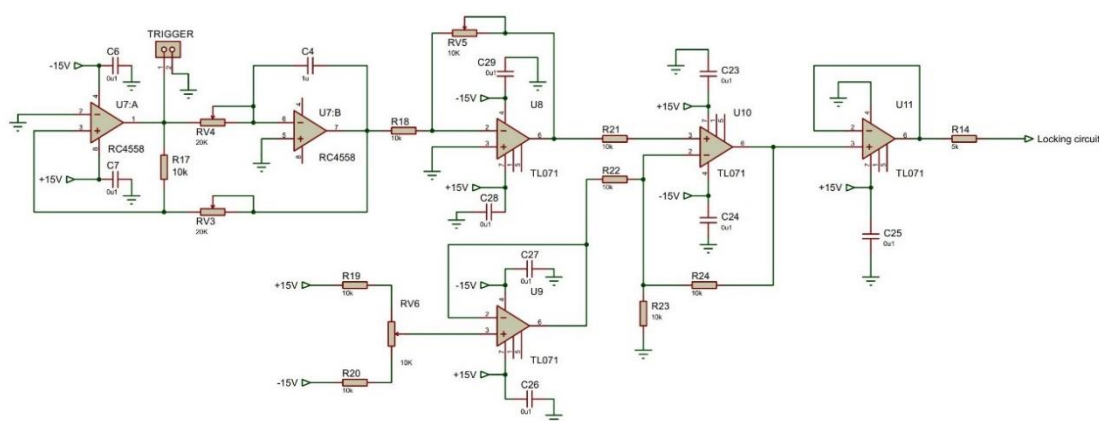


รูปที่ 23 วงจรรับสัญญาณการดุดกลืนของธาตุรูบิเดียม

วงจรดังรูปที่ 23 ยังทำหน้าที่ขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier) โดยการขยายและกลับเฟสสัญญาณขาเข้าให้มีเครื่องหมายตรงกันข้ามกับสัญญาณขาออกโดยการใช้โอปแอมป์ (U23) และสามารถชดเชยสัญญาณไฟฟ้า (Offset) หรือปรับอัตราขยายแสง (Signal gain) ได้โดยใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ RV13 และ RV14 ตามลำดับ สามารถลดสัญญาณรบกวนของวงจรได้โดยการเพิ่มวงจรกรองความถี่สูง (Low Pass Filter) ที่จะปล่อยความถี่ต่ำผ่านไป และตัดความถี่ที่สูงกว่าที่กำหนดออก โดยสามารถกำหนดความถี่ได้จากการปรับค่าตัวต้านทานของตัวต้านทาน R52 และค่าประจุของตัวเก็บประจุ C12 สัญญาณขาออกของวงจรนี้จะเป็นสัญญาณขาเข้าของวงจรล็อคความยาวคลื่นของ ECDL ที่จะอธิบายในหัวข้อถัดไป

3.3.4 วงจรควบคุมระยะกระจกควิต

จากหัวข้อที่ 3.2 การปรับระยะกระจกควิตเพียงเล็กน้อยส่งผลให้ความถี่หรือความยาวคลื่นของ ECDL เปลี่ยน จึงสามารถสแกนหาความถี่หรือความยาวคลื่นที่ต้องการได้ และเมื่อแสงเลเซอร์มีความยาวคลื่นที่สั้นพ้องกับธาตุรูปเดิมจะเกิดการดูดกลืนแสงแสดงดังรูปที่ 17 โดยการปรับความยาวคลื่นของ ECDL สามารถทำได้โดยใช้วงจรดังรูปที่ 24

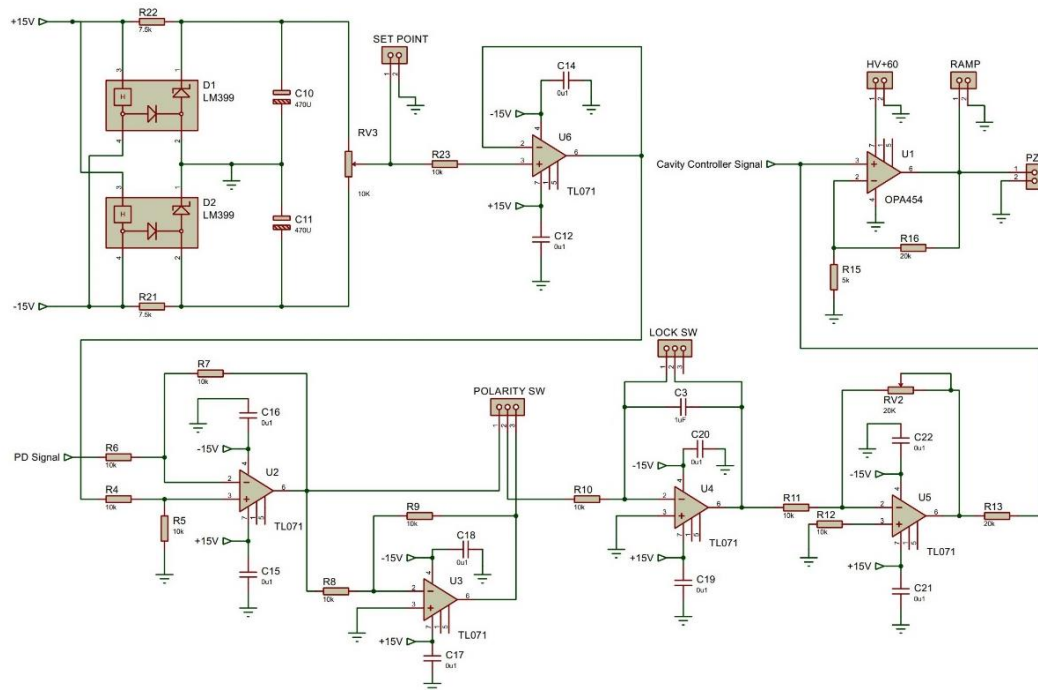


รูปที่ 24 วงจรควบคุมระยะกระจกควิต

จากรูปที่ 24 RC4558 เป็นไอซีที่ประกอบไปด้วยออปแอมป์ 2 ตัวอยู่ภายในคือ U7:A และ U7:B ทำหน้าที่สร้างสัญญาณสี่เหลี่ยม (Square wave) และสามเหลี่ยม (Triangle wave) ตามลำดับ โดยสัญญาณสี่เหลี่ยมที่ออกจากออปแอมป์ U7:A ถูกใช้เป็นสัญญาณ Trigger ให้กับออสซิลโลสโคป และสัญญาณสามเหลี่ยมที่ออกจากออปแอมป์ U7:B จะถูกนำไปใช้ในการขับเพียโซอิเล็กทริก (PZT) สามารถปรับขนาด และรูปร่างของสัญญาณสามเหลี่ยมได้ โดยใช้ออปแอมป์ U8 และ U9 ร่วมกับตัวต้านทานปรับค่าได้ RV5 และ RV6 แล้วรวมสัญญาณที่ปรับแล้วใช้ออปแอมป์ U10 และส่งสัญญาณไปยังวงจรพัลเฟอร์ U11 โดยจะต่อขา 4 เข้ากับ GND เพื่อป้องกันไม่ให้สัญญาณสามเหลี่ยมมีค่าน้อยกว่า GND เพราะจะส่งผลให้เพียโซอิเล็กทริก (PZT) เกิดความเสียหายได้

3.3.5 วงจรล็อคความยาวคลื่นของเลเซอร์ชนิดโพรงภายในไม่มีฟิลเตอร์กรองแสง

หลังจากหัวข้อที่ 3.3.4 ได้มีการสแกนความถี่ของ ECDL เพื่อหาความถี่สั่นพ้องของธาตุรูบิเดียมแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการล็อคความถี่ที่ต้องการให้มีค่าความถี่เดียว โดยใช้วงจรดังรูปที่ 25



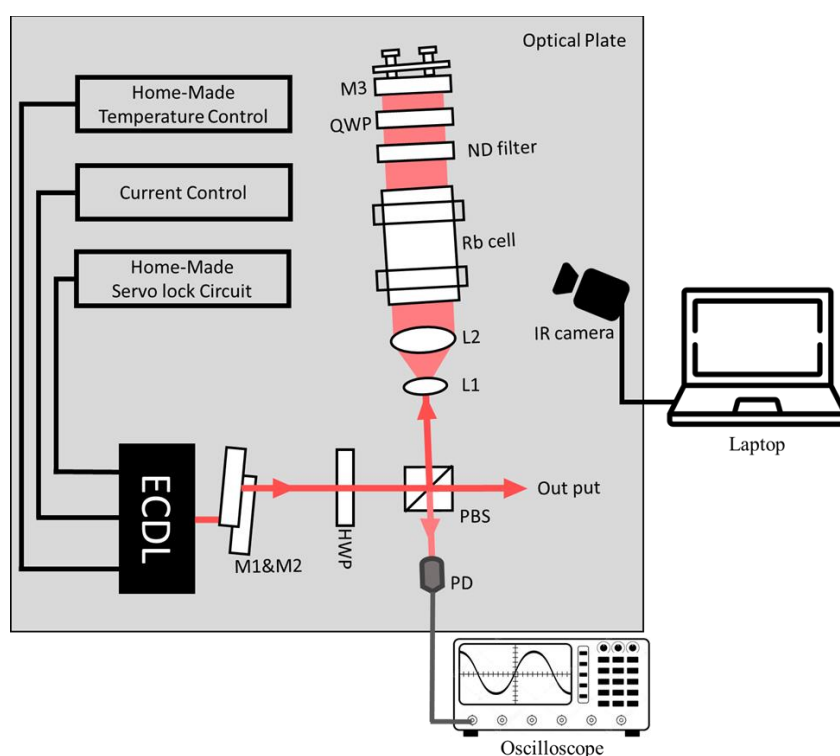
รูปที่ 25 วงจรล็อคความยาวคลื่นของ ECDL

จากรูปที่ 25 เมื่อสัญญาณกลับเฟสจากวงจรรับสัญญาณการดูดกลืนของธาตุรูบิเดียมในหัวข้อที่ 3.3.3 จะถูกใช้เป็นสัญญาณขาเข้าของออปแอมป์ U2 และสัญญาณขาออกอีกส่วนหนึ่งมาจากการใช้ LM399 ใช้กำหนดจุดตั้งแรงดันไฟฟ้า (Voltage setpoint) สำหรับการล็อคความยาวคลื่นของ ECDL จากการปรับค่าของตัวต้านทานปรับค่า RV3 และใช้วงจรบัฟเฟอร์ (Voltage Follower) U6 จ่ายแรงดันไฟฟ้า จึงสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้าได้ในช่วง -7.00 V ถึง 7.00 V โดยสามารถตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าได้โดยการวัดแรงดันไฟฟ้าจาก มัลติมิเตอร์ หรือออสซิลโลสโคป โดยในงานวิจัยจะกำหนดแรงดันไฟฟ้าเพื่อใช้ในการล็อคสัญญาณไฟฟ้าที่ 0 V เมื่อสัญญาณทั้งสองเข้าสู่ออปแอมป์ U2 สัญญาณ PD signal จะถูกลบออกตามส่วนต่างแรงดันไฟฟ้าจากจุดตั้งแรงดันไฟฟ้าที่กำหนดไว้ จึงได้เอาต์พุตของออปแอมป์ U2 จะเป็นสัญญาณผลต่าง (Error signal) และสัญญาณผลต่างถูกส่งไปยังสวิตช์เลื่อน 3 ทาง (Polarity SW) เพื่อเลือกที่จะใช้สัญญาณแบบกลับเฟสหรือไม่กลับเฟสผ่านการสลับสวิตช์เลื่อนเพื่อให้สัญญาณผ่านออปแอมป์ U3 หรือไม่ผ่านก็ได้ โดยการกลับ

เฟสหรือไม่กลับเฟสของสัญญาณนั้นหมายถึงการเลือกความถี่ด้านลบ (U3) หรือบวก (U2) ของพีคการดูดกลืน (Saturated absorption peak) เมื่อเลือกความถี่ของพีคการดูดกลืนแล้วสัญญาณจะถูกเลื่อนความถี่ผ่านสวิตช์เลื่อน Lock SW และส่งสัญญาณไปรวมกับสัญญาณที่มาจากวงจรควบคุมระยะกระจกควิตี้ เพื่อใช้เป็นสัญญาณขาเข้าให้กับออปแอมป์แรงดันไฟฟ้าสูง U1 (OPA454) ทำหน้าที่ในการขับแรงดันไฟฟ้าให้กับเพียโซอิเล็กทริก (PZT) โดยสามารถตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เพียโซอิเล็กทริก (PZT) ผ่านการต่อสัญญาณสามเหลี่ยม (RAMP) เข้ากับออสซิลโลสโคป (RIGOL DS1054Z 50MHz 4CH Digital Oscilloscope)

3.4 การติดตั้งระบบดูดกลืนพลังงานของธาตุรูบิเดียม (Absorption spectroscopy)

จากหัวข้อ 3.2 หลังจากทำการสร้างไดโอดเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกแบบไม่มีฟิลเตอร์แล้ว จะทำการตรวจสอบความยาวคลื่นที่ 780.24 nm โดยใช้ดูดกลืนพลังงานของธาตุรูบิเดียมมีแผนผังการติดตั้งและจัดวางอุปกรณ์ดังรูปที่ 16 และการติดตั้งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ดังรูปที่ 26



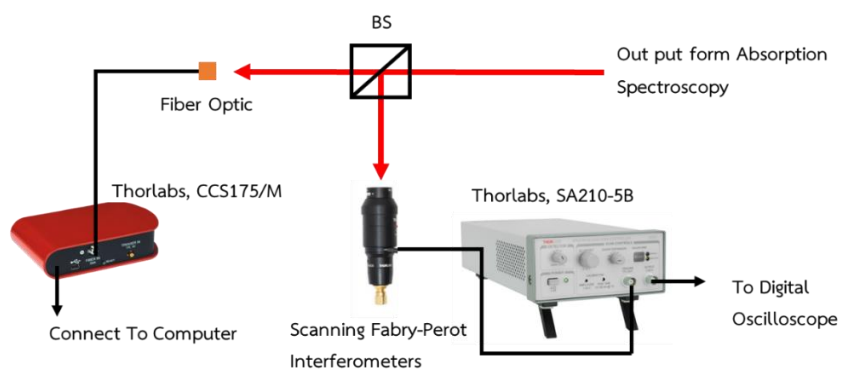
รูปที่ 26 แผนผังติดตั้งระบบดูดกลืนพลังงานของธาตุรูบิเดียม

จากรูปที่ 26 คือ แผนผังการจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำระบบการดูดกลืนพลังงานของธาตุรูบิเดียม หลังจากเกิดแสงเลเซอร์ออกจาก ECDL ให้แสงเลเซอร์จะผ่านกระจก M1 และ M2 เพื่อยกระดับความสูงของแสงเลเซอร์เพื่อใช้กับอุปกรณ์อื่นๆ และใช้กระจกในการสะท้อนแสงเลเซอร์ไปที่แผ่นฮาล์ฟเวฟเพลท (half-wave plate, HWP) เพื่อเปลี่ยนโพลาไรเซชันของแสงก่อนที่จะเข้าไปยัง ผลึกแยกลำแสงโพลาไรเซชัน (Polarizing beam splitter, PBS) โดยแสงโพลาไรเซชันแนวราบ (P-Polarization) สามารถทะลุ ผ่าน PBS ออกไปใช้งาน และแสงโพลาไรเซชันแนวตั้ง (S-Polarization) สะท้อนไปใช้ในการดูดกลืนพลังงานของธาตุรูบิเดียม โดยให้แสงเลเซอร์ผ่านเลนส์ L1 และ L2 เพื่อทำการขยายขนาดลำของแสงเลเซอร์ได้พอดีกับหลอดแก้วรูบิเดียม ซึ่งขนาดลำแสงเลเซอร์ที่พอดีจะช่วยให้การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้ง่ายเพราะแสงเลเซอร์มีโอกาสตกกระทบกับธาตุรูบิเดียมมากขึ้น หลังจากแสงเลเซอร์ผ่านหลอดแก้วรูบิเดียมแล้วจะเคลื่อนที่ผ่านฟิลเตอร์กรองความเข้มแสง (ND filter) เพื่อลดการเกิด Power broadening ช่วยให้พิกในสเปกโทรสโกปีมีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น โดยการใช้แผ่นควอเตอร์เวฟเพลท (Quarter-wave plate, QWP) และกระจก M4 จะเปลี่ยนโพลาไรเซชันของแสงจากโพลาไรเซชันแนวตั้ง (S-Polarization) ไปเป็นโพลาไรเซชันแนวราบ (P-Polarization) ส่งผลให้แสงเลเซอร์ผ่าน PBS ไปยังโฟโตไดโอด (Photodiode) เพื่อเก็บผลการดูดกลืนแสงเลเซอร์ของธาตุรูบิเดียมผ่านวงจรรับข้อมูล ทั้งนี้ยังสังเกตการเปล่งแสงของธาตุรูบิเดียมจากการสั่นพ้องโดยกล้องอินฟราเรด โดยงานวิจัยนี้จะให้การติดตั้งมีลักษณะเอียงเล็กน้อย เนื่องจากต้องการหลีกเลี่ยงแสงเลเซอร์สะท้อนกลับไปรบกวนไดโอดเลเซอร์

3.5 การตรวจสอบความแม่นยำของความยาวคลื่นของเลเซอร์ชนิดโพรงภายในแบบไม่มีฟิลเตอร์กรองแสง

ในงานวิจัยนี้มีการตรวจสอบความแม่นยำของความยาวคลื่นของ ECDL นอกจากจะตรวจสอบโดยใช้การดูดกลืนของธาตุรูบิเดียมแล้ว ยังมีการตรวจสอบโดยใช้ Thorlabs Spectrometers (CCS175/M) และ Thorlabs Fabry-Perot Interferometers (SA210-5B) โดยมีแผนผังการติดตั้งดังรูปที่ 27 ลำแสงเลเซอร์จากระบบดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของธาตุรูบิเดียม (Absorption spectroscopy) พุ่งเข้าสู่ผลึกแยกลำแสง (BS) เพื่อแบ่งลำแสงออกเป็น 2 ทาง โดยแสงลำที่หนึ่งพุ่งเข้า Thorlabs Spectrometers และอีกลำหนึ่งพุ่งเข้า Thorlabs Fabry-Perot Interferometers เพื่อดูความยาวคลื่นของเลเซอร์ชนิดโพรงภายในแบบไม่มีฟิลเตอร์กรองแสงต่อไป





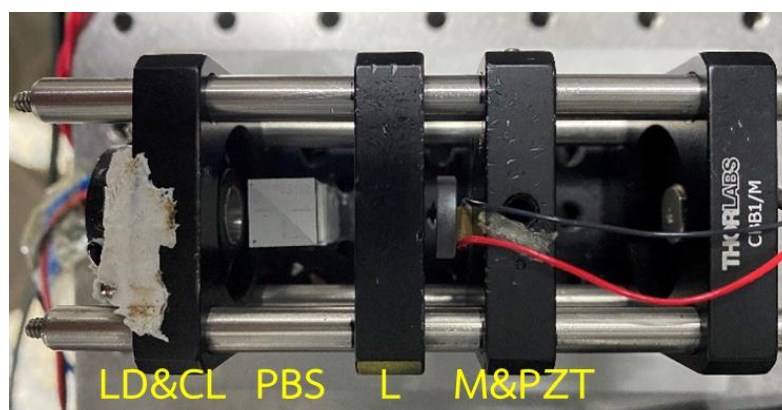
รูปที่ 27 แผนผังติดตั้งชุดตรวจสอบความแม่นยำของความยาวคลื่นของเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกแบบไม่มีฟิลเตอร์กรองแสง

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การออกแบบและสร้างเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกแบบไม่มีฟิลเตอร์กรองแสง

งานวิจัยนี้จะสร้างไดโอดเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกแบบไม่มีฟิลเตอร์กรองแสง จากหัวข้อที่ 3.2 โดยใช้วิธีการสะท้อนแสงเลเซอร์แบบตาแมว (Cateye reflector) โดยแยกลำแสงเลเซอร์ตามโพลาไรเซชันของแสงด้วย PBS และแสงที่ใช้สะท้อนกลับเข้าหาเลเซอร์ไดโอดโดยใช้กระจกขนาน M, และควบคุมระยะโพรงโดยใช้เพียโซอิเล็กทริก (PZT)



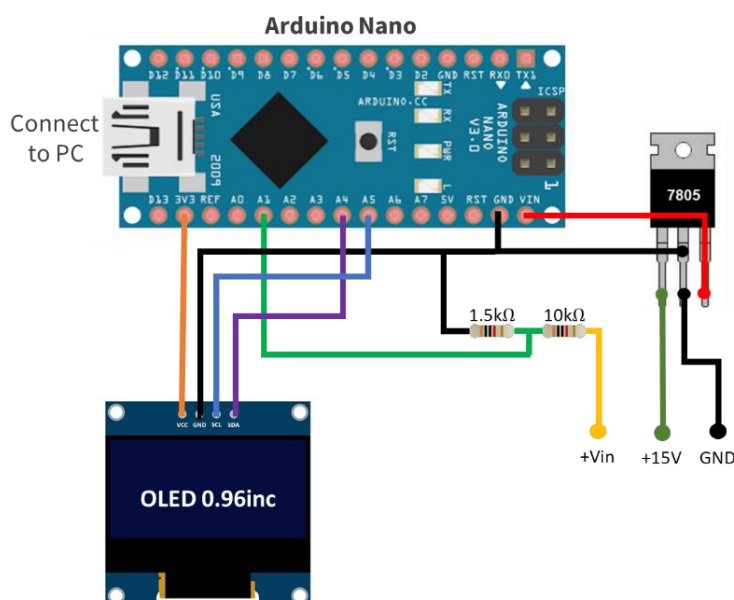
รูปที่ 28 องค์ประกอบเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกแบบไม่มีฟิลเตอร์กรองแสงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (ไม่มีฝาครอบ)

ในงานวิจัยนี้จะใช้ไดโอดเลเซอร์ความยาวคลื่น 785 nm (Thorlabs, L785H1) ซึ่งสามารถรับกระแสไฟฟ้าได้มากที่สุด 200 mA ทั้งนี้ยังมีราคาถูกและสามารถหาซื้อได้ง่าย ไดโอดเลเซอร์จะถูกใส่และยึดอยู่กับท่อทำลำแสงขนาน Collimation tube (Thorlabs, LT110P-B) ประกอบร่วมกับเลนส์ที่มีระยะโฟกัส 6.24 mm ซึ่งท่อทำลำขนานเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยในการจัดตำแหน่งแสงของเลเซอร์ให้ขนานได้ง่ายขึ้นด้วยการหมุนเกลียวของท่อเพื่อปรับระยะเลนส์ เมื่อลำแสงเลเซอร์ขนานแล้วจะถูกแบ่งออกเป็นสองทางตามโพลาไรเซชันของแสงด้วยการใช้ฟิล์ม PBS (Thorlabs, PBS102) โดยโพลาไรเซชันแนวราบ (P-Polarization) จะสะท้อนออกใช้เป็นแสงเลเซอร์ขาออกของ ECDL และแสงเลเซอร์ที่มีโพลาไรเซชันแนวตั้ง (S-Polarization) ใช้เป็นลำแสงสะท้อนกลับไปหาไดโอดเลเซอร์ โดย

อัตราส่วนความเข้มของแสงเลเซอร์ระหว่างแสงเลเซอร์ที่มีโพลาไรเซชันแนวราบ และแสงเลเซอร์ที่มีโพลาไรเซชันแนวตั้งจะสามารถถูกปรับค่าได้จากการหมุนไดโอดเลเซอร์ ทั้งนี้ถ้าความเข้มแสงที่สะท้อนเข้าหาไดโอดเลเซอร์มีมากเกินไปจะส่งผลให้ไดโอดเลเซอร์เสีย หรือ เสื่อมเร็วกว่าปกติ [2] โดยเมื่อลำแสงเลเซอร์ที่ผ่าน PBS มาได้นั้นจะผ่านเลนส์ตาแมว L (Cateye lens) ซึ่งมีระยะโฟกัส 4.51 mm และตกลงบนกระจกระนาบเคลือบทอง (Thorlabs, PF10-03-M01) ใช้เป็นควิตี้สะท้อนแสงกลับมาหาไดโอดเลเซอร์ ซึ่งกระจกระนาบเคลือบทองสามารถปรับระยะยึดติดได้ที่ระย่น้อยๆ โดยใช้เพียโซอิเล็กทริก PZT (Thorlabs, TA0505D024W) ติดไว้ที่หลังกระจกระนาบ โดยอุปกรณ์ที่กล่าวมาทั้งหมดจะติดตั้งอยู่บนบล็อกเลเซอร์ (Thorlabs, CBB1/M) ซึ่งด้านล่างของบล็อกเลเซอร์มีแผ่นทำความเย็น TEC (Thermoelectric) (TEC1-12706) สำหรับหล่อเย็นไดโอดเลเซอร์ และบริเวณไดโอดเลเซอร์จะติดตั้งตัวต้านทานเทอร์มิสเตอร์ (NTC, B57881S Series) กับเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

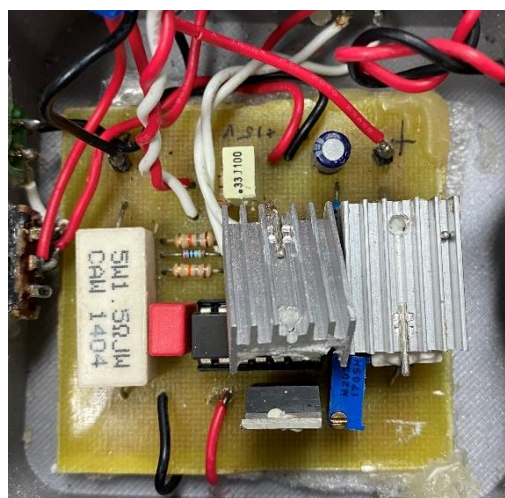
4.2 การสร้างเครื่องมือควบคุมอุณหภูมิ

จากหัวข้อที่ 3.3.2 วงจรควบคุมอุณหภูมิสามารถปรับแรงดันไฟฟ้าเพื่อเปลี่ยนอุณหภูมิได้ ในงานวิจัยนี้จึงได้มีการสร้างจอมอนิเตอร์ที่ใช้แสดงแรงดันไฟฟ้าในวงจรควบคุมอุณหภูมิ โดยใช้แผนผังมอนิเตอร์จากรูปที่ 22



รูปที่ 29 วงจรมอนิเตอร์โดยใช้บอร์ด Arduino nano

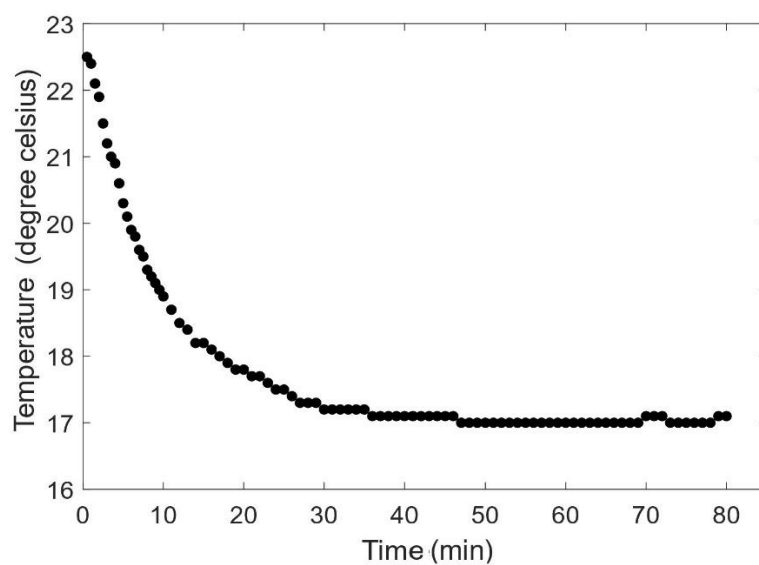
จากรูปที่ 29 วงจรมอนิเตอร์โดยใช้บอร์ด Arduino nano และจอ OLED (0.96-inch 128x64 Blue I2C) ที่สามารถหาซื้อได้ทั่วไป โดยบอร์ด Arduino nano สามารถรับแรงดันไฟฟ้าได้เพียง 5 V เท่านั้น ถ้าแรงดันไฟฟ้าเกินจะทำให้บอร์ด Arduino nano เสียหายได้ จึงได้มีการเพิ่มไอซีไอซีเรกูเลเตอร์ LM7805 ที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่ 5 V เข้าที่ขา VIN ของบอร์ด Arduino nano การเชื่อมต่อจอ OLED เข้ากับบอร์ด Arduino nano จะใช้ขา SCL และ SDA ที่จอ OLED เพื่อรับข้อมูลจากขาอนาล็อก A5 และ A4 ของบอร์ด Arduino nano ตามลำดับ โดยจอ OLED จะใช้แรงดันไฟฟ้า 3.3 V และ GND จากบอร์ด Arduino nano สำหรับการรับแรงดันไฟฟ้าปรับค่าได้จากวงจรดังรูปที่ 28 จะใช้ขาอนาล็อก A1 ที่ผ่านวงจรแบ่งแรงดัน (Voltage Divider Circuit) มีค่าตัวต้านทานที่ 1.5 k Ω และ 10 k Ω เป็นการลดแรงดันไฟฟ้าจริง (+Vin) ก่อน เพื่อป้องกันการเสียหายของบอร์ด Arduino nano จอมอนิเตอร์จะแสดงค่าแรงดันที่แท้จริง โดยการเพิ่มสมการคำนวณของวงจรแยกแรงดันในโค้ดที่ใช้ควบคุมการทำงานของบอร์ด Arduino nano เมื่อรวมวงจรดังรูปที่ 23 และ 29 เข้าด้วยกันและนำไปติดตั้งบนกล่องชุดอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบมาโดยเฉพาะจะได้ดังรูปที่ 30



รูปที่ 30 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิที่ใช้จริงในงานทดลอง (ซ้าย) และแผ่น PCB วงจรวางจรควบคุมอุณหภูมิ (ขวา)

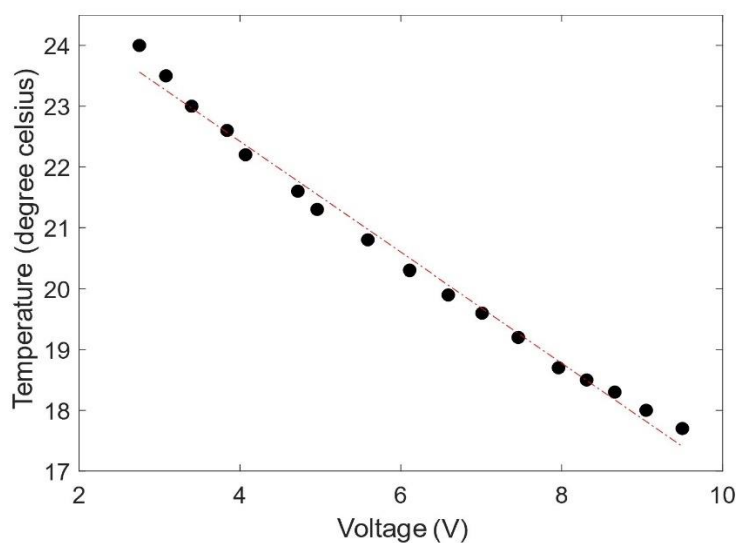
4.2.1 การวัดประสิทธิภาพการทำงานของวงจรควบคุมอุณหภูมิ

จากหัวข้อที่ 4.2 การสร้างวงจรควบคุมอุณหภูมิจะมีการเก็บผลประสิทธิภาพของวงจรควบคุมอุณหภูมิที่สร้างขึ้นเพื่อใช้กับ ECDL โดยจะเก็บค่าอุณหภูมิเป็นเวลา 80 นาที ดังรูปที่ 31 และผลของแรงดันไฟฟ้าจากวงจรควบคุมอุณหภูมิต่ออุณหภูมิของ ECDL



รูปที่ 31 ผลการควบคุมอุณหภูมิ ECDL

รูปที่ 31' คือ ผลจากการทดลองเก็บค่าอุณหภูมิโดยมีอุณหภูมิเริ่มต้นอยู่ที่ 22.5°C และใช้แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวงจรควบคุมอุณหภูมิอยู่ที่ 7 V โดยจะมีค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่คงที่ (36 นาทีขึ้นไป) อยู่ที่ 17.0°C และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) เท่ากับ 0.048°C

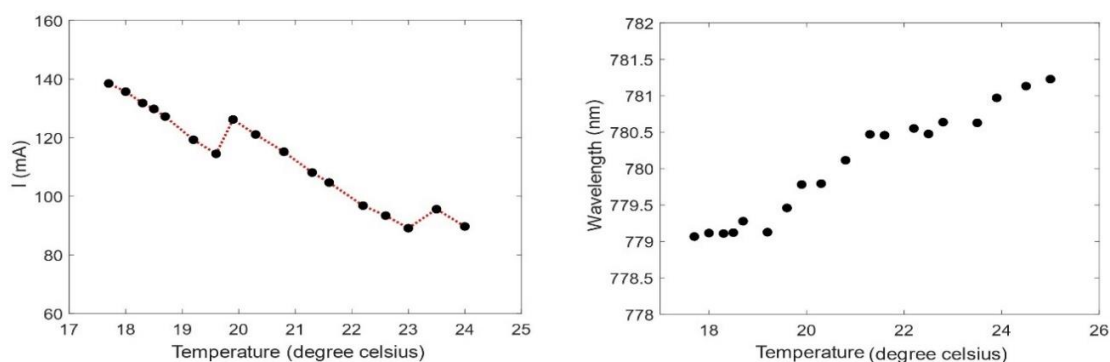


รูปที่ 32 ผลของอุณหภูมิต่อแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรควบคุมอุณหภูมิ

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้จากการวัดอุณหภูมิของ ECDL และแรงดันไฟฟ้าจากวงจรควบคุมอุณหภูมิที่สร้างขึ้น มาวาดกราฟจะพบว่าปริมาณทั้งสองมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นแสดงดังรูปที่ 32 โดยเมื่อแรงดันไฟฟ้าจากวงจรควบคุมอุณหภูมิมียค่าเพิ่มขึ้นอุณหภูมิของ ECDL จะมีค่าลดลง จากการคำนวณหาสมการเชิงเส้น (curve fitting) จะได้สมการอธิบายความสัมพันธ์ของปริมาณทั้งสอง คือ $y = -0.9748x + 25.9$ และ $R^2 = 0.9898$

4.3 ผลกระทบของการปรับกระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิของไดโอดเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกแบบไม่มีฟิลเตอร์

จากหัวข้อที่ 2.2 ได้อธิบายองค์ประกอบต่างๆ ของเลเซอร์ที่มีผลต่อความยาวคลื่น โดยในงานวิจัยนี้จะได้มีการทำการทดลองศึกษาผลกระทบของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ขับไดโอดเลเซอร์ต่ออุณหภูมิและผลของอุณหภูมิต่อความยาวคลื่นของ ECDL

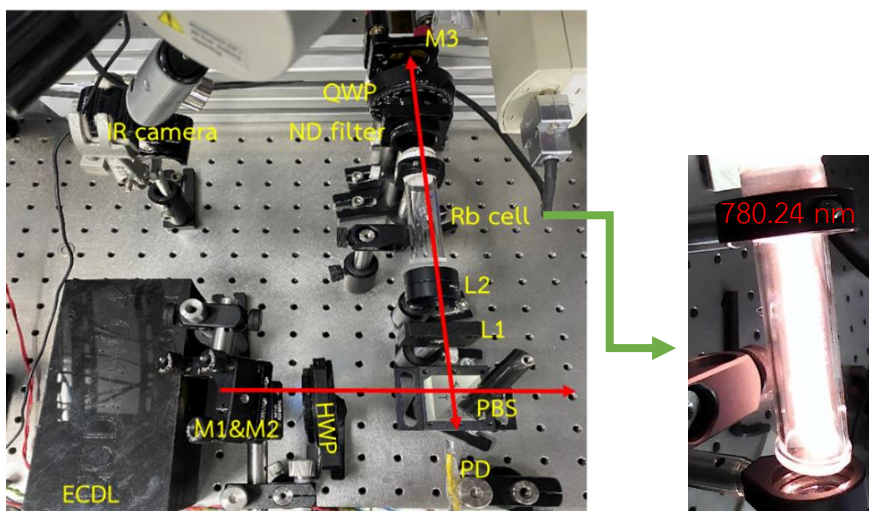


รูปที่ 33 (ซ้าย) ปรับกระแสไฟฟ้าให้ ECDL ที่อุณหภูมิต่างๆ ให้เกิดการดูดกลืนของรูบิเดียม 85 (ขวา) ผลของต่ออุณหภูมิของ ECDL ต่อความยาวคลื่น

จากรูปที่ 33 (ซ้าย) คือ การปรับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ ECDL ที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ทำให้เกิดการดูดกลืนพลังงานการเปล่งแสงของธาตุรูบิเดียม จะสังเกตได้ว่ากระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิของ ECDL แปรผกผันกัน (Inverse variation) เมื่ออุณหภูมิของ ECDL มีค่าต่ำกระแสไฟฟ้าที่จ่ายก็จะสูงขึ้น แต่ก็มีบางช่วงที่กระแสไฟฟ้าลดลงในช่วงอุณหภูมิประมาณที่ 23 และ 18 °C เป็นเพราะว่าในอุณหภูมิช่วงนี้ไม่เหมาะสมที่จะเกิดการดูดกลืนของธาตุรูบิเดียม 85 ของ ECDL หรือ เรียกได้ว่าเกิด Mode Hopping ของเลเซอร์ [27] รูปที่ 33 (ขวา) คือ ความยาวคลื่นของ ECDL ที่อุณหภูมิใดๆ ซึ่งได้ค่าความยาวคลื่นจากการวัดโดยสเปกโตรมิเตอร์ (Thorlabs Compact CCD Spectrometers CCS175/M) เพื่อเป็นการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อเลเซอร์ไดโอดที่อยู่ใน ECDL โดยจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิของ ECDL มีค่าเพิ่มสูงขึ้นความยาวคลื่นมีแนวโน้มที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

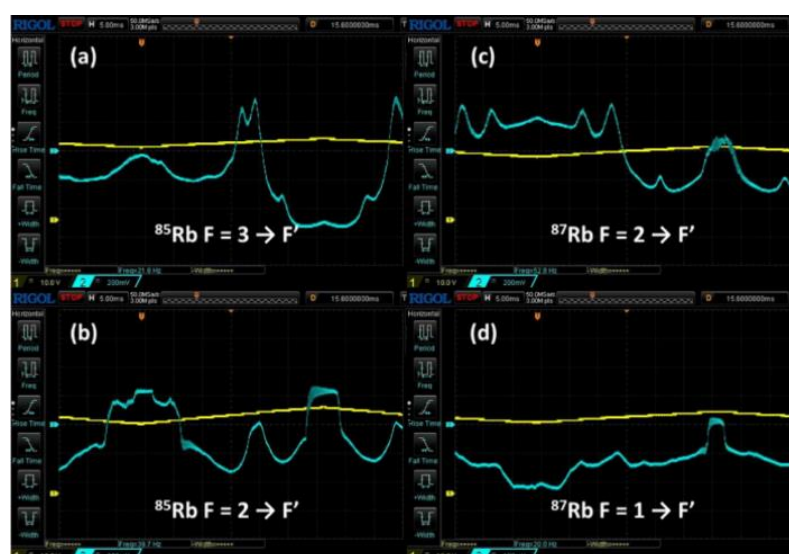
4.4 ผลการติดตั้งระบบดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของธาตุรูบิเดียม

จากหัวข้อที่ 3.4 จึงได้มีการสร้างระบบการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแสงของรูบิเดียม เพื่อทำการตรวจสอบความแม่นยำของเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกแบบไม่มีฟิลเตอร์กรองแสงโดยใช้หลอดแก้วรูบิเดียมดังรูปที่ 34 โดยถ่ายภาพหลอดแก้วรูบิเดียมจากกล้อง Infrared webcam ที่เกิดการเปล่งแสงขึ้น เนื่องจาก ECDL มีความยาวคลื่นสั้นพ้องที่ 780.24 nm



รูปที่ 34 ชุดติดตั้งระบบดูดกลืนพลังงานของธาตุรูบิเดียม และหลอดแก้วรูบิเดียมที่ดูดกลืนแสงเลเซอร์

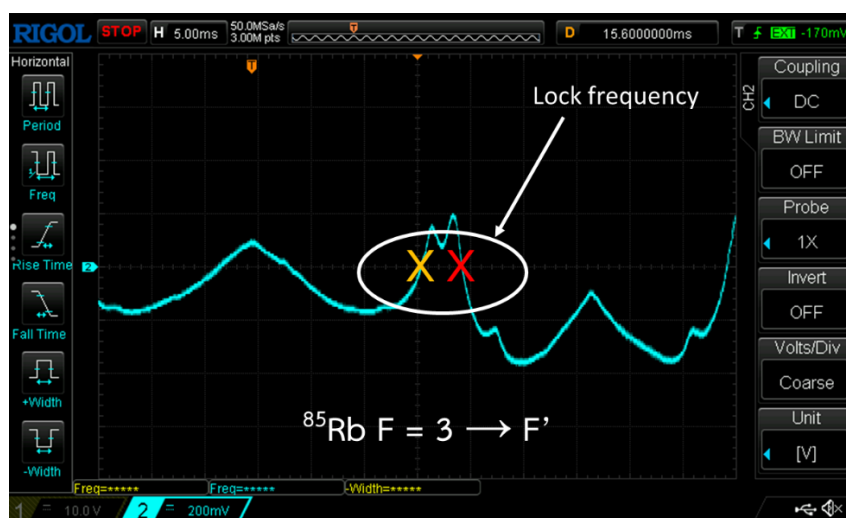
ชุดการตรวจสอบความยาวคลื่นของ ECDL โดยวิธีตรวจสอบคือ การกำหนดค่าอุณหภูมิของ ECDL ที่ $18.6 - 18.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ และปรับค่ากระแสไฟฟ้าจนเกิดการแบ่งแสงของหลอดแก้วรูบิเดียม (ดูจาก กล้อง IR) และในขณะเดียวกันทำการสแกนระยะยาวโดยใช้เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) โดยใช้แรงดันไฟฟ้าที่มีลักษณะรูปสามเหลี่ยมซึ่งมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 60 V และมีความถี่ 15 Hz เพื่อใช้ในการหาพีคการดูดกลืนของรูบิเดียม ($D2$ hyperfine transitions) ดังรูปที่ 35 โดยแสดงให้เห็นสถานะการ กระตุ้น $5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{3/2}$ ของธาตุรูบิเดียมที่มี 2 ไอโซโทป (^{85}Rb และ ^{87}Rb) ที่ (a) $^{85}\text{Rb } F = 3 \rightarrow F'$, (b) $^{85}\text{Rb } F = 2 \rightarrow F'$, (c) $^{87}\text{Rb } F = 2 \rightarrow F'$, และ (d) $^{87}\text{Rb } F = 1 \rightarrow F'$



รูปที่ 35 สัญญาณการดูดกลืนของธาตุรูบิเดียม (สีฟ้า) และสัญญาณสามเหลี่ยม (สีเหลือง)

4.5 ผลการล็อกความยาวคลื่น ECDL

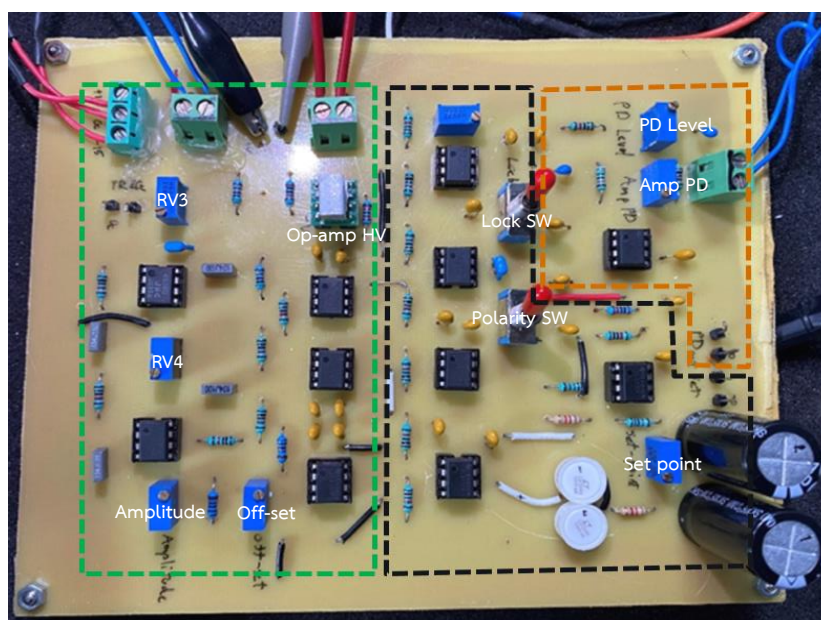
ในงานวิจัยนี้ต้องการล็อกความยาวคลื่นหรือความถี่ของ ECDL ให้คงที่อย่างน้อย 1 ชั่วโมง เพื่อเป็นการตรวจสอบความเสถียรของ ECDL ที่สร้างขึ้นโดยใช้วิธีการออกแบบที่ไม่มีฟิลเตอร์กรองแสง จึงได้สร้างแผ่นวงจร PCB จากแผนผังวงจรที่หัวข้อ 3.3.3, 3.3.4 และ 3.3.5 ดังรูปที่ 37 และแผนภาพแสดงวิธีการล็อกความถี่ของ ECDL โดยใช้สัญญาณการดุดกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของธาตุรูบิเดียม ดังรูปที่ 36



รูปที่ 36 แสดงจุดที่จะล็อกความยาวคลื่นของ $^{85}\text{Rb } F = 3 \rightarrow F'$

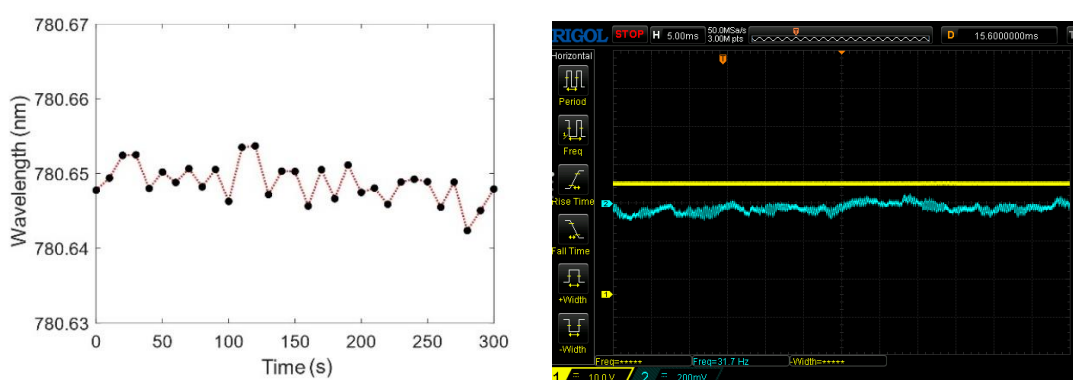
การล็อกความถี่หรือความยาวคลื่นของเลเซอร์ในงานวิจัยนี้ จะใช้วิธีล็อกที่สัญญาณสเปกตรัมการดุดกคลื่นแสงของธาตุรูบิเดียมดังรูปที่ 36 โดยใช้สเปกตรัมของ $^{85}\text{Rb } F = 3 \rightarrow F'$ มาใช้ในการล็อกความยาวคลื่น โดยจะล็อกที่ความชันด้านต่างๆ ของสเปกตรัม เช่นล็อกสัญญาณด้านความชันบวก (X สีเหลือง) และสัญญาณด้านความชันลบ (X สีแดง) เมื่อทำการเลือกความชันได้แล้วจะทำการลดสัญญาณสามเหลี่ยมให้คงที่ และจะล็อกความถี่หรือความยาวคลื่นโดยใช้วงจร PCB ที่สร้างขึ้นดังรูปที่ 37 ซึ่งจะแบ่งส่วนของวงจรเป็น 3 ส่วนคือ วงจรรับสัญญาณสเปกตรัมของรูบิเดียม (กรอบสีส้ม) วงจรรล็อกความถี่หรือความยาวคลื่นของ ECDL (กรอบสีดำ) และวงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยมเพื่อขับเพียโซอิเล็กทริก (กรอบสีเขียว) วงจรรับสัญญาณสเปกตรัมของรูบิเดียมจะมีตัวต้านทานที่ใช้รับค่าออฟเซต (PD Level) ของสัญญาณการดุดกคลื่นแสงของรูบิเดียม และตัวต้านทานปรับค่าอีกตัวหนึ่งใช้สำหรับปรับกำลังขยายของสัญญาณการดุดกคลื่นแสงของรูบิเดียม (Amp PD) ข้อควรระวังของวงจรในส่วนนี้คือความเข้มของแสงเลเซอร์ที่โฟโตไดโอดกับวงจรมีกำลังขยายมากเกินไป อาจทำให้วงจร

สัญญาณการดูดกลืนแสงของรูบิเดียมเกิดการอ้อมตัวส่งผลให้แสดงสัญญาณเป็นเส้นเรียบนิ่ง วิธีแก้ไข คือ การปรับค่าออฟเซต (PD Level) และปรับกำลังขยายให้น้อยลง (แนะนำให้เห็นฟิสิกการดูดกลืน ก่อนแล้วจึงปรับกำลังขยาย) วงจรล็อคความถี่หรือความยาวคลื่นของ ECDL จะใช้ในการล็อคความถี่ หรือความยาวคลื่น โดยจะสามารถกำหนดจุดที่ใช้ล็อคได้จากรูปที่ 36 แต่จะมีรายละเอียดในส่วน ของ วงจรคือ วงจรจะล็อคสัญญาณไฟฟ้าที่ 0 V ซึ่งสามารถปรับได้โดยใช้ตัวต้านทานเซตพอยท์ (Set point) และการล็อคความถี่จะมีสวิตช์สลับขั้ว Polarity SW สำหรับเลือกความถี่ที่ต้องการจะล็อค และ Lock SW ใช้สำหรับเปิดและปิดการล็อคความถี่ ข้อควรระวังของวงจรส่วนนี้คือเมื่อใช้วงจรไป ช่วงระยะเวลาหนึ่งจุดเซตพอยท์ที่ตั้งไว้ 0 V อาจมีการคลาดเคลื่อน และส่งผลให้ไม่สามารถล็อค สัญญาณดูดกลืนของรูบิเดียมได้ วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยมเพื่อขับเพียโซอิเล็กทริก โดยความถี่ และรูปร่างสัญญาณปรับได้โดยใช้ค่าตัวต้านทาน RV3 และ RV4 และสามารถปรับกำลังขยายและ ออฟเซตได้โดยใช้ตัวต้านทานชื่อแอมพลิจูด (Amplitude) และออฟเซต (Off-set) ตามลำดับ ข้อ ข้อควรระวังของวงจรนี้มักจะมีปัญหาเกี่ยวกับสัญญาณสามเหลี่ยมหายหรือไม่นิ่ง โดยสาเหตุส่วนใหญ่มา จากออปแอมป์แรงดันไฟฟ้าสูง (Op-amp HV) เสีย เสียบบางไม่แน่น หรือ เกิดความร้อนขึ้น วิธีแก้ไข หากตัวออปแอมป์แรงดันไฟฟ้าสูงเกิดความร้อนให้นำแหล่งรับความร้อน (Heat sink) มาติดตั้งบนตัว ของออปแอมป์แรงดันไฟฟ้าสูง ดังรูปที่ 37



รูปที่ 37 วงจร PCB ที่ใช้ในการล็อคความยาวคลื่นและดูสัญญาณการดูดกลืนของรูบิเดียม

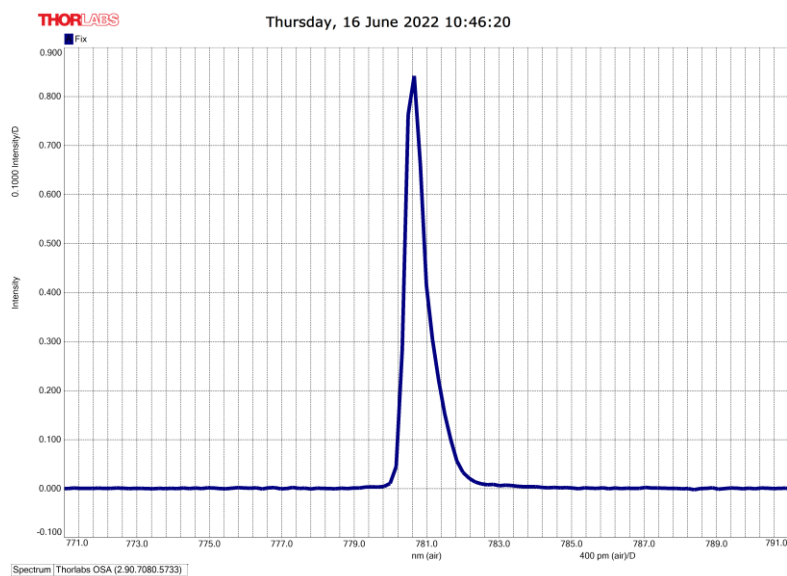
ในงานวิจัยนี้จะทำการตรวจสอบความยาวคลื่นโดยใช้สเปกโตรมิเตอร์วัดความยาวคลื่น ขณะที่ทำการล็อก ECDL และภาพถ่ายสัญญาณจากออสซิลโลสโคปขณะที่ล็อก ดังรูปที่ 38 (ขวา) โดยข้อมูลความยาวคลื่นจากสเปกโตรมิเตอร์ (ภาพซ้าย) ขณะที่ล็อกความถี่หรือความยาวคลื่นของ ECDL ตลอด 300 วินาที สังเกตได้ว่าความยาวคลื่นจะมีการขดเขยให้คงที่ โดยจะเฉลี่ยอยู่ที่ 780.65 nm และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.00 nm ภาพถ่ายจากออสซิลโลสโคปขณะที่ล็อกความยาวคลื่นของ ECDL ที่เวลา 1 ชั่วโมง 56 นาที และมีอุณหภูมิคงที่ที่ 18.6°C และสัญญาณโฟโตไดโอดจากการดูดกลืนของรูบิเดียม (สีฟ้า) อยู่ทีบริเวณที่กำลังล็อกความถี่หรือความยาวคลื่นที่ 0 V ตลอดการทดลอง โดยสัญญาณการดูดกลืนของรูบิเดียมที่ไม่นิ่งนี้อาจเกิดขึ้นจากหลายปัจจัย เช่น ความไม่เสถียรของอุณหภูมิหรือวงจรล็อกความยาวคลื่น เป็นต้น



รูปที่ 38 (ซ้าย) ความยาวคลื่นที่วัดจากสเปกโตรมิเตอร์ขณะที่ล็อกความถี่, (ขวา) ภาพถ่ายสัญญาณจากการดูดกลืนรูบิเดียมขณะที่ล็อกความถี่ (สีฟ้า) และศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้เพียโซอิเล็กทริก (สีเหลือง)

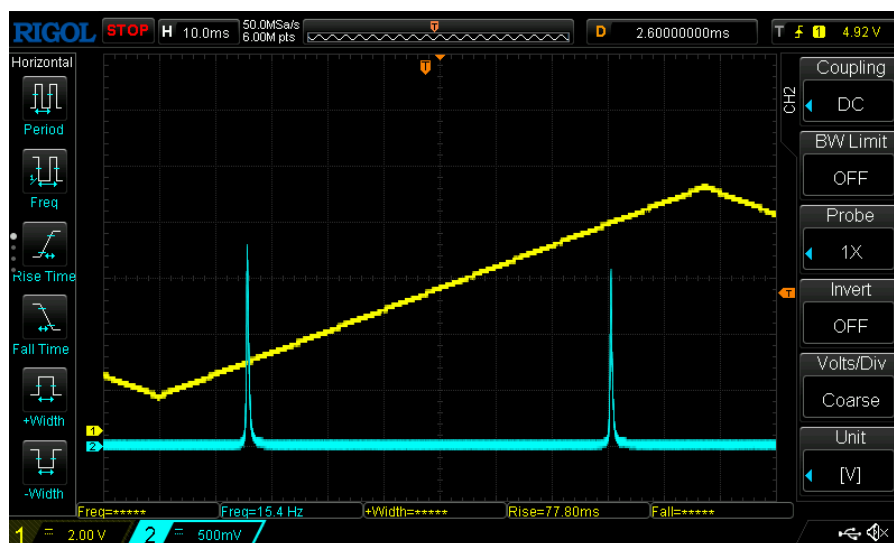
4.6 ผลความแม่นยำของเลเซอร์ชนิดโพรงภายในไม่มีฟิลเตอร์กรองแสง

งานวิจัยนี้ได้สร้างเลเซอร์ชนิดโพรงภายในไม่มีฟิลเตอร์กรองแสง โดยเปลี่ยนความยาวคลื่นของไดโอดเลเซอร์จาก 785 nm เป็น 780.24 nm จึงต้องมีการตรวจสอบค่าความยาวคลื่นโดยใช้การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของธาตุรูบิเดียมดังหัวข้อที่ 3.5 โดยการใช้สเปกโตรมิเตอร์ (Thorlabs CCS175/M) และการใช้ Fabry-Perot Spectrometers (SA210-5B)



รูปที่ 39 ความยาวคลื่นที่วัดได้จากการใช้ สเปกโตรมิเตอร์

จากรูปที่ 39 ความยาวคลื่นที่วัดได้จากเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (Thorlabs Compact CCD Spectrometers CCS175/M) ขณะที่ล๊อคความถี่หรือความยาวคลื่นของ ECDL โดยมีความยาวคลื่นที่ยอดพีคอยู่ที่ 780.62 nm และ FWHM เฉลี่ยอยู่ที่ 0.57 nm โดยความยาวคลื่นที่ไม่ตรงกับ ความยาวคลื่นสั่นพ้องของธาตุรูบิเดียมเป็นเพราะเมื่อตรวจสอบกับลักษณะของสเปกตรัมการดูดกลืนของ รูบิเดียมแล้ว พบว่าเครื่องสเปกโตรมิเตอร์มีค่าความยาวคลื่นคลาดเคลื่อนจากค่าจริงอยู่ประมาณ 0.4 nm



รูปที่ 40 Single-mode ของ ECDL ขณะเปิดใช้งานเครื่อง Fabry-Perot Spectrometers

จากรูปที่ 40 คือ สัญญาณจากเครื่อง Fabry-Perot Spectrometers ที่แสดงบน ออสซิลโลสโคป (RIGOL DS1054Z 50MHz 4CH Digital Oscilloscope) ขณะที่ล๊อคความยาวคลื่น ของ ECDL โดยสีเหลืองคือสัญญาณโวลต์ที่ใช้ขับเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) ของเครื่อง Fabry-Perot Interferometers และสีฟ้าคือสัญญาณโฟโตไดโอดของรีวรายการแทรกสอดของ ECDL พบว่า พิครีวรายการแทรกสอดที่เกิดขึ้นของ ECDL มีความเป็นโหมดเดี่ยว (Single mode laser) เนื่องจาก สัญญาณที่แสดงช่องว่างระหว่างพิกเพียงค่าเดียว

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

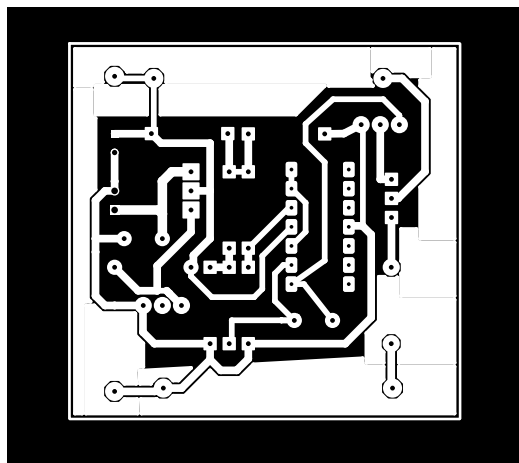
จากการศึกษาทดลองและสร้างเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกแบบไม่มีฟิลเตอร์กรองแสง พบว่าเลเซอร์ที่ถูกสร้างขึ้นสามารถทำงานได้ดี และมีความยาวคลื่นที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของระดับชั้นพลังงานของธาตุรูบิเดียมที่ 780.24 nm ซึ่งสามารถสังเกตได้จากหลอดแก้วรูบิเดียมเกิดการเปล่งแสง (รูปที่ 34) เมื่อนำโฟโตไดโอดมาสัญญาณการดูดกลืนของธาตุรูบิเดียมจะแสดงให้เห็นสถานะกระตุ้น $5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{3/2}$ ของธาตุรูบิเดียมที่มี 2 ไอโซโทป (^{85}Rb และ ^{87}Rb) ซึ่งสอดคล้องกับแถบการดูดกลืนสเปกตรัมของธาตุรูบิเดียม (Saturated absorption spectra of D2 transition in Rb) จากผลการทดลองเพิ่มเติมพบว่า การที่แสงเลเซอร์จาก ECDL จะกระตุ้นอะตอมรูบิเดียมได้นั้น จำเป็นต้องมีค่าอุณหภูมิและกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยค่าอุณหภูมิจะแปรผันตรงกับความยาวคลื่นของ ECDL สำหรับการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ ในงานวิจัยนี้จะใช้วงจรอุณหภูมิที่สร้างขึ้นสำหรับใช้ทำความเย็นให้กับ ECDL โดยมีการทดลองความเสถียรของวงจรควบคุมอุณหภูมิได้ผลว่ามีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) 0.048 $^{\circ}\text{C}$ และจำเป็นต้องเปิดวงจรคุมอุณหภูมิมากกว่า 30 นาที เป็นต้นไป ผลการล๊อคความถี่หรือความยาวคลื่นของเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกแบบไม่มีฟิลเตอร์กรองแสงจากวงจร PCB ที่สร้างขึ้นสามารถล๊อคได้นานที่สุดที่ 2 ชั่วโมง 20 นาที โดยเกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าจ่ายให้กับไดโอดเลเซอร์เท่ากับ 120.5 mA และมีอุณหภูมิของ ECDL ในช่วง 18.6 – 18.7 $^{\circ}\text{C}$ ซึ่งในขณะทำการล๊อคความถี่หรือความยาวคลื่นของเลเซอร์ชนิดโพรงภายนอกแบบไม่มีฟิลเตอร์กรองแสง ได้มีการทดลองวัดความยาวคลื่นเพิ่มเติมผ่านการใช้สเปกโตรมิเตอร์ (Thorlabs CCS175/M) และการใช้ Fabry-Perot Spectrometers (SA210-5B) โดยจะได้ความยาวคลื่นที่เยื้องฟิที่อยู่ 780.62 nm และ FWHM เฉลี่ยอยู่ที่ 0.57 nm และได้สัญญาณการแทรกสอดที่ชัดเจนแสดงถึงการมีความยาวคลื่นเดียว ตามลำดับ งานวิจัยนี้สามารถนำ ECDL ไปใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ในการทดลองสร้างอะตอมเย็น (Cold Atom) หรือ นำไปใช้เป็นเลเซอร์ตรวจวัด (Probe laser) สำหรับการทดลองอะตอมริดเบิร์ก (Rydberg atom) ต่อไป

ภาคผนวก

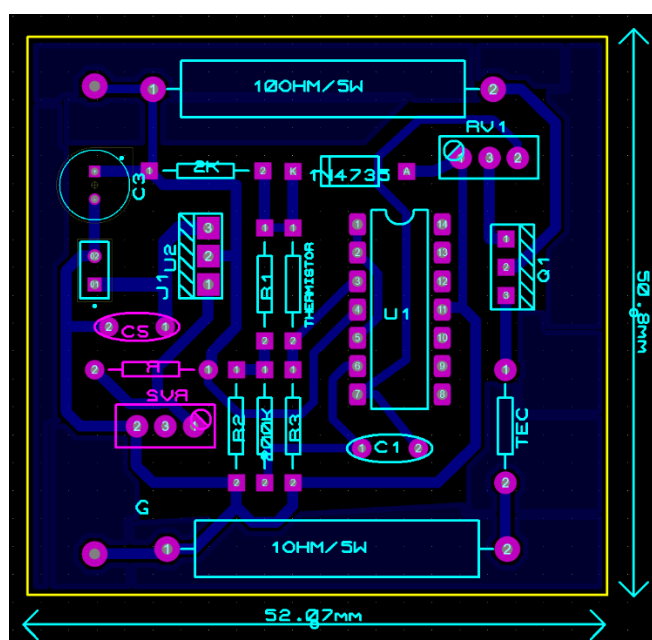


2031790634

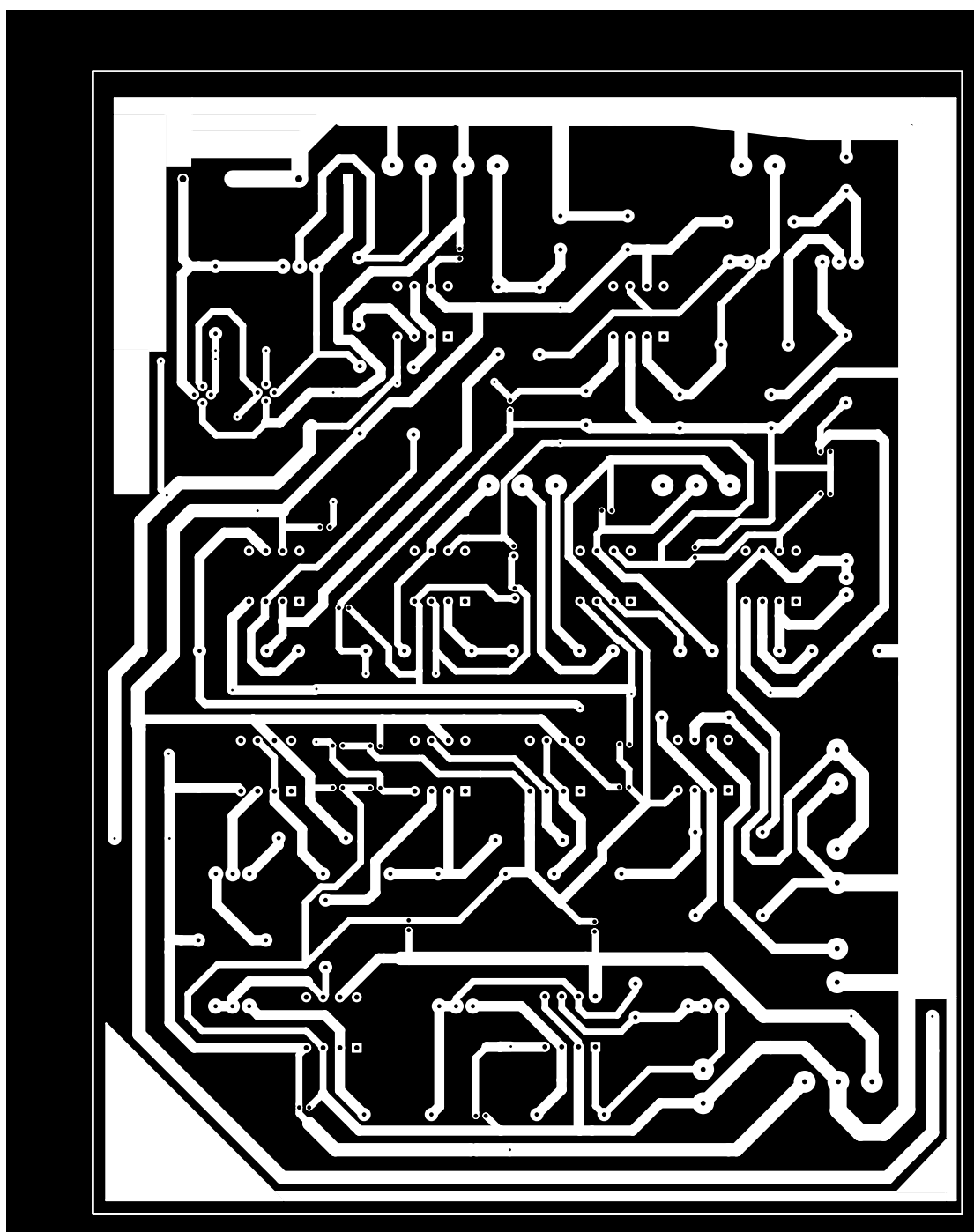
BUU iThesis 63910192 thesis / rcv: 27112565 19:04:43 / seq: 63



รูปที่ 41 แผ่น PCB ขนาดจริงของวงจรควบคุมอุณหภูมิ

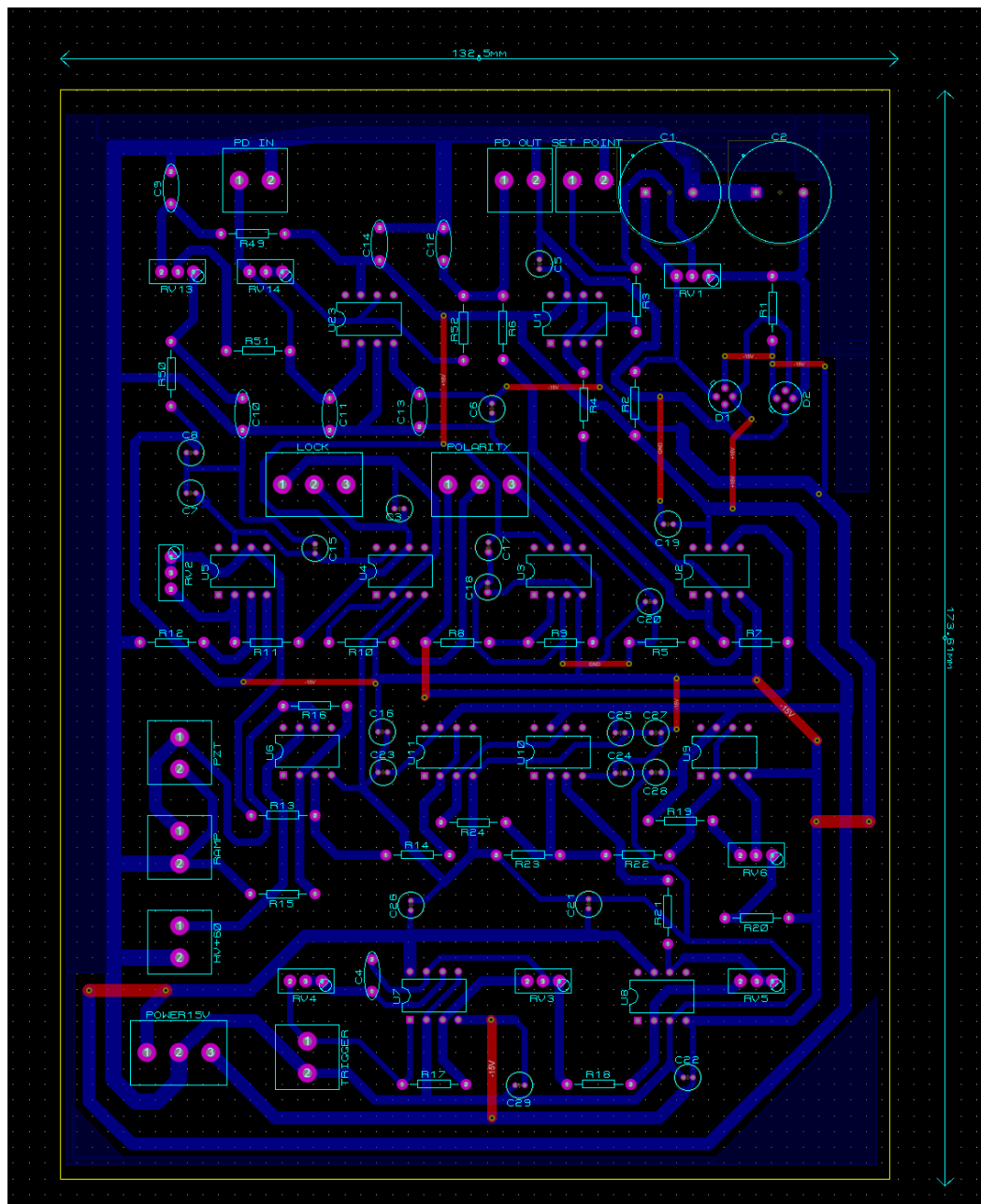


รูปที่ 42 แผนผัง PCB ของวงจรควบคุมอุณหภูมิจากโปรแกรม Proteus

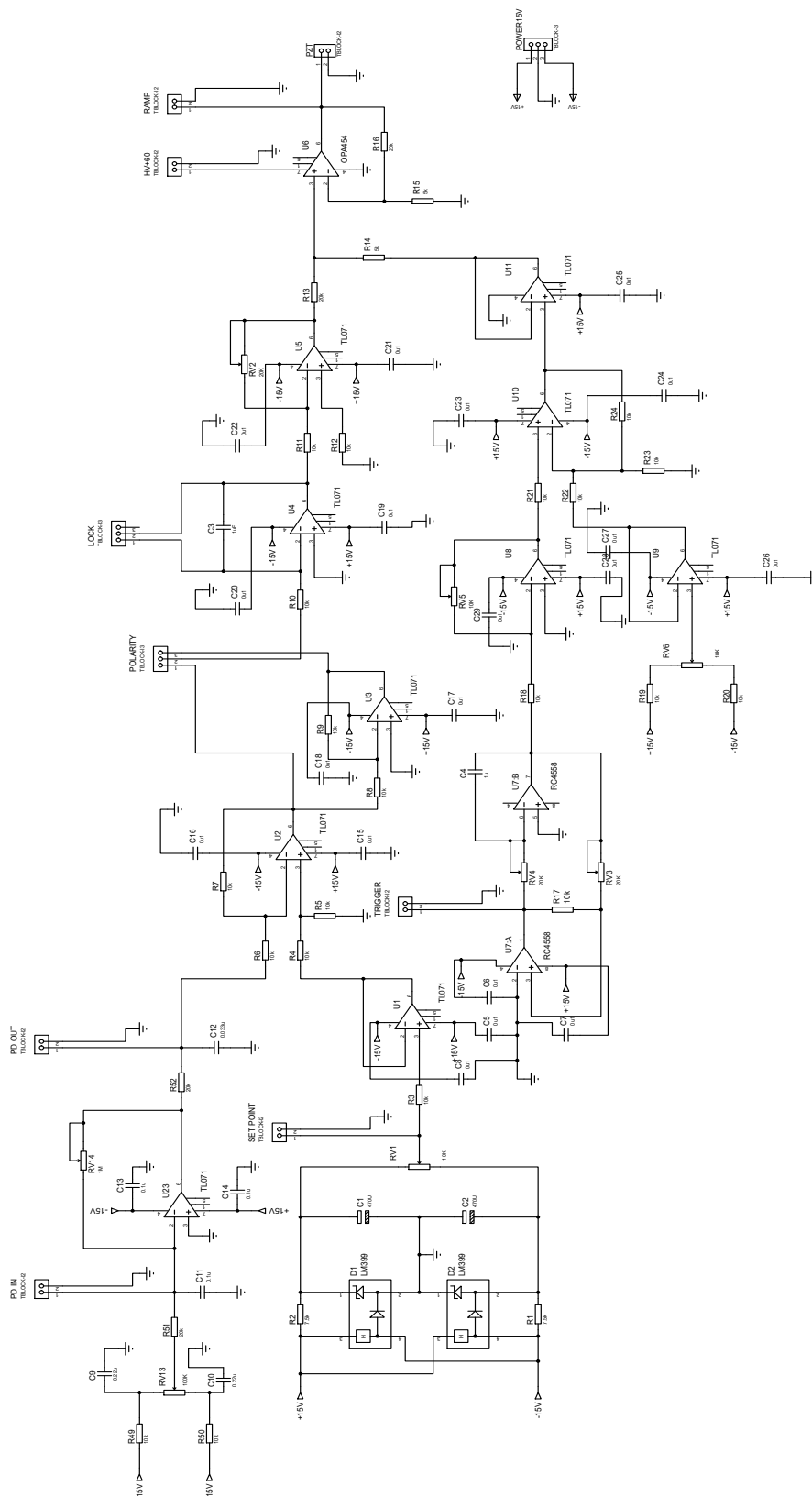


รูปที่ 43 แผ่น PCB ขนาดจริงของวงจรลอจิกความยาวคลื่นและคุณสมบัติสัญญาณการดูดกลืนของรูบี้เดี่ยว





รูปที่ 44 แผนผัง PCB ของวงจรล็อคความยาวคลื่นและคุณสมบัติการดูดกลืนของรูปเคียมจากโปรแกรม Proteus



รูปที่ 45 แผนผังรวมทั้งหมดของวงจรลอจิกความยาวคลื่นและตุลย์ญาณการตุคกลืนของรูปเคียม



```

TempDisplay | Arduino 1.8.19 (Windows Store 1.8.57.0)
File Edit Sketch Tools Help

TempDisplay
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>
Adafruit_SSD1306 display;

const int voltageSensor = A1;
float vOUT = 0.0;
float vIN = 0.0;
float R1 = 10000.0;
float R2 = 1480.0;
float Vdata = 0;
float V;
float value;

void setup() {

    display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C);
    display.clearDisplay();
    display.setTextColor(WHITE);
    display.setTextSize(1);
    display.display();

}
void loop() {

//float vIN = 0.0;

    for(int i = 0; i < 300; i++) // เก็บค่า 300 ครั้ง มาเฉลี่ยให้ค่าแม่นยำ
    {
        Vdata = Vdata + analogRead(voltageSensor);
        delay(1);
    }

    Vdata=Vdata/300; // เฉลี่ยค่า volt
    vOUT = (Vdata * 5.0) / 1024.0; // analog-to-digital converter
    vIN = (vOUT / (R2/(R1+R2))); //สมการแบ่งแรงดัน

// OLED
    display.setTextColor(WHITE);

    // แสดงผลบนจอ OLED 0.96 นิ้ว
    display.setTextSize(1);
    display.setCursor(58,39);
    display.print(" Volt");
    display.setCursor(0,32);
    display.setTextSize(2);
    display.println(vIN);

    display.display();
    display.clearDisplay();

// Reset ตัวแปร
    V=0;
    Vdata=0;
    vIN=0;
    value;

}

```

รูปที่ 46 โค้ดภาษา C ใช้ควบคุมการแสดงผลของบอร์ด Arduino จากโปรแกรม Arduino IDE

จำนวนข้อมูล	อุณหภูมิ (C)	ความยาวคลื่น (nm)
1	23.9	780.9
2	23.5	780.6
3	22.8	780.6
4	22.5	780.4
5	22.2	780.5
6	21.6	780.4
7	21.3	780.4
8	20.8	780.1
9	20.3	779.7
10	19.9	779.7
11	19.6	779.4
12	19.2	779.1
13	18.7	779.2
14	18.5	779.1
15	18.3	779.1
16	18.0	779.1
17	17.7	779.0

ตารางที่ 1 ชุดข้อมูลผลการทดลองของความยาวคลื่นต่ออุณหภูมิของ ECDL

จำนวนข้อมูล	อุณหภูมิ (C)	กระแสไฟฟ้า (mA)
1	24.0	74.8
2	23.5	79.8
3	23.0	84.8
4	22.6	89.8
5	22.2	96.8
6	21.6	104.7
7	21.3	108.1
8	20.8	115.2
9	20.3	121.1
10	19.9	126.2
11	19.6	114.5
12	19.2	119.3
13	18.7	127.2
14	18.5	129.8
15	18.3	131.8
16	18.0	135.7
17	17.7	138.5

ตารางที่ 2 ชุดข้อมูลผลการทดลองของการปรับกระแสไฟฟ้าให้ ECDL ที่อุณหภูมิต่างๆ ให้เกิดการ
ดูดกลืนของรูบิเดียม 85

จำนวนข้อมูล	อุณหภูมิ (C)	แรงดันไฟฟ้า (V)
1	24.0	2.75
2	23.5	3.08
3	23.0	3.4
4	22.6	3.84
5	22.2	4.07
6	21.6	4.72
7	21.3	4.96
8	20.8	5.59
9	20.3	6.11
10	19.9	6.59
11	19.6	7.01
12	19.2	7.46
13	18.7	7.96
14	18.5	8.31
15	18.3	8.66
16	18.0	9.05
17	17.7	9.5

ตารางที่ 3 ชุดข้อมูลผลการทดลองของอุณหภูมิต่อแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรควบคุมอุณหภูมิ

จำนวนข้อมูล	เวลา (s)	ความยาวคลื่น (nm)
1	0	780.6
2	10	780.6
3	20	780.6
4	30	780.6
5	40	780.6
6	50	780.6
7	60	780.6
8	70	780.6
9	80	780.6
10	90	780.6
11	100	780.6
12	110	780.6
13	120	780.6
14	130	780.6
15	140	780.6
16	150	780.6
17	160	780.6
18	170	780.6
19	180	780.6
20	190	780.6
21	200	780.6
22	210	780.6
23	220	780.6
24	230	780.6
25	240	780.6
26	250	780.6
27	260	780.6
28	270	780.6
29	280	780.6

30	290	780.6
31	300	780.6

ตารางที่ 4 ข้อมูลผลการทดลองวัดความยาวคลื่นจากสเปกโตรมิเตอร์ขณะที่สื่อความถี่



2031790634

BUU iThesis 63910192 thesis / rcv: 27112565 19:04:43 / seq: 63

บรรณานุกรม

1. Ip, E., et al., *Coherent detection in optical fiber systems*. Optics express, 2008. **16**(2): p. 753-791.
2. 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): p. 023107.
3. Harvey, K. and C. Myatt, *External-cavity diode laser using a grazing-incidence diffraction grating*. Optics letters, 1991. **16**(12): p. 910-912.
4. Baillard, X., et al., *Interference-filter-stabilized external-cavity diode lasers*. Optics Communications, 2006. **266**(2): p. 609-613.
5. Wei, C.-h., et al., *Compact external cavity diode laser for quantum experiments*. Optoelectronics Letters, 2020. **16**(6): p. 433-436.
6. Temnuch, W., et al. *Low-cost external cavity diode laser for cold atom experiments*. in *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. IOP Publishing.
7. Martin, A., P. Baus, and G. Birkel, *External cavity diode laser setup with two interference filters*. Applied Physics B, 2016. **122**(12): p. 1-6.
8. Takamizawa, A., S. Yanagimachi, and T. Ikegami, *External cavity diode laser with very-low frequency drift*. Applied Physics Express, 2016. **9**(3): p. 032704.
9. Einstein, A., *Zur quantentheorie der strahlung*. Phys. Z., 1917. **18**: p. 124.
10. Schawlow, A.L. and C.H. Townes, *Infrared and optical masers*. Physical Review, 1958. **112**(6): p. 1940.
11. Maiman, T.H., *Stimulated optical radiation in ruby*. 1960.
12. Gourzoulidis, G., et al. *THE IDENTIFICATION OF OCCUPATIONAL EXPOSURE TO LASER RADIATION IN GREECE*. in *International Conference and School on Quantum Electronics" Laser Physics and Applications"-ICSQE*. 2017.
13. Matos, R., et al., *High-efficiency solar laser pumping by a modified ring-array concentrator*. Optics Communications, 2018. **420**: p. 6-13.
14. Jeyapragash, N., C.-H. Yang, and M.B. Kumar, *Laser Machining*, in *Practical Applications of Laser Ablation*. 2020, IntechOpen.
15. britannica.com. *Fundamental principles Energy levels and stimulated emissions*.

2006; Available from:

<https://www.britannica.com/technology/laser/Fundamental-principles>.

16. Malickova, I., *Laser Effect in the Optical Luminescence of Oxide Containing Cr*. ACTA Geologica Slovaca, 2018. **10**(1): p. 27-34.
17. photonics, R. *Polarization of Light*. Available from: https://www.rp-photonics.com/polarization_of_light.html.
18. Newport. *Laser Diode Technology*. Available from: <https://www.newport.com/t/laser-diode-technology>.
19. electronics, P.a.r. *Semiconductor laser diode*. Available from: <https://www.physics-and-radio-electronics.com/electronic-devices-and-circuits/semiconductor-diodes/laserdiode.html>.
20. Saliba, S.D. and R.E. Scholten, *Linewidths below 100 kHz with external cavity diode lasers*. Applied optics, 2009. **48**(36): p. 6961-6966.
21. Lecomte, S., et al., *Self-aligned extended-cavity diode laser stabilized by the Zeeman effect on the cesium D 2 line*. Applied optics, 2000. **39**(9): p. 1426-1429.
22. Saliba, S.D., et al., *Mode stability of external cavity diode lasers*. Applied optics, 2009. **48**(35): p. 6692-6700.
23. MOG, L. 2012.
24. Perot, A. and C. Fabry, *On the application of interference phenomena to the solution of various problems of spectroscopy and metrology*. The Astrophysical Journal, 1899. **9**: p. 87.
25. Hyperphysics. *Fabry-Perot Interferometer*. Available from: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/fabry.html#c1>.
26. Refaat, T.F., W.S. Luck Jr, and R.J. DeYoung, *Temperature control of avalanche photodiode using thermoelectric cooler*. 1999.
27. Heumier, T.A., *Mode hopping in semiconductor lasers*. 1992, Montana State University-Bozeman, College of Letters & Science.