

การวัดค่าสภาพแพร่ทางความร้อนของแคดเมียมซัลไฟด์
โดยใช้เทคนิคโฟโตอะคูสติก

THERMAL DIFFUSIVITY MEASUREMENT OF CdS
USING PHOTOACOUSTIC TECHNIQUE



โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

การวัดค่าสภาพแพร่ทางความร้อนของแคดเมียมซัลไฟด์
โดยใช้เทคนิคโฟโตอะคูสติก
THERMAL DIFFUSIVITY MEASUREMENT OF CdS
USING PHOTOACOUSTIC TECHNIQUE



โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับปริญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

THERMAL DIFFUSIVITY MEASUREMENT OF CdS
USING PHOTOACOUSTIC TECHNIQUE



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN APPLIED PHYSICS

DEPARTMENT OF PHYSICS
FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนี้ ผิดอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การวัดค่าสภาพแพร่ทางความร้อนของแคดเมียมซัลไฟด์โดยใช้เทคนิคโฟโตอะคูสติก	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวมนฤทัย กกฟ้า	รหัสนักศึกษา 54050575
	นางสาวมูทิตา มาตยาขัน	รหัสนักศึกษา 54050576
	นายสวัสดิพงษ์ พูลสวัสดิ์	รหัสนักศึกษา 54050611
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์	
ภาควิชา	ฟิสิกส์	
ปีการศึกษา	2557	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. วิชาญ เตชิตธีระ	

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้เราได้ทำการหาค่าค่าช่องว่างพลังงานและค่าสภาพแพร่ทางความร้อนของแคดเมียมซัลไฟด์โดยใช้เทคนิคโฟโตอะคูสติก ซึ่งค่าช่องว่างพลังงานที่ได้มีค่าเท่ากับ 2.41 อิเล็กตรอนโวลต์ ถือว่าใกล้เคียงกับค่าที่ยอมรับคือ 2.42 อิเล็กตรอนโวลต์ ส่วนค่าสภาพแพร่ทางความร้อนของแคดเมียมซัลไฟด์ที่มีความหนาแตกต่างกัน 3 ตัวอย่าง ผลที่ได้คือ แคดเมียมซัลไฟด์ที่มีความหนาเท่ากับ 0.042 เซนติเมตร ค่าสภาพแพร่ทางความร้อนเท่ากับ $1.14 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$, แคดเมียมซัลไฟด์ที่มีความหนาเท่ากับ 0.077 เซนติเมตร ค่าสภาพแพร่ทางความร้อนเท่ากับ $3.69 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ และแคดเมียมซัลไฟด์ที่มีความหนาเท่ากับ 0.123 เซนติเมตร ค่าสภาพแพร่ทางความร้อน เท่ากับ $9.01 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ เมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าทฤษฎีจะพบว่าค่าที่ได้นั้นอยู่ในอเดอร์เดียวกัน (ค่าทฤษฎีมีค่าเท่ากับ $8.83 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$)

คำสำคัญ : ค่าช่องว่างพลังงาน ค่าสภาพแพร่ทางความร้อน แคดเมียมซัลไฟด์ เทคนิคโฟโตอะคูสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Project Title	THERMAL DIFFUSIVITY MEASUREMENT OF CdS USING PHOTOACOUSTIC TECHNIQUE		
Student	Miss Monrutai	Kokfa	Student ID 54050575
	Miss Mutita	Mattayakan	Student ID 54050576
	Mr. Sawatdipong	Poonsawat	Student ID 54050611
Degree	Bachelor of Science in Applied Physics		
Department	Physics		
Academic Year	2014		
Project Advisor	Assoc. Prof. Wicharn Techitdheera		

ABSTRACT

In this experiment we report a measure energy gap and thermal diffusivity of cadmium sulfide by using photoacoustic technique. The energy gap of cadmium sulfide from our experiment is equal 2.41 eV with respect to 2.42 eV from the accepted value. We measure thermal diffusivity of cadmium sulfide with three thicknesses a result are cadmium sulfide at thickness equal 0.042 centimeters thermal diffusivity equal $1.1 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$, cadmium sulfide at thickness equal 0.077 centimeters thermal diffusivity equal $3.7 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ and cadmium sulfide at thickness equal 0.123 cm thermal diffusivity equal $9.0 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$. For comparison, these resulting values are of the same order of the theoretical value (theoretical value of cadmium sulfide is equal $8.83 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$).

Keywords : cadmium sulfide, energy gap, photoacoustic technique, thermal diffusivity

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษครั้งนี้จะไม่เสร็จสมบูรณ์ได้หากไม่มี รศ.วิชาญ เตชิตธีระ ผู้ซึ่งคอยให้คำแนะนำ ให้ความรู้ สนับสนุน และช่วยแก้ไขในสิ่งที่ผิดพลาด ต้องขอขอบพระคุณรศ.วิชาญ เตชิตธีระ มา ณ ที่นี้ด้วย

นอกจากนี้เราขอขอบพระคุณ ดร.พิชานันท์ ธีเศรษฐ์โสภณ และดร.วิฑูรย์ ยินดีสุขที่ได้ให้ คำแนะนำดีๆในการทำงานในครั้งนี้

สุดท้ายขอขอบพระคุณคณะกรรมการทุกท่านที่ได้ร่วมแบ่งปันความรู้และประสบการณ์ดีๆในการทำงานให้เรา และรวมถึงการให้ความคิดเห็นดีๆต่างๆมากมาย



มนฤทัย
มูทิตา
สวัสดิพงษ์

กกฟ้า
มาตยาขัน
พูลสวัสดิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	1
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย	1
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎี	
2.1 รูปแบบพื้นฐานการส่งผ่านความร้อน	3
2.1.1 รูปแบบพื้นฐานของการถ่ายเทความร้อน	3
2.1.2 สมการอนุพันธ์ของการนำความร้อน	5
2.1.3 การเกิดคลื่นความร้อนและการแผ่ขยาย	8
2.2 การกำเนิดคลื่นความร้อนทางแสง-ปรากฏการณ์โฟโตเทอร์มอล	12
2.2.1 การสะท้อนกลับที่พื้นผิว	12
2.2.2 การดูดกลืนในเนื้อสาร	17
2.2.3 การดูดกลืนในชั้นผิวบาง	20
2.3 ทฤษฎี Rosencwaig – Gersho ของการวัดสภาพแพร่ทางความร้อน	21
2.4 เครื่องมือและเทคนิคการตรวจวัด	22
2.4.1 แหล่งกำเนิดแสง	23
2.4.2 เทคนิคการมอดูเลต	26
2.4.3 ระบบการตรวจจับ	27
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน	
3.1 การจัดชุดทดลองโฟโตอะคูสติกสเปกโตรสโกปี	29
3.1.1 แหล่งกำเนิดแสง	29
3.1.2 ตัวแยกความยาวคลื่น	30
3.1.3 ตัวตัดแสง	31
3.1.4 โฟโตอะคูสติกเซลล์	32
3.1.5 เครื่องขยายสัญญาณลือคอิน	33
3.2 โปรแกรมที่ใช้ควบคุมการทำงานของโมโนโครเมเตอร์	34

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 การเตรียมสารตัวอย่าง	38
3.3.1 คาร์บอน แบล็ค	38
3.3.2 แคดเมียมซัลไฟด์	38
3.4 การทดลอง	40
3.4.1 การหาช่องว่างแถบพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์	40
3.4.2 การหาค่าสภาพแพร่ทางความร้อนของแคดเมียมซัลไฟด์	41
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 การหาค่าช่องว่างพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์	43
4.1.1 การวัดสเปกตรัมโฟโตอะคูสติคของคาร์บอนแบล็ค	43
4.1.2 การวัดสเปกตรัมโฟโตอะคูสติคของแคดเมียมซัลไฟด์	47
4.1.3 สเปกตรัมที่ผ่านการนอร์มอลไลซ์ของแคดเมียมซัลไฟด์	51
4.2 การหาค่าสภาพแพร่ทางความร้อนของแคดเมียมซัลไฟด์	54
4.2.1 ความหนา เท่ากับ 0.042 เซนติเมตร	55
4.2.2 ความหนา เท่ากับ 0.077 เซนติเมตร	58
4.2.3 ความหนา เท่ากับ 0.123 เซนติเมตร	61
บทที่ 5 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง	
5.1 การหาค่าช่องว่างพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์	64
5.2 การหาค่าสภาพแพร่ทางความร้อนของแคดเมียมซัลไฟด์	64
5.3 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	65
เอกสารอ้างอิง	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	ระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการ	2
2.1	คุณสมบัติทางกายภาพและทางความร้อนในวัสดุบางชนิด	15
2.2	การเปรียบเทียบระหว่างการดูดกลืนกับระยะเวลาแพร่ความร้อน μ ของวัสดุต่างๆ	19
2.3	แหล่งกำเนิดแสงที่ถูกใช้ในการศึกษาโฟโตเทอร์มอล	31
4.1	ค่าสัญญาณโฟโตอะคูสติกของคาร์บอนแบล็ค	52
4.2	ค่าสัญญาณโฟโตอะคูสติกของแคดเมียมซัลไฟด์	56
4.3	ค่าสัญญาณโฟโตอะคูสติกของคาร์บอนแบล็คและแคดเมียมซัลไฟด์ที่ได้ทำการนอร์มอลไลซ์แล้ว	60
4.4	แสดงค่าแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ค่าความถี่ 4-40 เฮิร์ตซ์ ของตัวอย่างที่มีความหนา 0.042 เซนติเมตร	65
4.5	แสดงค่าแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ค่าความถี่ 4-40 เฮิร์ตซ์ ของตัวอย่างที่มีความหนา 0.077 เซนติเมตร	68
4.6	แสดงค่าแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ค่าความถี่ 4-40 เฮิร์ตซ์ ของตัวอย่างที่มีความหนา 0.123 เซนติเมตร	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในแบบต่างๆ	3
2.2	แสดงปริมาตรย่อยสำหรับการวิเคราะห์การนำความร้อนในระบบพิกัดฉาก	6
2.3	แสดงแอมพลิจูดและเฟสของคลื่นความร้อนที่พล็อตกับฟังก์ชันความลึกของพื้นผิว	9
2.4	แสดงการพล็อตระหว่างระยะการแพร่กับความถี่ สำหรับสำหรับ (1) อะลูมิเนียม, (2) สแตนเลส, (3) อากาศ และ (4) เบกเกิลไลท์	10
2.5	แสดงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อนและตกกระทบบนพื้นผิวของโลหะ	13
2.6	ภาพแผนผังการเปลี่ยนระดับพลังงานภายในวัสดุ	14
2.7	แสดงกราฟที่พล็อตระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกับความยาวคลื่นของโลหะ (Al - อะลูมิเนียม, Au - ทอง, Fe - เหล็ก และ W - ทังสเตน)	15
2.8	แสดงการพล็อตกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกับความยาวคลื่นของซิลิคอนและเจอร์เมเนียมที่เป็นผลึกเดี่ยว	16
2.9	แสดงกราฟที่พล็อตระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกับความยาวคลื่นของเพชร	17
2.10	แผนภาพตัวอย่างของตำแหน่งและแอมพลิจูดของความร้อนที่เกิดขึ้นจากแสงในตัวกลางโปร่งแสงที่เป็น Semi - infinite	18
2.11	แสดงกราฟพหุนาม (ก) และเฟส (ข) ที่แปรผันกับความถี่สำหรับตัวกลางที่เป็น Semi - infinite	19
2.12	แสดงปรากฏการณ์โฟโตเทอร์มอลที่เกิดจากลำแสงมอดูเลตตกกระทบพื้นผิวของตัวอย่าง	23
2.13	แสดงสเปกตรัมการปลดปล่อยของหลอดขึ้นอนความดันสูง	25
2.14	กระบวนกรมอดูเลตแบบอะคูสติกออปติก	27
2.15	กระบวนกรมอดูเลตแบบอเล็กโตรออปติก	27
3.1	แผนภาพแสดงการจัดระบบโฟโตอะคูสติกสเปกโตสโกปี	29
3.2	แหล่งกำเนิดแสง Xenon lamp ขนาด 450 วัตต์	30
3.3	แสดงภาพภายในตัวแยกความยาวคลื่นและเส้นทางเดินของแสง	30
3.4	ตัวแยกความยาวคลื่นรุ่น iHR320 (HORIBA JOBIN YVON, Inc.)	31
3.5	แผนภาพแสดงการทำงานของตัวตัดแสงโดยคร่าว	31
3.6	ใบพัดตัดแสงและตัวควบคุมรุ่น SR540 (Stanford Research Systems, Inc.)	32
3.7	แสดงภาพภายในโฟโตอะคูสติกเซลล์โดยสังเขป	32
3.8	โฟโตอะคูสติกเซลล์ MTEC MODEL 300 (MTEC Photoacoustics, Inc.)	33
3.9	แสดงแผนภาพของเครื่องขยายสัญญาณลอคอินรุ่น SR510 (Stanford Research Systems, Inc.)	33
3.10	เครื่องขยายสัญญาณลอคอินรุ่น SR510 (Stanford Research Systems, Inc.)	34
3.11	ภาพแสดงส่วนประกอบของโมโนโครเมเตอร์ iHR 320	34
3.12	แสดงโปรแกรมที่ใช้ควบคุมการทำงาน	35

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.13	แสดงหน้าต่างโปรแกรมในการควบคุมตัวแยกความยาวคลื่น	35
3.14	คาร์บอนแบล็ค (Carbon black)	38
3.15	แสดงแคดเมียมซัลไฟด์ที่ใช้ในการทดลอง	39
3.16	แสดงบล็อกอัดสาร	39
3.17	แสดงแท่นอัดไฮดรอลิก	40
3.18	แสดงระบบโฟโตอะคูสติกที่ใช้ทดลอง	41
4.1	แสดงสเปกตรัมโฟโตอะคูสติกของคาร์บอนแบล็ค	46
4.2	แสดงสเปกตรัมโฟโตอะคูสติกของแคดเมียมซัลไฟด์	50
4.3	แสดงสเปกตรัมโฟโตอะคูสติกที่ผ่านการนอร์มอลไลซ์	54
4.4	แสดงกราฟที่พล็อตระหว่างค่าเฉลี่ยแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกกับค่าความถี่ของตัวตัดแสง สำหรับตัวอย่างที่มีความหนา 0.042 เซนติเมตร	57
4.5	แสดงกราฟที่พล็อตระหว่าง \log ของแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกกับ \log ของความถี่ ของตัวอย่างที่มีความหนา 0.042 เซนติเมตร	57
4.6	แสดงกราฟที่พล็อตระหว่างค่าเฉลี่ยแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกกับค่าความถี่ของตัวตัดแสง สำหรับตัวอย่างที่มีความหนา 0.077 เซนติเมตร	60
4.7	แสดงกราฟที่พล็อตระหว่าง \log ของแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกกับ \log ของความถี่ ของตัวอย่างที่มีความหนา 0.077 เซนติเมตร	60
4.8	แสดงกราฟที่พล็อตระหว่างค่าเฉลี่ยแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกกับค่าความถี่ของตัวตัดแสง สำหรับตัวอย่างที่มีความหนา 0.123 เซนติเมตร	63
4.9	แสดงกราฟที่พล็อตระหว่าง \log ของแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกกับ \log ของความถี่ ของตัวอย่างที่มีความหนา 0.123 เซนติเมตร	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

แคดเมียมซัลไฟด์ได้ถูกนำมาศึกษาในงานวิจัยอย่างกว้างขวาง โดยหลักๆจะเกี่ยวกับงานด้านอิเล็กทรอนิกส์ อาทิ เช่น ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า (Field effect transistor, FET) และเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) อีกทั้งแคดเมียมซัลไฟด์ยังเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการทำรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ (Heterojunction) สำหรับการทำเซลล์แสงอาทิตย์บางประเภท ดังนั้นแคดเมียมซัลไฟด์จึงเป็นสารประกอบที่สำคัญในอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำ ทำให้มีหลายงานวิจัยที่ศึกษาคุณสมบัติทางความร้อนของแคดเมียมซัลไฟด์ เพราะความร้อนอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของสารกึ่งตัวนำ

จากการค้นคว้าหาข้อมูล พบว่าค่าสภาพแพร่ทางความร้อนของแคดเมียมซัลไฟด์ที่ถูกระบุโดยหลายๆแหล่งข้อมูลมีค่าแตกต่างกัน เราจึงได้จัดการทดลองเพื่อที่จะหาค่าสภาพแพร่ทางความร้อนแล้วนำมาเปรียบเทียบกับแหล่งข้อมูลอื่นๆ โดยเทคนิคที่เราจะนำมาหาค่าสภาพแพร่ทางความร้อน คือ เทคนิคโพโตอะคูสติก

เทคนิคโพโตอะคูสติกเป็นเทคนิคการตรวจจับโฟโตเทอร์มอล ซึ่งมีประโยชน์ต่อการศึกษาคุณสมบัติทางแสงและความร้อนของวัสดุ เทคนิคนี้มีข้อดีคือ เป็นเทคนิคที่จัดอยู่ในการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย ฉะนั้นสารตัวอย่างที่ผ่านการตรวจสอบแล้วจะมีลักษณะสมบูรณ์ดังเดิม และเทคนิคนี้ยังไม่ต้องยุ่งยากในการเตรียมสารตัวอย่างอีกด้วย โดยเทคนิคนี้สารตัวอย่างของเราจะถูกนำไปวางในห้องปิดแล้วทำการฉายแสงลงไปยังสารตัวอย่าง เมื่อสารตัวอย่างดูดกลืนและปลดปล่อยคลื่นความร้อนออกมา จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความดันภายในห้องปิดซึ่งจะถูกตรวจจับด้วยไมโครโฟน เทคนิคนี้ถูกค้นพบโดย Graham Bell เป็นครั้งแรกในปี ค.ศ.1880 แต่ถูกอธิบายอย่างสมบูรณ์ในปี ค.ศ.1970 โดย Rosencwaig - Gersho และได้ตั้งทฤษฎี Rosencwaig - Gersho (RG Theory) เพื่ออธิบายปรากฏการณ์โฟโตเทอร์มอล

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ทดสอบการใช้งานของระบบโพโตอะคูสติกสเปกโตรสโกปี
- 1.2.2 วัดค่าสภาพแพร่ทางความร้อนของแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS)
- 1.2.3 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS)

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 สร้างระบบโพโตอะคูสติกสเปกโตรสโกปีโดยใช้โพโตอะคูสติกเป็นตัวตรวจวัด
- 1.3.2 ทดสอบการใช้งานของระบบกับแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS)

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน การงานวิจัย

- 1.4.1 ขั้นตอนการดำเนินงานต่างๆ สามารถแบ่งได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อถูกขอให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่1 ศึกษาข้อมูลต่างๆเกี่ยวกับโฟโตอะคูสติกสเปกโตรสโกปี

ขั้นตอนที่2 ศึกษาการใช้งานของอุปกรณ์

ขั้นตอนที่3 ทดสอบการใช้งานของอุปกรณ์แต่ละชนิดและทดสอบระบบโดยรวม

ขั้นตอนที่4 เตรียมสารที่จะนำมาใช้ในการทดลอง

ขั้นตอนที่5 เริ่มทำการทดลอง

ขั้นตอนที่6 ทดลองวัดค่าสภาพแพร่ทางความร้อนของแคดเมียมซัลไฟด์ ที่ความหนา
ค่าต่างๆ

ขั้นตอนที่7 วิเคราะห์ผลการทดลอง และสรุปผลการทดลอง

1.4.2 ระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการ

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการ

ขั้นตอน	ก.ค-ก.ย 2557	ต.ค-พ.ย 2557	ธ.ค 2557	ม.ค-มี.ค 2557
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เข้าใจการทำงานของระบบและการทำงานของอุปกรณ์แต่ละชนิด

1.5.2 วัดค่าสภาพแพร่ทางความร้อนของแคดเมียมซัลไฟด์ได้

1.5.3 เข้าใจถึงลักษณะทางกายภาพของสสารมากขึ้นและปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้น

1.5.4 สามารถแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลองได้

1.5.5 นำไปประยุกต์ใช้กับสารชนิดอื่นได้

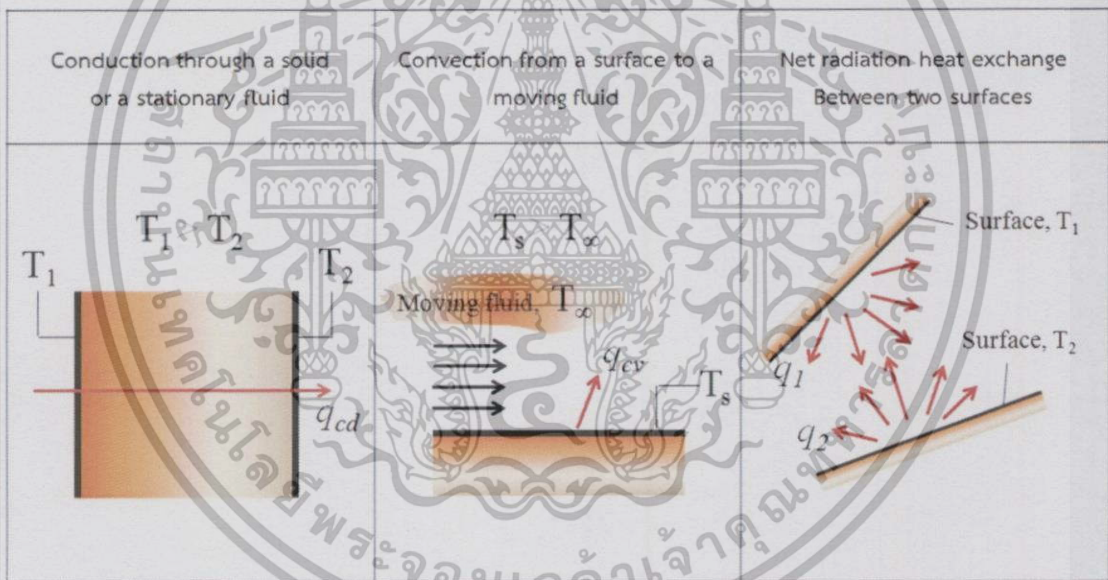
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎี

2.1 คลื่นความร้อน (Thermal wave)

2.1.1 รูปแบบพื้นฐานของการถ่ายเทความร้อน (Basic heat transfer expressions)

การถ่ายเทความร้อน คือ การส่งผ่านพลังงานความร้อนซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ (Temperature gradient) ดังนั้น เมื่อใดก็ตามที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิเกิดขึ้นในตัวกลางหรือระหว่างตัวกลางการถ่ายเทความร้อนมักจะเกิดขึ้นได้ ดังนั้นพื้นฐานของการถ่ายเทความร้อน คือ “ความแตกต่างของอุณหภูมิ” (Temperature different) ถ้าตัวกลางสองตัวมีอุณหภูมิเท่ากันจะไม่เกิดการถ่ายเทความร้อน ดังนั้นความแตกต่างของอุณหภูมิจึงเป็นแรงขับเคลื่อน (Driving force) เพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนขึ้นเอง อัตราการถ่ายเทความร้อนขึ้นอยู่กับความลาดชันของอุณหภูมิ (Temperature gradient) ความลาดชันของอุณหภูมิ หมายถึง ความแตกต่างของอุณหภูมิต่อหน่วยความยาว หรืออัตราการลดลงของอุณหภูมินั้นเอง



รูปที่ 2.1 แสดงการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในแบบต่าง ๆ

เมื่อมีเกรเดียนต์อุณหภูมิ (Temperature Gradient) เกิดขึ้นในตัวกลางที่อยู่นิ่ง เช่น ของแข็งหรือของไหล เอมของการนำความร้อน (Conduction) จะเป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นผ่านตัวกลาง ในขณะที่การพาความร้อน (Convection) จะเป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวและของไหลที่เคลื่อนที่เมื่อมีอุณหภูมิแตกต่างกัน ส่วนการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) จะเป็นการที่ทุกพื้นที่ผิวที่มีอุณหภูมิหนึ่งจะปล่อยพลังงานในรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา ดังนั้นในสภาวะที่ปราศจากตัวกลางใด ๆ จะมีการถ่ายเทความร้อนสุทธิที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแผ่รังสีระหว่างพื้นผิวสองพื้นผิวที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันได้ ดังนั้นการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนที่สมบูรณ์แบบจำเป็นจะต้องทราบถึงกลไกการถ่ายเทความร้อนทั้งสามแบบที่กล่าวไปแล้วข้างต้น

การนำความร้อน (Conduction)

การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนเพียงวิธีเดียวที่เกิดขึ้นในวัตถุที่เป็นตัวกลางทึบแสง เมื่อมีความลาดชันของอุณหภูมิการถ่ายเทความร้อนจะเกิดได้ทั้งในของแข็งของเหลว และแก๊ส ในของเหลวและแก๊สจะมีการไหลหมุนเวียนเกิดขึ้น แต่สำหรับในของแข็งทึบแสง จะไม่มีการเคลื่อนไหวภายในวัสดุ แต่จะมีการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำเพียงอย่างเดียว

$$q_{cd} = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

ความสามารถในการนำความร้อนของสาร วัดด้วยปริมาณที่เรียกว่า ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) หรือใช้ตัวอักษรย่อว่า k มีหน่วยเป็น $W/m \cdot K$ ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางกายภาพของตัวกลางที่มีความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน สมการที่ (1) คือ กฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ (Fourier's law of conduction) เครื่องหมายลบที่อยู่ทางขวามือของสมการเป็นผลเนื่องจากกฎข้อที่สองทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งกำหนดว่า ค่าการนำความร้อนไหลจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำ แต่เนื่องจากความลาดชันของอุณหภูมิจะต้องลดลงเมื่อระยะทาง x เพิ่มมากขึ้น จึงมีเครื่องหมายเป็นลบ ดังนั้นหากต้องการให้อัตราการถ่ายเทความร้อนไหลในทิศทางที่เป็นบวกหรือมีค่าเป็นบวก จะต้องเติมเครื่องหมายลบไว้ด้านขวาของสมการ สมการนี้ เป็นสมการที่ใช้สำหรับนิยามความหมายของค่าการนำความร้อน (k) อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางนั้นขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น รูปทรง ความหนา และวัสดุที่ใช้ในการทำตัวกลาง รวมทั้งความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างตัวกลาง

การพาความร้อน (Convection)

การพาความร้อน คือการถ่ายโอนความร้อนผ่านตัวกลางที่เป็นของเหลวหรือแก๊สโดยที่ของเหลวหรือแก๊สส่วนที่ได้รับความร้อนจะเคลื่อนที่พาความร้อนไปด้วย โดยหลักการแล้วกล่าวได้ว่าการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดจากที่สารใดสารหนึ่ง ได้รับความร้อนแล้ว ความหนาแน่นของอนุภาคน้อยลงขยายตัวลอยตัวสูงขึ้น พร้อมทั้งพาความร้อนไปด้วย ขณะเดียวกันส่วนอื่นที่ยังไม่ได้รับความร้อนยังมีความหนาแน่นของอนุภาคมากกว่า จะเคลื่อนมาแทนที่เป็นแบบนี้ไปเรื่อยๆ จนสารนั้นได้รับความร้อนทั่วกัน เรียกว่า "การพาความร้อน" เราสามารถนำประโยชน์ของการพาความร้อนไปใช้ในชีวิตประจำวันได้ เช่น บ้านที่มีช่องลมหรืออาคารที่ติดตั้งลมระบายอากาศก็ใช้หลักการพาความร้อนเมื่ออาคารร้อนลอยตัวขึ้นสูงออกไปตามช่องลมหรือตามพัดลมระบายอากาศ อาคารที่เย็นกว่าก็จะพัดเข้ามาแทนที่ ทำให้อาคารหรือบ้านไม่ร้อน

ในสภาวะคงตัว สำหรับการพาความร้อน สามารถหาได้จากสมการ

$$q_{cv} = h(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

q_{cv} คือค่าฟลักซ์ความร้อนของการพาความร้อน (Wm^{-2}) ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิพื้นผิวและอุณหภูมิของของเหลว T_s และ T_∞ ตามลำดับ สมการนี้เป็นที่รู้จักกันดีในกฎการหล่อเย็นของนิวตัน (Newton's law of cooling) ค่าคงที่ h คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($Wm^{-2} K^{-1}$)

การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

การแผ่รังสี (Radiation) เป็นการถ่ายเทความร้อนออกรอบตัวทุกทิศทาง โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการส่งถ่ายพลังงาน ดังเช่น การนำความร้อน และการพาความร้อน การแผ่รังสีสามารถ

ถ่ายเทความร้อนผ่านอากาศได้ วัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิสูงกว่า -270 องศาเซลเซียส หรือ 0 เคลวิน ย่อมมีการแผ่รังสี วัตถุที่มีอุณหภูมิสูงแผ่รังสีคลื่นสั้น วัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำแผ่รังสีคลื่นยาว ทั้งนี้การแผ่รังสี คือการถ่ายโอนความร้อนโดยไม่ต้องผ่านตัวกลางใดๆ เช่น ความร้อนที่เกิดจากดวงอาทิตย์ถือเป็นความร้อนที่เกิดจากการถ่ายโอนความร้อนโดยการแผ่รังสี โดยที่วัตถุแต่ละชนิดสามารถดูดกลืนความร้อนจากการแผ่รังสีได้ไม่เท่ากัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ

1. สีของวัตถุ วัตถุสีดำหรือสีเข้มดูดกลืนความร้อนได้ดีกว่าวัตถุสีขาวหรือสีอ่อน
2. ผิววัตถุ วัตถุผิวขรุขระดูดกลืนความร้อนได้ดีกว่าวัตถุผิวเรียบและขัดมัน

เราสามารถนำความรู้เรื่องนี้ไปใช้ประโยชน์ในการเลือกใช้สีและลักษณะของพื้นผิวของวัสดุให้เหมาะสม เช่น คนที่อาศัยในประเทศเขตร้อนควรใช้เครื่องนุ่งห่มสีเข้ม เพราะดูดกลืนความร้อน และให้ความอบอุ่นมากกว่าสีอ่อนๆ แต่คนในประเทศเขตร้อนควรใช้เครื่องนุ่งห่มสีอ่อนๆ เพราะให้ความรู้สึกเย็นสบายกว่าใช้สีเข้ม

สำหรับการแผ่รังสีความร้อน สามารถหาได้จากสมการ

$$q_{rd} = \sigma_{SB} T_S^4 \quad (3)$$

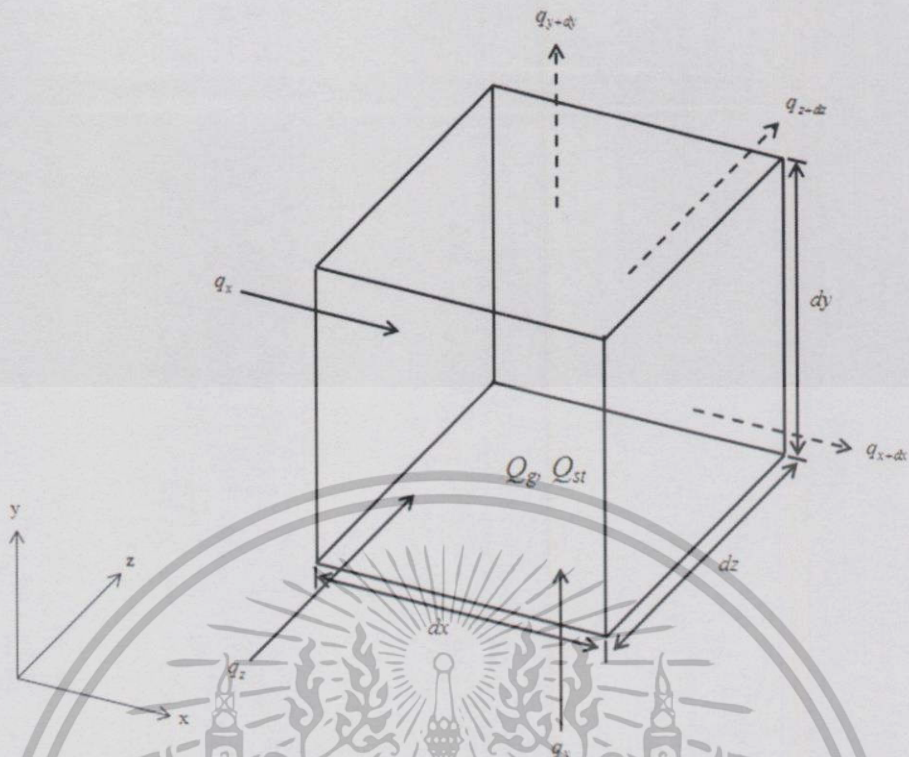
T_S คือ อุณหภูมิของพื้นผิว (เคลวิน) และ σ_{SB} คือค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$) แต่สมการนี้ใช้สำหรับในอุดมคติเท่านั้น ในความเป็นจริงจะมี ϵ (Emissivity) ซึ่งสัมพันธ์กับการแผ่รังสีของพื้นผิว สมการจึงได้กลายเป็น

$$q_{rd} = \epsilon \sigma_{SB} T_S^4 \quad (4)$$

2.1.2 สมการอนุพันธ์ของการนำความร้อน (Differential equation of heat conduction)

ในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์โฟโตเทอร์มอล จำเป็นจะต้องระบุถึงผลลัพธ์ของสนามอุณหภูมิในตัวกลางจากเงื่อนไขต่างๆ เช่น ประเภทของความจุความร้อน ซึ่งบางทีจะนำมาพิจารณาเป็นเงื่อนไขขอบเขต อุณหภูมิที่แพร่กระจายในตัวกลางอย่างชั่วขณะ สามารถระบุได้โดยใช้การประยุกต์กฎการอนุรักษ์พลังงานในอนุพันธ์ย่อยของปริมาตรขนาดเล็ก ส่วนการระบุกระบวนการส่งผ่านความร้อนสามารถทำได้โดยการประมาณจากสมการอัตราการส่งผ่านความร้อน ซึ่งสิ่งนี้จะนำไปสู่การกำหนดผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ โดยการให้การแพร่กระจายของอุณหภูมิเป็นเงื่อนไขขอบเขต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงปริมาตรย่อยสำหรับการวิเคราะห์การนำความร้อนในระบบพิกัดฉาก

จากรูปที่ 2.2 เป็นการประยุกต์ใช้กฎการอนุรักษ์พลังงานกับพลาซซ์ (อัตราการส่งผ่านที่สัมพันธ์กับเวลา) ของพลังงานความร้อนที่เข้าและออกในปริมาตรขนาดเล็ก (dV) ที่มีขนาด dx , dy และ dz ซึ่งนำไปสู่การอธิบาย ดังนี้

$$Q_{in} + Q_g - Q_{out} = Q_{st} \quad (5)$$

ซึ่งสามารถถูกระบุได้โดยกฎของ Fourier ซึ่ง Q_{in} คืออัตราการความร้อนที่ไหลเข้าไปในปริมาตร dV

$$Q_{in} = q_x + q_y + q_z \quad (6)$$

Q_g อัตราการกำเนิดความร้อนในปริมาตร dV

$$Q_g = \dot{g} \, dx \, dy \, dz \quad (7)$$

Q_{out} อัตราความร้อนที่ไหลออกจากปริมาตร dV

$$Q_{out} = q_{x+dx} + q_{y+dy} + q_{z+dz} \quad (8)$$

Q_{st} อัตราความร้อนที่สะสมในปริมาตร dV

$$Q_{st} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \, dx \, dy \, dz \quad (9)$$

ρ และ c คือ ค่าความหนาแน่น และความจุความร้อนจำเพาะของตัวกลางตามลำดับ \dot{g} คืออัตราการกำเนิดพลังงานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรในตัวกลาง ทำการแทนที่สมการจากที่กล่าวมา

$$q_x + q_y + q_z + \dot{g} \, dx \, dy \, dz - q_{x+dx} - q_{y+dy} - q_{z+dz} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \, dx \, dy \, dz \quad (10)$$

ค่าพลักซ์ความร้อนภายในกล่อง q_x , q_y และ q_z สามารถถูกอนุมานโดยใช้กฎของ Fourier

$$q_x = -k dy dz \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_x \quad (11)$$

$$q_y = -k dx dz \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_y \quad (12)$$

$$q_z = -k dx dy \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_z \quad (13)$$

ค่าพลักซ์ความร้อนที่ออกจากกล่องจะถูกอนุมานโดยใช้ Taylor expansion

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad (14)$$

$$q_{y+dy} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \quad (15)$$

$$q_{z+dz} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \quad (16)$$

แทนที่สมการเหล่านี้เข้าไปในสมการการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งเราจะได้

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} dx - \frac{\partial q_y}{\partial y} dy - \frac{\partial q_z}{\partial z} dz + \dot{q} dx dy dz = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (17)$$

ซึ่งกลายมาเป็น

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k dy dz \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx + \frac{\partial}{\partial y} \left(k dx dz \frac{\partial T}{\partial y} \right) dy + \frac{\partial}{\partial z} \left(k dx dy \frac{\partial T}{\partial z} \right) dz + \dot{q} dx dy dz = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (18)$$

นี่คือรูปแบบทั่วไปของสมการการกระจายของความร้อน (Heat diffusion equation) ในระบบคาร์ทีเซียน ซึ่งถือเป็นเรื่องพื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์การนำความร้อน จากการแก้สมการนี้ เราจะสามารถรู้ถึงอุณหภูมิการกระจายตัวที่เป็นฟังก์ชันกับเวลา $T(x,y,z)$ สมการการกระจายของความร้อน สามารถอธิบายได้ว่า “อัตราการส่งผ่านพลังงานโดยการนำความร้อนเข้าไปในปริมาตรรวมกับอัตราการเกิดพลังงานความร้อนในปริมาตรนั้นจะเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนที่อยู่ในปริมาตรนั้น”

สมการการกระจายของความร้อน สามารถทำการแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มย่อยๆ:

1) ถ้าเราสมมติว่า ค่าการนำความร้อนของวัสดุเป็นแบบสมมาตร (Isotropic),

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (19)$$

ซึ่ง $\alpha = k / \rho c$ คือสภาพแพร่ทางความร้อน (Thermal diffusivity, $m^2 s^{-1}$) ซึ่งมีความสำคัญต่อคุณสมบัติเชิงกายภาพทางความร้อนที่เป็นสัดส่วนของค่าการนำความร้อนกับค่าความจุความร้อน (ρc) ค่าสภาพแพร่ทางความร้อนแสดงให้เห็นถึงอัตราความร้อนที่แพร่เข้าไปในวัสดุ ซึ่งอัตรานี้ไม่เพียงแต่ไม่ขึ้นกับค่าการนำความร้อน แต่ก็ยังขึ้นกับพลังงานที่สะสมไว้

2) กรณีไม่มีแหล่งกำเนิดความร้อนภายใน

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$ มอนูคาให้นำไปใช้ประโยชน์ (20) การดำเนินการอธิบายนี้สามารถอ้างถึงสมการ Fourier หรือสมการการกระจาย

3) ที่สภาวะคงที่และมีแหล่งกำเนิดความร้อนภายใน

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{g(x, y, z)}{k} = 0 \quad (21)$$

ซึ่งใกล้เคียงกับสมการ Poisson

4) สภาวะคงที่ ที่ไม่มีแหล่งกำเนิดความร้อนภายใน

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (22)$$

ใกล้เคียงกับสมการ Laplace

2.1.3 การเกิดคลื่นความร้อนและการแผ่ขยาย (Thermal wave generation and propagation)

พิจารณาตัวกลางแบบ Isotropic homogeneous ที่เป็น Semi-infinite ถ้าพื้นผิวที่ถูกทำให้ร้อน อยู่ในระนาบ y-z ที่ x=0 และอยู่ภายใต้การทำความร้อนแบบเป็นคาบในรูป

$$\left(\frac{Q_0}{2}\right) [1 + \cos(\omega t)] \quad (23)$$

การกระจายตัวของอุณหภูมิในตัวกลางสามารถหาได้จากการแก้สมการการแพร่ความร้อนใน 1 มิติ (กรณีไม่มีแหล่งกำเนิดความร้อนภายใน) ดังสมการ

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad x < 0, t > 0 \quad (24)$$

โดยใช้เงื่อนไขขอบเขตที่พลังงานความร้อนบริเวณผิวค่อยๆ ลดลงอย่างเป็นคาบ

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{Q_0}{2} [1 + \cos(\omega t)] = \text{Re} \left\{ \frac{Q_0}{2} [1 + \exp(j\omega t)] \right\} \quad x = 0, t > 0 \quad (25)$$

จากเงื่อนไขข้างต้นจะแบ่งการทำความร้อนออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก $Q_0/2$ จะเป็นส่วนที่เพิ่มอุณหภูมิแบบคงที่และส่วนที่สอง $Q_0/2 \exp(j\omega t)$ จะเป็นส่วนของการมอดูเลตความร้อน เราจะสนใจเทอมมอดูเลตเป็นหลักเพื่อที่จะแก้สมการการกระจายตัวของอุณหภูมิ โดยเราจะกำหนดให้ผลเฉลยของส่วนที่เป็นคาบอยู่ในรูป

$$T(x, t) = \text{Re}(T(x) \exp(j\omega t)) \quad (26)$$

เมื่อนำไปแทนในสมการการกระจายตัวของอุณหภูมิ จะได้

$$e^{j\omega t} \left(\frac{d^2 T(x)}{dx^2} - \frac{j\omega}{\alpha} T(x) \right) = 0 \quad (27)$$

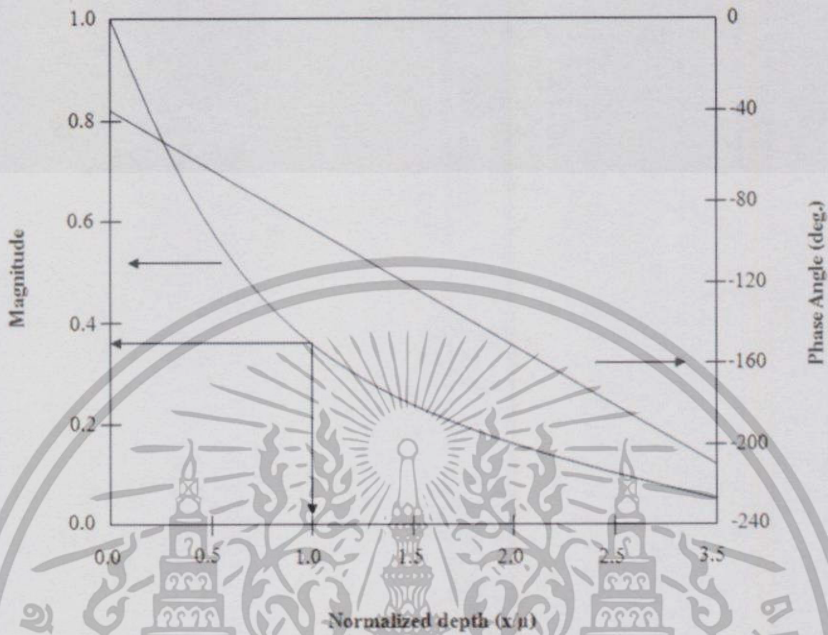
เมื่อทำการแก้สมการ โดยกระบวนการทางคณิตศาสตร์แล้วจะได้ผลเฉลยเป็น

$$T(x, t) = \frac{Q_0}{2k\sigma} \exp(-\alpha x + j\omega t)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (28) การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลเฉลยนี้แอมพลิจูดและเฟสของคลื่นความร้อนจะเป็นดังรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าแอมพลิจูดจะลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลกับระยะความลึก (Skin depth) ส่วนเฟสของคลื่นความร้อนจะลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นกับระยะความลึก



รูปที่ 2.3 แสดงแอมพลิจูดและเฟสของคลื่นความร้อนที่พล็อตกับฟังก์ชันความลึกของพื้นผิว

ลักษณะทั่วไปของผลเฉลยในสมการที่ (28) สามารถอธิบายได้โดย

1) การแพร่ของคลื่นความร้อนที่เหมือนคลื่นทั่วไป

คลื่นความร้อนจะมีการแกว่ง ที่ขึ้นกับรูปแบบของ $\exp(j\omega t)$ เขียนได้ ดังนี้

$$\text{Re}(\sigma) = \frac{1}{\mu} = \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \quad (29)$$

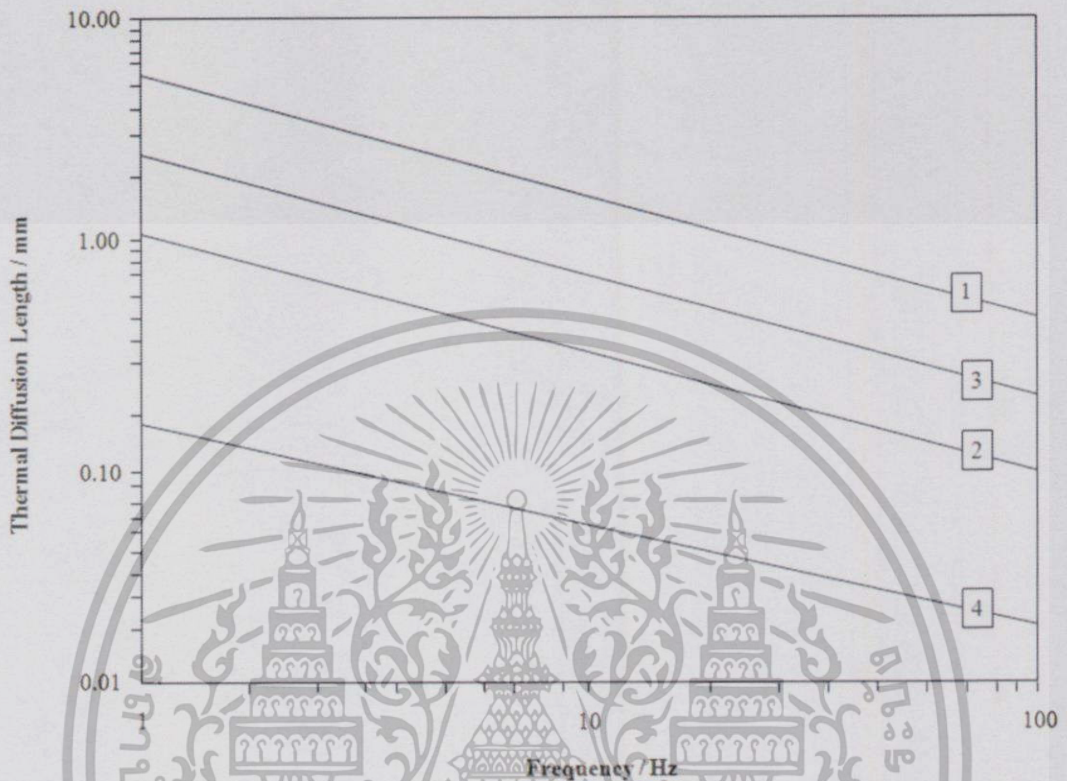
ตัวแปร μ เรียกว่าระยะการแพร่ความร้อน (Thermal diffusion length) ซึ่งเป็นปริมาณที่ต่อเนื่องของค่าความลึกของสนามไฟฟ้า ถูกระบุโดย $\sqrt{\left(\frac{2\alpha}{\omega}\right)}$ และสมการที่ (28) จะกลายเป็น

$$T(x,t) = \frac{Q_0}{2\sqrt{\rho c k \omega}} \exp\left(-\frac{x}{\mu}\right) \exp j\left(\omega t - \frac{x}{\mu} - \frac{\pi}{4}\right) \quad (30)$$

2) การแพร่ของคลื่นความร้อนที่ไม่เหมือนคลื่นทั่วไป

คลื่นความร้อนจะมีการแกว่งอย่างมากพร้อมทั้งลดลงอย่างคงที่จนเท่ากับระยะการแพร่ความร้อน ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติทางความร้อนและค่าระยะการแพร่ความร้อน (Thermal diffusion length) ของวัสดุที่แตกต่างกัน จากความหมายของระยะการแพร่ความร้อนจะเห็นได้ว่าคลื่นความร้อนจะขยายลงไปในช่วงเชิงได้ลึก ถ้าวัสดุนั้นมีค่าสภาพแพร่ทางความร้อนที่สูง (Thermal diffusivity) หรือคลื่นความร้อนนั้นมีค่าความถี่ต่ำ ระยะการแพร่ความร้อนของอลูมิเนียม, สแตนเลส, อากาศ และเบกเกิลไลท์ ที่ช่วงค่าความถี่ 1-100 เฮิร์ตซ์ จะแสดงในรูปที่ 2.4 โดยสภาพแพร่ทางความ

ร้อนของวัสดุดังกล่าวจะอยู่ในช่วง 10^{-5} ถึง $10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ ระยะการแพร่ความร้อนเป็นตัวแปรที่สำคัญ เพราะมันแสดงให้เห็นถึงค่าความลึกของคลื่นความร้อน



รูปที่ 2.4 แสดงการพล็อตระหว่างระยะการแพร่กับความถี่ สำหรับ (1) อะลูมิเนียม, (2) สแตนเลส, (3) อากาศ และ (4) เบกเกิลไดต์

3) คลื่นความร้อนที่มีการแพร่กระจายอย่างรวดเร็ว

ค่าความเร็วเฟสของคลื่นความร้อนสามารถหาได้จาก

$$v = \omega\mu = \sqrt{2\alpha\omega} \quad (31)$$

จากสมการข้างต้นแสดงให้เห็นว่าคลื่นความร้อนที่ความถี่สูงมีการแพร่เร็วกว่าคลื่นความร้อนที่ความถี่ต่ำ

4) การเปลี่ยนเฟสของคลื่นความร้อน

คลื่นความร้อนจะมีการเปลี่ยนเฟสระหว่างบริเวณพื้นผิวที่ $x = 0$ และที่จุดใดๆ x เป็นดังสมการ

$$\varphi = -\frac{x}{\mu} - \frac{\pi}{4} \quad (32)$$

จากสมการ ที่พื้นผิวจะมีเฟสล่าหลังอยู่ -45° ระหว่างแหล่งกำเนิดความร้อนกับอุณหภูมิที่พื้นผิว

5) อิมพีแดนซ์ของคลื่นความร้อน

อิมพีแดนซ์ของคลื่นความร้อนสามารถระบุได้โดยอัตราส่วนระหว่างค่าอุณหภูมิที่บริเวณนั้น ต่อความหนาแน่นฟลักซ์ความร้อนดังสมการ

$$Z = \frac{1}{k\sigma} = \frac{1}{\sqrt{j\omega\rho ck}} \quad (33)$$

อิมพีแดนซ์ของคลื่นความร้อนบอกถึงขนาดของคลื่นความร้อนที่พื้นผิวของตัวอย่าง ปริมาณ $\sqrt{\rho c k}$ ในสมการอิมพีแดนซ์ เป็นที่รู้จักกันในชื่อ Thermal effusivity หรือความเฉื่อย ถ้าค่าความเฉื่อยทางความร้อนมีค่าต่ำๆจะทำให้แอมพลิจูดของอุณหภูมิที่พื้นผิวมีค่าสูง ค่าความเฉื่อยทางความร้อนนั้นได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 โดยปกติวัสดุที่มีค่าสภาพแพร่ทางความร้อนสูง จะมีค่าความเฉื่อยทางความร้อนสูงด้วยแต่ยกเว้นในบางกรณี ตัวอย่างที่สำคัญที่สุดคือ อากาศ ที่มีค่าสภาพแพร่ทางความร้อนสูง เนื่องจากมีค่าความนำต่ำพร้อมกับมีความหนาแน่นต่ำจึงทำให้ค่าความเฉื่อยทางความร้อนต่ำ อย่างไรก็ตามค่าความเฉื่อยทางความร้อนจะสามารถระบุได้จากความหนาแน่นและความนำ

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางความร้อนในวัสดุบางชนิด

Material	Density (kgm ⁻³)	Specific heat (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	Thermal conductivity (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	Thermal diffusivity (10 ⁶ m ² s ⁻¹)	Thermal effusivity (Ws ^{1/2} m ² K ⁻¹)	Thermal diffusion length		
						mm 1 Hz	mm 25 Hz	mm 100 Hz
Metals								
Pure aluminium	2700	945	238	93.28	24642.59	5.4490	1.0898	0.5449
Al alloy 2024-T6	2770	875	177	73.03	20712.41	4.8213	0.9643	0.4821
Chromium	7160	449	93.7	29.15	17355.99	3.0459	0.6092	0.3046
Pure copper	8933	385	401	116.60	37136.52	6.0921	1.2184	0.6092
Bronze 90% Cu, 10% Al	8800	420	52	14.07	13863.33	2.1126	0.4232	0.2116
Gold	19300	129	317	127.32	28093.32	6.3662	1.2732	0.6366
Pure iron	7870	447	80.2	22.80	16796.87	2.6938	0.5388	0.2694
Steel AISI 1010	7832	434	63.9	18.80	14737.77	2.4462	0.4892	0.2446
Steel AISI 316	8238	468	13.4	3.48	7187.64	1.0518	0.2104	0.1052
Lead	11340	129	35.3	24.13	7186.03	2.7715	0.5543	0.2771
Magnesium	1740	1024	156	87.55	16671.97	5.2791	1.0558	0.5279
Molybdenum	10240	251	138	53.70	18833.30	4.1344	0.8269	0.4134
Pure nickel	8900	444	90.7	22.95	18931.72	2.7030	0.5406	0.2703
Inconel X-750	8510	439	11.7	3.13	6611.35	0.9984	0.1997	0.0998
Silver	10500	235	429	173.86	32535.48	7.4392	1.4878	0.7439
Titanium	4500	522	21.9	9.32	7172.38	1.7227	0.3445	0.1723
Tungsten	19300	132	174	68.30	21054.27	4.6627	0.9325	0.4663
Zinc	7140	389	116	41.76	17949.52	3.6461	0.7292	0.3646
Zirconium	6570	278	22.7	12.43	6438.99	1.9890	0.3978	0.1989
Non-metals								
Aluminium oxide	3970	765	46	15.15	11819.66	2.1957	0.4391	0.2196
Beryllium oxide	3000	1030	272	88.03	28991.03	5.2933	1.0587	0.5293

Diamond Ila	3500	509	2300	1291.05	64001.33	20.2720	4.0544	2.0272
Silicon carbide	3160	675	490	229.72	32329.09	8.5512	1.7102	0.8551
Silicon nitride	2400	691	16	9.65	5151.16	1.7524	0.3505	0.1752
Germanium	5360	322	59.9	34.71	10167.72	3.3237	0.6647	0.3324
Silicon	2330	712	148	89.21	15669.27	5.3289	1.0658	0.5329
Quartz glass	2210	730	1.4	0.87	1502.87	0.5256	0.1051	0.0526
Bakelite	1270	1590	0.23	0.11	681.50	0.1904	0.0381	0.0190
Rubber (soft)	1100	2010	0.13	0.06	536.12	0.1368	0.0274	0.0137
Wood (oak)	545	2385	0.17	0.13	470.07	0.2040	0.0408	0.0204
Lubricating	845	2020	0.14	0.08	488.84	0.1616	0.0323	0.0162
Air	1.16	1007	0.026	22.26	5.51	2.6618	0.5324	0.2662

2.2 การกำเนิดคลื่นความร้อนทางแสง - ปรากฏการณ์โฟโตเทอร์มอล (Optical generation of thermal waves - photothermal effect)

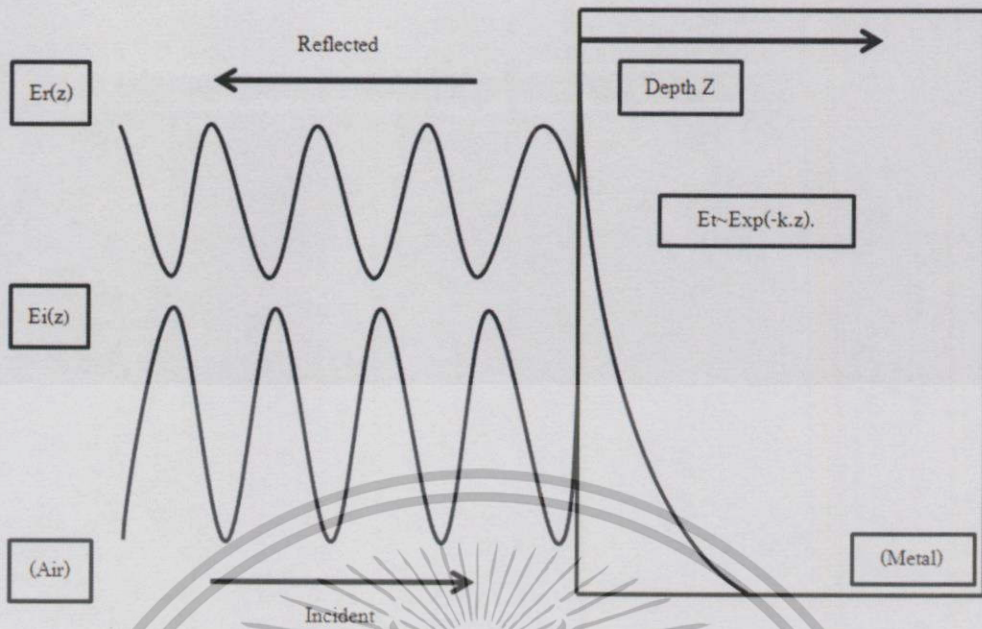
วิธีทั่วไปที่สามารถทำให้เกิดคลื่นความร้อนคือ การให้ความร้อนแก่สารตัวอย่างโดยผ่านลำแสงที่ถูกมอดูเลต ซึ่งวิธีนี้ขึ้นกับส่วนของพลังงานแสงที่ถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างและถูกเปลี่ยนเป็นความร้อนอย่างรวดเร็ว ข้อดีอย่างมากของปรากฏการณ์โฟโตเทอร์มอลก็คือ เป็นวิธีที่ไม่มีการสัมผัสกับตัวอย่างและเป็นวิธีที่ระบุขอบเขตของการมอดูเลตความร้อนได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ข้อมูลของสเปกโตรสโกปีประเภทนี้สามารถระบุได้ถึงคุณสมบัติของวัสดุบางชนิดโดยการเลือกใช้ช่วงการดูดกลืนของสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับการประยุกต์ใช้ปรากฏการณ์โฟโตเทอร์มอลทุกประเภทจะขึ้นกับคุณสมบัติทางแสงและความร้อนของวัสดุ

2.2.1 การสะท้อนกลับที่พื้นผิว (Surface reflectivity)

การสะท้อนกลับเป็นตัวแปรทางแสงที่สำคัญเพราะแสงที่สะท้อนออกมาจากพื้นผิวจะสามารถบอกส่วนที่ทะลุผ่านเข้ามาในตัวอย่างและอาจทำให้เกิดความร้อนขึ้น ในส่วนนี้จะพูดคร่าวๆถึงปฏิกิริยาของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับตัวกลาง และลักษณะของการแพร่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อคุณสมบัติของวัสดุต่างๆ

เมื่อรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบบนตัวอย่างโดยทั่วไปแล้วจะสะท้อนให้เห็นเป็นบางส่วนเท่านั้น และอีกส่วนจะถูกดูดกลืนหรือส่งผ่านออกไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น "ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้"



รูปที่ 2.5 แสดงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อนและตกกระทบบนพื้นผิวของโลหะ

จากรูปที่ 2.5 จะสามารถพิจารณาองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การแพร่ขององค์ประกอบของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะแสดงดังสมการนี้

$$E(z) = E(0) \exp\left(\frac{-2\pi n'' z}{\lambda} + j \frac{2\pi n' z}{\lambda} + j\omega t\right)$$

$$E(z) = E(0) \exp\left(j \frac{2\pi N z}{\lambda} + j\omega t\right) \tag{34}$$

ที่ $E(0)$ เป็นแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าที่พื้นผิวซึ่งค่า $z=0$ ผลรวมของค่าสัมประสิทธิ์ n' และ n'' จะบอกถึงค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนของวัสดุโดยที่ $N = n' + jn''$ เมื่อ n'' คือการลดทอนและ n' คือค่าดัชนีหักเห และ λ คือความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การลดลงของความเข้มแสงจะสามารถหาได้จากทฤษฎี Poynting

$$I(z) = N |E(z)|^2 = I(0) \exp(-j4\pi N z / \lambda) \tag{35}$$

$$I(z) = I(0) \exp(-4\pi n'' z / \lambda + j4\pi n' z / \lambda) \tag{36}$$

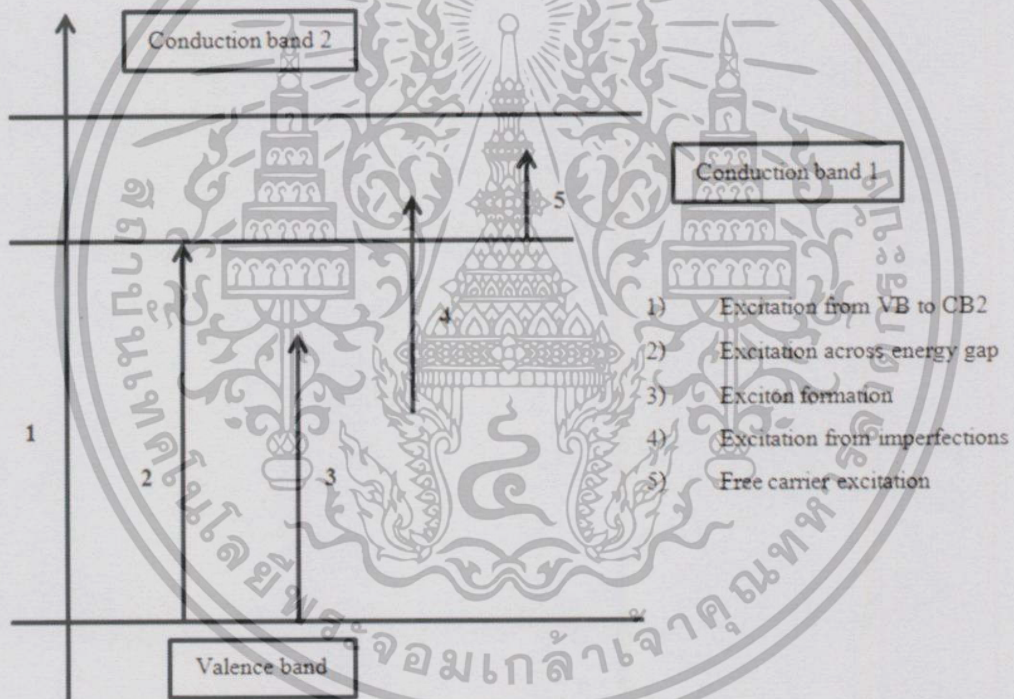
ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบระหว่างการดูดกลืนกับระยะเวลาการแพร่ความร้อน μ ของวัสดุต่างๆ

Material	λ (μm)	n'	n''	$R(\lambda)$ (%)	β (μm) ⁻¹	$1/\beta$ (μm)	μ at 100 Hz (μm)
Fe	1.0	3.20	4.10	62	51.5	0.0194	269
Ni	1.0	2.85	5.10	72	64.1	0.0156	270
W	1.0	3.00	3.50	57	43.9	0.0227	466
Ti	1.0	3.30	3.35	55	42.1	0.0237	172
Ge	1.0	4.44	1.23	40	15.4	0.065	332
Si	1.0	3.5	0.00018	30	0.0022	454	532
Glass	1.0	1.5	≈ 0	4	≈ 0		52
Polystyrene	1.0	1.59	≈ 0	5.3	≈ 0		14

การสะท้อนและการส่งผ่านที่พื้นผิวสามารถเขียนได้ดังนี้

$$R(\lambda) = \left| \frac{1 - N(\lambda)}{1 + N(\lambda)} \right|^2 \quad T(\lambda) = \left| \frac{2N(\lambda)}{1 + N(\lambda)} \right|^2 \quad (37)$$

ความเข้มของแสงที่ตกกระทบตัวกลางจะลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล โดยค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนกำหนดโดย $\beta = 4\pi n''/\lambda$ ซึ่งค่าผกผันของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะบอกถึงความลึกของการดูดกลืนแสงหรือค่าระยะความลึก (Skin depth) สำหรับวัสดุที่ไม่มีการดูดกลืน สัมประสิทธิ์ $n'' = 0$ ซึ่งในโลหะจะมีค่าระยะความลึกเชิงแสง (Optical skin depth) ไม่กี่ 10 นาโนเมตร และในสารกึ่งตัวนำจะอยู่ในระดับไมโครเมตร ส่วนในฉนวนจะลึกถึงมิลลิเมตร ตารางที่ 2.2 จะเปรียบเทียบระยะเวลาการดูดกลืนแสงใน โลหะ สารกึ่งตัวนำ และฉนวนกับค่าระยะการแพร่ความร้อน สำหรับโลหะจะเห็นได้ว่าระยะเวลาการแพร่ความร้อนจะมีค่ามากกว่าระยะเวลาการทะลุผ่านของแสง (Penetration depth) ค่าสัมประสิทธิ์ n' และ n'' จะถูกกำหนดโดยแถบพลังงานของวัสดุ ซึ่งสามารถวัดจากค่าคงที่ของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน



รูปที่ 2.6 ภาพแผนผังการเปลี่ยนระดับพลังงานภายในวัสดุ

$$\epsilon(\omega) = N^2 = \epsilon'(\omega) + j\epsilon''(\omega) \quad (38)$$

$$n' = \left[\frac{(\epsilon'^2 + \epsilon''^2)^{1/2} + \epsilon'}{2} \right]^{1/2}, n'' = \left[\frac{(\epsilon'^2 + \epsilon''^2)^{1/2} - \epsilon'}{2} \right]^{1/2} \quad (39)$$

ที่ความถี่เหนือย่านกลางอินฟราเรดขึ้นไป ฟังก์ชันไดอิเล็กตริกของวัสดุจะถูกระบุโดยสามองค์ประกอบ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกข้อมูลและข้อมูลอ้างอิง เอกสารทุกครั้งที่มีการนำ (40)

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_L(\omega) + \epsilon_B(\omega) + \epsilon_F(\omega)$$

เมื่อ $\varepsilon_L(\omega)$ อธิบายถึงผลกระทบของการดูดกลืนโดยแลตทิซ เมื่อรังสีตกกระทบ $\varepsilon_B(\omega)$ เป็นการดูดกลืนรังสีภายในชั้นพลังงาน และ $\varepsilon_F(\omega)$ คือการเปลี่ยนแปลงชั้นพลังงานภายใน กระบวนการเหล่านี้จะแสดงในแผนผังดังรูปที่ 2.6 ในโลหะการดูดกลืนรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นภายในชั้นแถบนำโดยที่อิเล็กตรอนอิสระจะถูกกระตุ้นให้ไปอยู่ในสถานะที่สูงกว่าชั้นแถบนำ (กระบวนการที่ 5) การดูดกลืนรังสีในกลไกนี้จะทำให้ทราบพาหะอิสระในการดูดกลืนอิเล็กตรอนแก้อิสระใน Drude model ของฟังก์ชันไดอิเล็กทริกเชิงซ้อนคือ

$$\varepsilon_F(\omega) = \varepsilon'(\omega) + j\varepsilon''(\omega) \quad (41)$$

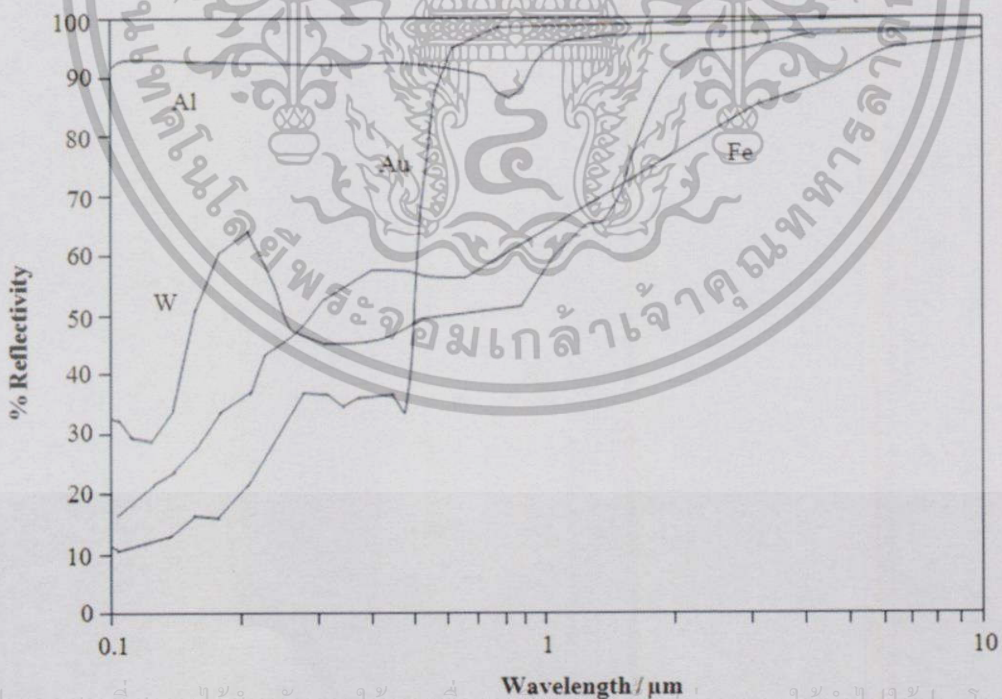
เมื่อ

$$\varepsilon'(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2}$$

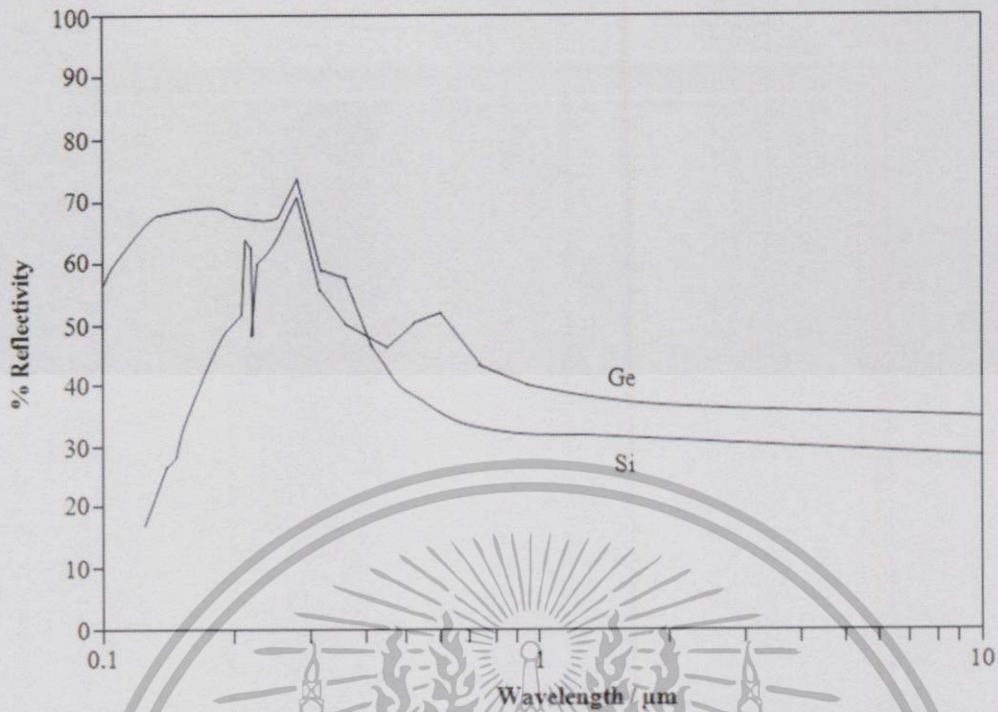
$$\varepsilon''(\omega) = \frac{\omega_p^2 \tau}{\omega(1 + \omega^2 \tau^2)} \quad (42)$$

$$\omega_p = \left(\frac{N_f e^2}{\varepsilon_0 m} \right)^{1/2}$$

และ N_f คือ จำนวนอิเล็กตรอนอิสระ τ คือเวลาการชน m คือมวล e คือประจุ ε_0 คือสภาพยอมในสุญญากาศ และ ω_p คือความถี่พลาสมา (ความถี่ธรรมชาติของประจุ) ในโลหะความถี่นี้มักอยู่ในช่วงสเปกตรัมอัลตราไวโอเล็ต มักใช้ในการอธิบายการโปร่งแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตของโลหะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.7 แสดงกราฟที่พล็อตระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกับความยาวคลื่นของโลหะ (Al - อะลูมิเนียม, Au - ทอง, Fe - เหล็ก และ W - ทังสเตน)



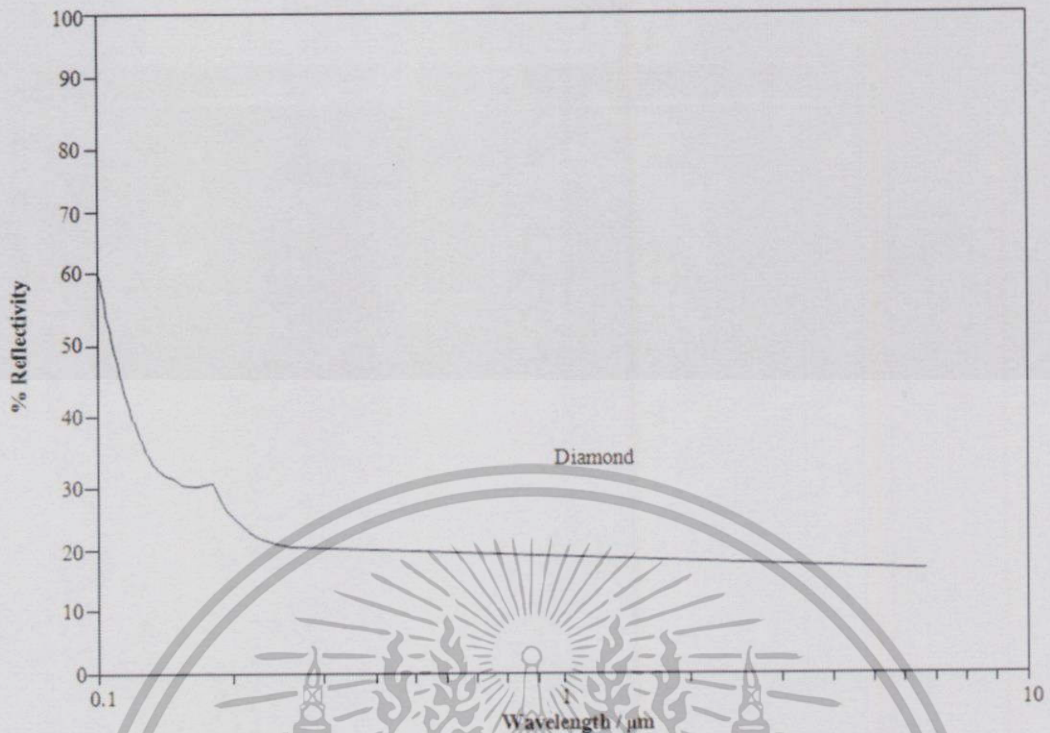
รูปที่ 2.8 แสดงการพล็อตกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกับความยาวคลื่นของซิลิคอนและเจอร์เมเนียมที่เป็นผลึกเดี่ยว

ในสเปกตรัมย่านอัลตราไวโอเล็ตค่าดัชนีหักเหของโลหะจะเป็นค่าจริงและค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนก็เป็นค่าจริงและมีค่าน้อย ในช่วงกลางของความยาวคลื่นย่านอินฟราเรดค่าการดูดกลืนจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุด และเมื่อถึงย่านที่สูงกว่านั้นจะเกิดจากสะท้อนสูงสุด โดยความยาวคลื่นย่านนี้จะเป็นการสะท้อนกลับที่ผิวซึ่งจะใช้ Hagen – Rubens ในการแสดงความสัมพันธ์ของการสะท้อนในตัวนำไฟฟ้า

$$R \approx 1 - \left(\frac{8\omega\epsilon_0}{\sigma_0} \right)^{1/2} \quad (43)$$

เมื่อ σ_0 คือค่าการนำไฟฟ้ากระแสตรง การเปลี่ยนแปลงนี้จะแสดงในรูปที่ 2.7 ถ้ารังสีที่ตกกระทบแล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงในชั้นพลังงานภายในเป็นไปได้ที่จะเกิดการเพิ่มขึ้นของการดูดกลืนแสงและเกิดการสะท้อนกลับที่ผิว ในกรณีของทองจะทำให้โลหะมีลักษณะเป็นสีเหลือง

ในสารกึ่งตัวนำการสะท้อนแสงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมากต่อความยาวคลื่นที่มีค่าใกล้เคียงช่องว่างพลังงาน(กระบวนการที่ 1,2 และ 4) สารกึ่งตัวนำโดยส่วนใหญ่จะทึบแสงในย่านแสงที่ตามองเห็น และโปร่งแสงในย่านอินฟราเรด ซึ่งในย่านแสงที่ตามองเห็นนี้อาจจะเกิดพาหะอิสระขึ้นนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของการดูดกลืนและการสะท้อน ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งในโลหะการเพิ่มขึ้นของพาหะอิสระจะมีผลน้อยมาก เพราะโลหะมีพาหะอิสระมากอยู่แล้ว ซึ่งความเข้มข้นของพาหะอิสระนี้เป็นความแตกต่างที่สำคัญระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำสามารถเพิ่มพาหะอิสระได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิให้กับตัวอย่างหรือการเจือ ในความถี่ที่ต่ำกว่าการดูดกลืน(ต่ำกว่าแถบพลังงาน) คุณสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำจะคล้ายกันกับวัสดุไดอิเล็กทริก ซึ่งวัสดุเหล่านี้จะมีการดูดกลืนน้อยมากและมักจะโปร่งแสงในช่วงสเปกตรัมแสงที่ตามองเห็นและอินฟราเรด ที่ความถี่สูงๆ (โฟตอนพลังงานสูง) จะเกิดการเพิ่มขึ้นของการดูดกลืนและการสะท้อน



รูปที่ 2.9 แสดงกราฟที่พล็อตระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกับความยาวคลื่นของเพชร

ในรูปที่ 2.9 จะแสดงการเปลี่ยนแปลงการสะท้อนของเพชรซึ่งเป็นวัสดุ Homo – polar โดยแลตทิซจะดูดกลืนผ่าน Photon – Phonon ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของการดูดกลืนในช่วงกลางและไกลของอินฟราเรด

การศึกษาโฟโตเทอร์มอล จะต้องอาศัยการตกกระทบของพลังงานแสงและถูกดูดกลืนเพื่อเปลี่ยนไปเป็นความร้อน ผลรวมของการดูดกลืนและการสะท้อนแสงจากพื้นผิวมีความสำคัญมากสำหรับการสร้างความร้อนที่มีประสิทธิภาพ วัสดุที่นำไฟฟ้าจะสะท้อนแสงได้มากดังนั้นจะมีแสงบางส่วนเท่านั้นที่ถูกแปลงเป็นความร้อน ซึ่งจะต้องเลือกแหล่งกำเนิดแสงที่มีความเหมาะสมสำหรับวัสดุนั้นๆ

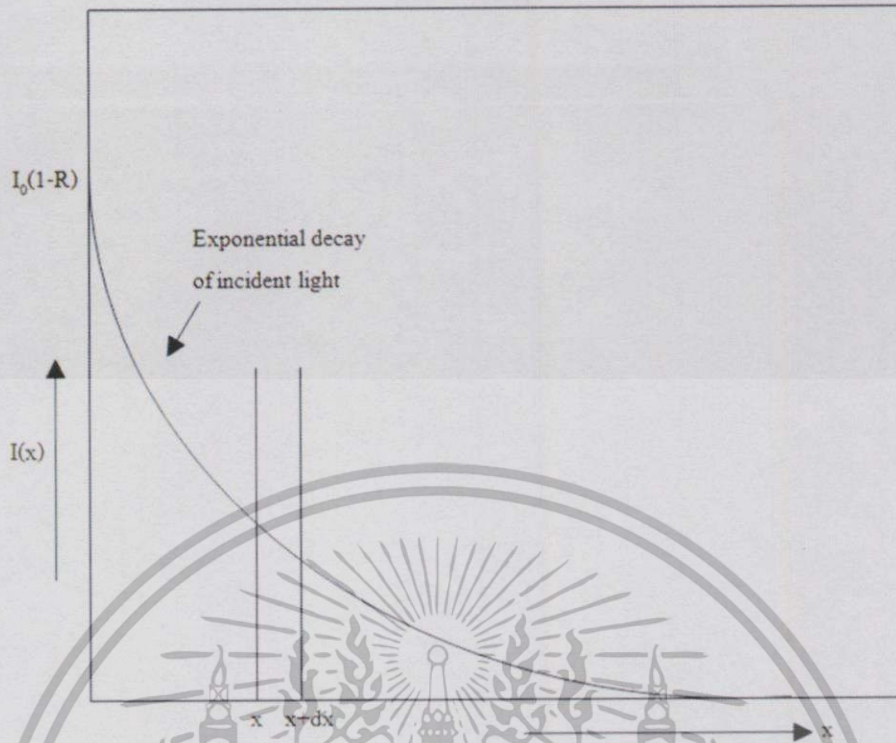
2.2.2 การดูดกลืนในเนื้อสาร (Bulk absorption)

ในวัสดุที่ไม่ใช่โลหะเมื่อเกิดการดูดกลืนแสงแล้วจะเปลี่ยนไปเป็นความร้อน กระบวนการดูดกลืนแสงในวัสดุเหล่านี้จะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงอะตอมหรือโมเลกุลมากกว่าการนำของอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งโดยปกติแล้วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเจาะลึกเข้าไปในเนื้อวัสดุ (การดูดกลืนแสงจะลึก) จึงไม่สามารถพิจารณาปรากฏการณ์โฟโตเทอร์มอลที่เกิดขึ้นในระดับพื้นผิวได้

ความร้อนที่เกิดขึ้นจากความหนา dx ที่ความลึก x ในตัวกลางแบบ Semi – infinite การดูดกลืนแสงจะใช้สมการที่ได้จากรูปที่ 2.10

$$\Delta Q(x) = -\eta \frac{dI(x)}{dx} dx = \eta [1 - R(\lambda)] I_0 \beta \exp(-\beta x) dx \quad (44)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แผนภาพตัวอย่างของตำแหน่งและแอมพลิจูดของความร้อนที่เกิดขึ้นจากแสงในตัวกลาง โปร่งแสงที่เป็น Semi - infinite

พลังงานแสงที่เข้ามาในตัวกลางและการสะท้อนบนพื้นผิว $R(\lambda)$ จะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล โดยที่ β คือค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและ η คือค่าสัมประสิทธิ์ของแสงที่ถูกเปลี่ยนเป็นความร้อนของตัวอย่างซึ่งตัวห้อยจะใช้บอกหน่วยของของแข็ง (เช่นเลข 1 ข้างล่าง) แอมพลิจูดของความร้อนจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลกับความลึก x คลื่นความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะมีแอมพลิจูดขึ้นอยู่กับ Optical damping ของตัวแปล β และเทอมของ Thermal wave damping ที่เกี่ยวข้องกับ ระยะเวลาแพร่ความร้อน μ

เมื่อทำการมอดูเลตอุณหภูมิบนพื้นผิวของสารตัวอย่าง ผลรวมของอนุกรมที่ได้รับในความลึกทั้งหมดคือ

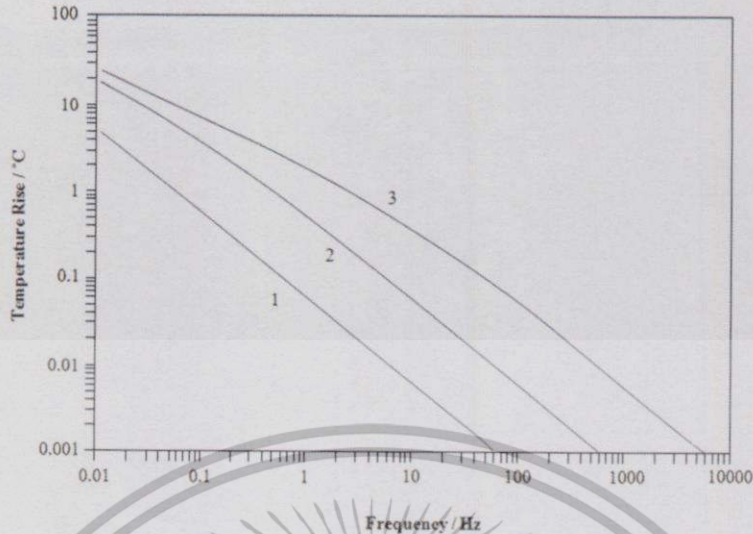
$$T(\omega) = [1 - R(\lambda)] I_0 \beta T_g \int_0^{\infty} \frac{\exp[-(\beta + \sigma)x]}{4k\sigma} dx \exp(j\omega t) \quad (45 ก)$$

$$T(\omega) = \frac{[1 - R(\lambda)] I_0 T_g}{4k\sigma} \left(\frac{\beta}{\beta + \sigma} \right) \exp(j\omega t) \quad (45 ข)$$

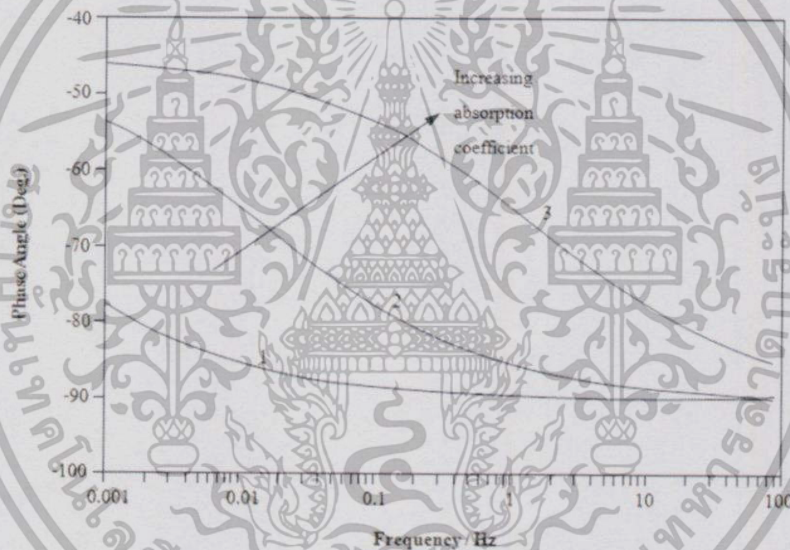
T_g คือค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นความร้อนบนพื้นผิวของตัวอย่าง สำหรับการดูดกลืนที่มีค่าสูงๆ $\beta \gg \sigma$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น 'ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า' ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก)



(ข)



รูปที่ 2.11 แสดงกราฟอุณหภูมิ (ก) และเฟส (ข) ที่แปรผันกับความถี่สำหรับตัวกลางที่เป็น Semi - infinite

ในกรณีตรงกันข้ามที่ $\beta \ll \sigma$ และสารมีความโปร่งแสงสมการจะเป็นดังนี้

$$T(\omega) = \frac{[1 - R(\lambda)]I_0 T_g \beta}{4j\rho c \omega} \exp(j\omega t) \tag{46}$$

การสูญเสียความร้อนของพื้นผิวเชิงซ้อนจะผกผันกับความถี่และความจุความร้อน และแปรผันตรงกับค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสง เฟสของความร้อนที่พื้นผิวจะมีค่าไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ มีค่าเท่ากับ -90° ส่วนค่าเลขคลื่นความร้อน (Thermal wave number, σ) จะขึ้นอยู่กับค่าความถี่ รูปที่ 2.11

จะแสดงแอมพลิจูดและเฟสที่แปรผันตาม $T(\omega)$ สำหรับสมการที่ (45) จะใช้กับค่าความถี่หลายๆค่าของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนที่แสดงการเปลี่ยนแปลงจาก Photothermal Opacity ไป Photothermal Transparency

2.2.3 การดูดกลืนในชั้นผิวบาง (Absorption in a thin surface layer)

เมื่อเกิดการดูดกลืนในฟิล์มบางหรือชั้นเคลือบที่อยู่บนฐานรองแบบไม่ดูดกลืน อุณหภูมิที่พื้นผิวเกิดขึ้นเนื่องจากการดูดกลืนเชิงแสงซึ่งได้มาโดยกระบวนการทางคลื่น (การแทรกสอดของคลื่นความร้อน) แหล่งกำเนิดความร้อนจะถูกกระจายไปทั่วทั้งความหนาของฟิล์มบางแทนที่แหล่งกำเนิดความร้อนจะอยู่ที่พื้นผิว อุณหภูมิที่พื้นผิวจะได้จากการรวมกันของขบวนการคลื่นที่เป็นผลมาจากแหล่งกำเนิดที่กระจายอยู่ในฟิล์ม ถ้าคำนึงถึงการสะท้อนที่รอยต่อฟิล์ม-ฐานรอง และรอยต่อฟิล์ม-พื้นผิว (แก๊ส) กำหนดให้ตัวห้อย 0, 1 และ 2 คือคุณสมบัติทางกายภาพของ แก๊ส, ฟิล์มและฐานรอง ในสมการที่ (45ก) คลื่นความร้อนที่สร้างในพื้นที่ 1 หน่วยโดยวัสดุเคลือบที่มีความหนา dx และลึกลงไปเป็นระยะห่าง x จะมีความเข้มข้น ดังสมการ

$$A = \frac{[1 - R(\lambda)]\beta_1 I_0}{4k_1 \sigma_1} \exp(-\beta_1 x) dx \quad (47)$$

สำหรับคลื่นที่สะท้อนจากขอบฟิล์มกับอวกาศจะได้ผลเป็น

$$\begin{aligned} AT_{01} [e^{-\sigma_1 x} + R_{21} R_{01} e^{-\sigma_1(2L_1+x)} + \dots + (R_{21} R_{01})^n e^{-\sigma_1(2nL_1+x)}] \\ = AT_{01} e^{-\sigma_1 x} \sum_{n=0}^{\infty} (R_{21} R_{01})^n e^{-2n\sigma_1 L_1} \\ = \frac{AT_{01} e^{-\sigma_1 x}}{1 - R_{21} R_{01} e^{-2\sigma_1 L_1}} \end{aligned} \quad (48)$$

L_1 คือความหนาของชั้นเคลือบ

สำหรับคลื่นที่สะท้อนจากขอบฟิล์มกับพื้นหลังจะได้ผลเป็น

$$\begin{aligned} AT_{01} [R_{21} e^{-\sigma_1(2L_1-x)} + R_{21}(R_{21} R_{01}) e^{-\sigma_1(4L_1-x)} + \dots + R_{21}(R_{21} R_{01})^n e^{-\sigma_1(2(n+1)L_1-x)}] \\ = AT_{01} R_{21} e^{-\sigma_1(2L_1-x)} \sum_{n=0}^{\infty} (R_{21} R_{01})^n e^{-2n\sigma_1 L_1} \\ = \frac{AT_{01} R_{21} e^{-\sigma_1(2L_1-x)}}{1 - R_{21} R_{01} e^{-2\sigma_1 L_1}} \end{aligned} \quad (49)$$

R_{21} และ R_{01} คือค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นความร้อนที่รอยต่อฟิล์ม-ฐานรอง และฟิล์ม-อากาศ ตามลำดับ และ T_{01} คือค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นความร้อนที่รอยต่อฟิล์ม-อากาศ

$$\begin{aligned} R_{01} &= \frac{(1-g)}{(1+g)}, \quad T_{01} = \frac{2}{1+g}, \quad g = \sqrt{\frac{(\rho ck)_0}{(\rho ck)_1}} \\ R_{21} &= \frac{(1-b)}{(1+b)}, \quad b = \sqrt{\frac{(\rho ck)_2}{(\rho ck)_1}} \end{aligned} \quad (50)$$

เมื่อรวมสมการที่ (48) กับ (49) จะได้

$$\frac{[1 - R(\lambda)]\beta_1 I_0 T_{01}}{4k_1 \sigma_1 (1 - R_{21} R_{01} e^{-2\sigma_1 L_1})} [e^{-(\beta_1 + \sigma_1)x} + R_{21} e^{-2\sigma_1 L_1} e^{-(\beta_1 - \sigma_1)x}] dx \quad (51)$$

อินทิเกรตความหนาของฟิล์มเพื่อหาผลลัพธ์ของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปบนพื้นผิวเชิงซ้อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีความผิดตามกฎหมายลิขสิทธิ์อีกด้วย

$$\frac{[1 - R(\lambda)]\beta_1 I_0 T_{01}}{4k_1 \sigma_1 (1 - R_{21} R_{01} e^{-2\sigma_1 L_1})} \int_0^{L_1} [e^{-(\beta_1 + \sigma_1)x} + R_{21} e^{-2\sigma_1 L_1} e^{-(\beta_1 - \sigma_1)x}] dx \quad (52)$$

$$T(\omega, 0) = \frac{[1 - R(\lambda)]\beta_1 I_0 T_{01}}{4k_1 \sigma_1 (1 - R_{21} R_{01} e^{-2\sigma_1 L_1})} \times \left(\frac{1 - e^{-(\beta_1 + \sigma_1)L_1}}{\beta_1 + \sigma_1} + R_{21} e^{-2\sigma_1 L_1} \frac{1 - e^{-(\beta_1 - \sigma_1)L_1}}{\beta_1 - \sigma_1} \right) e^{j\omega t} \quad (53)$$

สมการสุดท้ายจะอธิบายการเกิดคลื่นความร้อนในฟิล์มบางใต้พื้นผิวที่เกิดจากการสร้างความร้อนด้วยแสง สำหรับคลื่นความร้อนที่แทรกเข้าไปในฟิล์มทึบแสงจะต้องเพิ่มตัวแปล A_{\pm}

$$A_{\pm} = \frac{1 - e^{-(\beta \pm \sigma)L}}{\beta \pm \sigma} \quad (54)$$

2.3 ทฤษฎี Rosencwaig - Gersho ของการวัดสภาพแพร่ทางความร้อน (RG THEORY OF THERMAL DIFFUSIVITY MEASUREMENTS)

จากทฤษฎีของ Rosencwaig - Gersho ความดัน Q ที่เปลี่ยนแปลงบริเวณพื้นผิวของตัวอย่างแบบ Optically thick จะขึ้นกับค่าสภาพแพร่ทางความร้อนของตัวอย่าง สามารถเขียนได้เป็น

$$Q = qe^{-\phi} = BA \quad (55)$$

ซึ่ง $q = |Q|$, ϕ คือเฟสที่เปลี่ยนไประหว่าง Q กับแหล่งกระตุ้น โดย B และ A กำหนดให้เป็น

$$B = \left(\frac{P_0 \gamma W_a l \sqrt{\alpha'}}{2l' T_0 K \sqrt{\alpha}} \right) \quad (56)$$

และ

$$A = \left(\frac{1 + g(d^+ + d^-)}{(d^+ - d^-)} \right) \left(\frac{g(d^+ + d^-)}{(d^+ - d^-)} \right) \left(\frac{1}{\sigma l} \right)^2 \quad (57)$$

ซึ่ง

$$\begin{aligned} d^+ &= e^{\sigma l} \\ d^- &= e^{-\sigma l} \\ \sigma &= (1+i) \left(\frac{\pi f}{\alpha} \right)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (58)$$

และ g คืออัตราส่วนระหว่างความเฉื่อยทางความร้อน (Thermal effusivity) ของวัสดุพื้นหลัง (e'') กับตัวอย่าง (e) เขียนได้เป็น

$$g = \frac{e''}{e} = \left(\frac{K''}{K} \right) \left(\frac{\alpha}{\alpha''} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (59)$$

ในสมการข้างบน l , K และ α คือ ความหนา, ค่าสภาพนำความร้อนและค่าสภาพแพร่ทางความร้อนตามลำดับ T_0 และ P_0 คือ อุณหภูมิสถิตย์ (Static temperature) และความดันสถิตย์ (Static pressure) ของแก๊ส, γ คืออัตราส่วนของความร้อนจำเพาะ (Ratio of specific heats), W_a คือปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืน, l' และ α' คือความหนาและค่าสภาพแพร่ทางความร้อนของแก๊ส ค่าความเฉื่อยทางความร้อนของแก๊สในเซลล์จะไม่ถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าความเฉื่อยทางความร้อนของตัวอย่างเนื่องจากอัตราส่วนมีค่าน้อยกว่า 1% เสมอ เทอม A จะขึ้นกับความถี่ที่มอดูเลตโดยตรงซึ่งผล σl สามารถเขียนได้เป็น

$$\sigma = (i + j) \left(\frac{\pi f}{f_c} \right) \quad (60)$$

ซึ่ง f_c คือ Characteristic frequency ที่ได้จากสมการ (58) และ (60)

$$f_c = \frac{\alpha}{l^2} \quad (61)$$

ค่าสภาพแพร่ทางความร้อนก็สามารถหาได้โดยการวัดค่าแอมพลิจูดสัญญาณโพโตอะคูสติกที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ของตัวตัดแสง หนึ่งในปัจจัยที่กำหนดค่าแอมพลิจูดสัญญาณโพโตอะคูสติกนั้นก็คือนค่าความยาวการแพร่กระจายความร้อน (μ) ได้มาจาก

$$\mu = \left(\frac{\alpha}{\pi f} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (62)$$

ซึ่ง f คือ ความถี่ของตัวตัดแสง เมื่อตัวอย่างเป็น Thermally thin ($\mu > 1$) ค่าแอมพลิจูดสัญญาณโพโตอะคูสติกจะถูกเปลี่ยนแปลงโดยสมบัติทางความร้อนของวัสดุที่อยู่ด้านหลัง แต่เมื่อตัวอย่างเป็น Thermally thick ($\mu < 1$) ค่าแอมพลิจูดสัญญาณโพโตอะคูสติกจะไม่ขึ้นกับสมบัติทางความร้อนของวัสดุที่อยู่ด้านหลัง ในกรณีที่รู้ค่าความหนาของตัวอย่าง มันจะมีการเปลี่ยนแปลงจากรูปแบบ thermally thin ไปเป็นรูปแบบ thermally thick โดยการเพิ่มความถี่ของตัวตัดแสง ดังนั้นหากเราพลอต $\log(\text{amplitude})$ กับ $\log(\text{frequency})$ จะเห็นว่ามี การเปลี่ยนแปลงความชัน ซึ่งจุดนี้เราเรียกว่า Characteristic frequency (f_c) เมื่อเรารู้ Characteristic frequency และความหนาของตัวอย่าง ค่าสภาพแพร่ทางความร้อนก็สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\alpha = l^2 f_c \quad (63)$$

2.4 เครื่องมือและเทคนิคการตรวจวัด (Instrumentation and detection techniques)

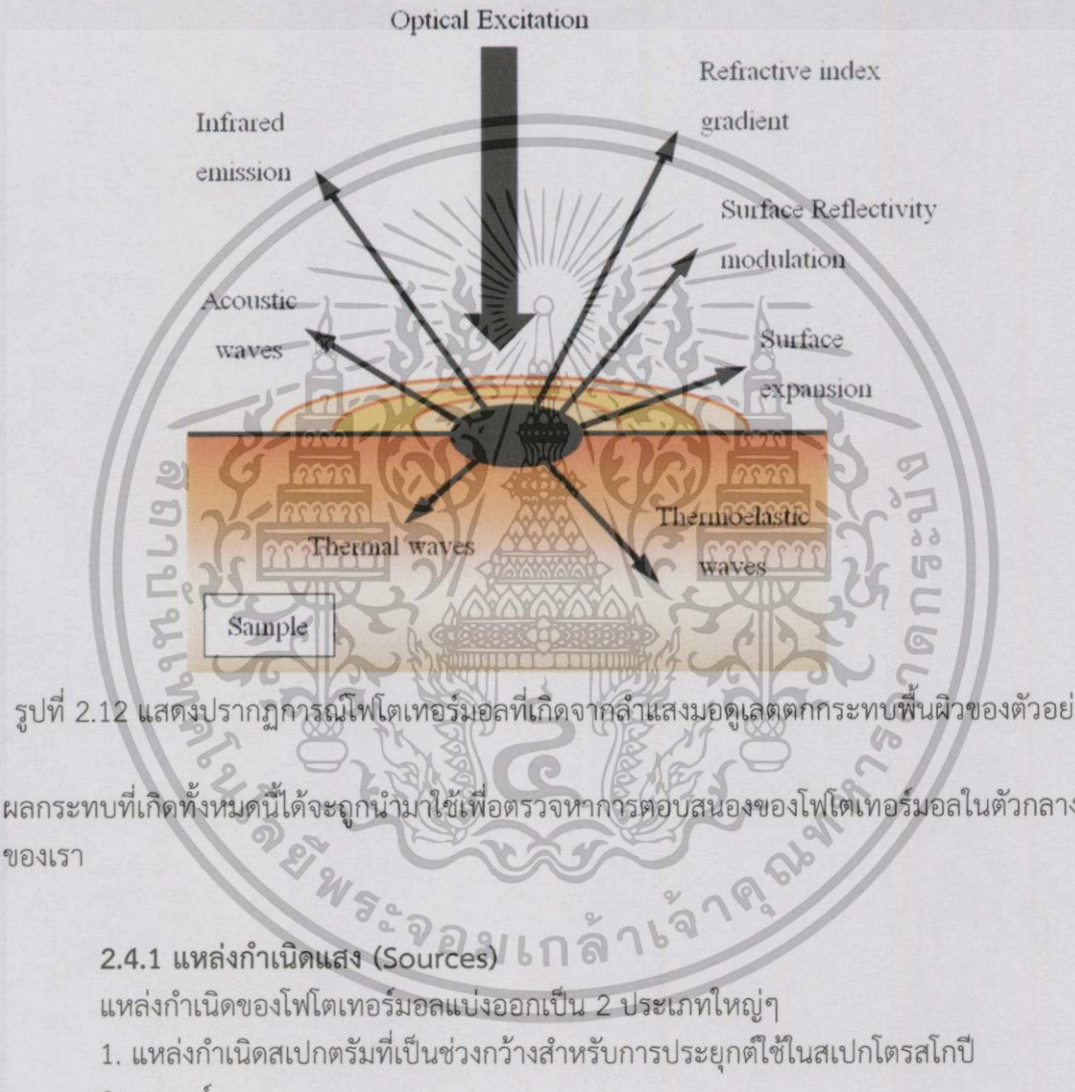
ส่วนประกอบหลักของระบบโพโตเทอร์มอลประกอบไปด้วย

- แหล่งกระตุ้น (Excitation source)
- ตัวมอดูเลตแสง (Modulator)
- ตัวตรวจจับ (Detector)
- การประมวลผลสัญญาณและการแสดงผล (Signal processing and Display system)

ไม่มีส่วนประกอบไหนที่ไม่สำคัญสำหรับเทคนิคนี้แม้ว่าลักษณะการนำไปใช้จะอยู่ในขอบเขตที่กว้าง ในส่วนนี้การเลือกใช้แหล่งกำเนิดและการเลือกตัวตรวจจับอาจจะไม่ชัดเจนมากนัก เพราะการเลือกองค์ประกอบของระบบโพโตเทอร์มอลกว้างมาก โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติของส่วนประกอบแต่ละอย่างแบบคร่าวๆ ในรูปแบบที่คำนึงถึงข้อดีข้อเสียสำหรับการใช้งาน

ระบบโพโตเทอร์มอลทั้งหมดจะใช้แหล่งกำเนิดของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า โดยปกติแหล่งกำเนิดแสงจะสร้างความร้อนที่ถูกมอดูเลตในสารตัวอย่างที่เป็นตัวกลาง ระบบนี้จะขึ้นกับการดูดกลืนโดยตัวกลางของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าและภายหลังต่อมามันจะถูกแปลงเป็นพลังงานความร้อน ผลจากความร้อนนี้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพรอบๆ ตัวอย่าง รูปที่ 2.12 เป็นแผนภาพแยกส่วนที่แสดงปรากฏการณ์ที่เกิดจากแสงที่ผ่านการมอดูเลตตกกระทบกับพื้นผิวของตัวอย่าง ซึ่งจะเกิดผลที่ตามมา ดังนี้

- 1) มีการปลดปล่อยอินฟราเรดที่ถูกมอดูเลตจากพื้นผิว
- 2) การแผ่ขยายความร้อนมีผลทำให้เกิดการบิดเบือนของพื้นผิว
- 3) มีการกำเนิดและการกระจายของคลื่นเสียง (acoustic wave)
- 4) มีการมอดูเลตของคุณสมบัติทางแสงของพื้นผิว เช่น สัมประสิทธิ์การสะท้อน
- 5) เกิดการมอดูเลตของเกรเดียนต์ดรรชนีหักเหในแก๊สต่างๆหรือตัวกลางที่มีลักษณะโปร่งแสงในการสัมผัสกับพื้นผิวที่ถูกทำให้ร้อน



รูปที่ 2.12 แสดงปรากฏการณ์โฟโตเทอร์มอลที่เกิดจากลำแสงมอดูเลตตกกระทบพื้นผิวของตัวอย่าง

ผลกระทบที่เกิดขึ้นทั้งหมดนี้ จะถูกนำมาใช้เพื่อตรวจหาการตอบสนองของโฟโตเทอร์มอลในตัวกลางของเรา

2.4.1 แหล่งกำเนิดแสง (Sources)

แหล่งกำเนิดของโฟโตเทอร์มอลแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ

1. แหล่งกำเนิดสเปกตรัมที่เป็นช่วงกว้างสำหรับการประยุกต์ใช้ในสเปกโตรสโกปี
2. เลเซอร์

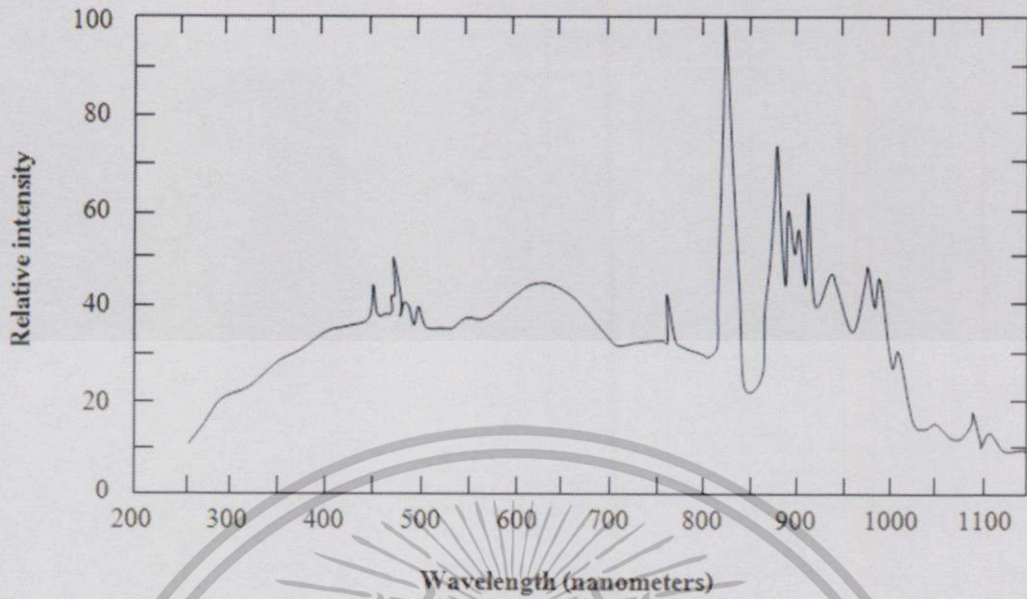
ประเภทของแหล่งกำเนิดแสงและคุณสมบัติของแหล่งกำเนิดแสงจะแสดงในตารางที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 แหล่งกำเนิดแสงที่ถูกใช้ในการศึกษาโฟโตเทอร์มอล

Optical source used in photothermal studies			
Optical source	Spectral range (μm)	Power	Comment
Incoherent sources			
<i>Xenon-lamp</i>	0.2-2.0	$0.2 \text{ W mm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$	High pressure arc lamp
<i>Globar</i>	2-30		Electric heated filament
<i>Nernst</i>	2-30		Electric heated
Type	Wavelength	Power/Energy	Comment
Coherent sources – lasers			
Helium-Neon (gas)	623.8 nm	0.1-50 mW	cw
Ruby (solid)	694.2 nm	0.03-100 J (per pulse)	pulsed
Carbon dioxide (gas)	$10.6 \mu\text{m}$	3-100 W	cw
Nd: YAG (solid)	$1.064 \mu\text{m}$	0.04-600 W	cw
Nd glass (solid)	$1.06 \mu\text{m}$	0.15-100 J	pulsed
Argon ion (gas)	488, 514 nm	5 mW-20 W	cw
Dye (liquid)	400-900 nm	2-800 mW	cw/pulsed (pumped by argon ion laser)
Argon fluoride (eximer)	193 nm	up to 10 W	pulsed
Hydrogen fluoride (chemical)	$2.6-3.0 \mu\text{m}$	0.01-150 W cw or 2-600 mJ per pulse	cw/pulsed
Gallium arsenide (semiconductor diode)	780-900 nm	1-40 mW cw or average per pulse	cw/pulsed
Semiconductor diode array	780-900 nm	250 mW-10 W	cw

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 แสดงสเปกตรัมการปลดปล่อยของหลอดซินอนความดันสูง

สามแหล่งกำเนิดแรกในตารางถูกใช้อย่างมากสำหรับงานสเปกโทรสโกปี หลอดปล่อยประจุชนิดความดันสูงประเภทซินอนจะทำงานที่ความดัน 50-70 บรรยากาศ และเป็นแหล่งกำเนิดที่มีประสิทธิภาพในการแผ่รังสีความเข้มสูงจาก 230-2000 นาโนเมตร สเปกตรัมการปลดปล่อยส่วนใหญ่จะเป็นแบบต่อเนื่อง โดยเฉพาะในช่วงระหว่าง 800-1000 นาโนเมตร จะมีความเข้มสูงสุด รูปที่ 2.13 จะแสดงสเปกตรัมการปลดปล่อยจากหลอดซินอนชนิดหลอดปล่อยประจุความดันสูง กำลังที่ได้สามารถให้ได้เกินกว่า 200 มิลลิวัตต์ ของแถบสเปกตรัมทั้งหมด

สำหรับการศึกษาในย่านอินฟราเรดจะใช้แหล่งกำเนิด 2 อย่างร่วมกัน คือ Global และ Nernst glower แหล่งกำเนิด Global เป็นการให้ความร้อนด้วยไฟฟ้ากับแท่งซิลิคอนคาไบด์จะทำงานที่อุณหภูมิ 1200 เคลวิน ซึ่งปลดปล่อยสเปกตรัมย่านอินฟราเรดที่มีประโยชน์จนถึง 30 ไมโครเมตร Nernst glower เป็นแหล่งกำเนิดที่มีประสิทธิภาพมากกว่าสำหรับย่านใกล้ถึงกลางอินฟราเรด ประกอบด้วยหลอดทรงกระบอกที่ทำจากออกไซด์ทนความร้อนสูง ซึ่งมีผสมมาจาก Zirconia, Yttria และ Thoria เนื่องจากมันทนความร้อนจึงต้องให้ความร้อนช่วย ก่อนที่จะนำมันมาใช้ได้ โดย Nernst glower จะต้องใช้อุณหภูมิที่ประมาณ 1700 เคลวิน ดังนั้นมันจึงมีความเข้มมากกว่า Global ตั้งแต่ 14 ไมโครเมตร ลงไปช่วงเหนือกว่า 14 ไมโครเมตร Global จะมีความเข้มมากกว่า

เลเซอร์ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางเพราะมันให้ความร้อนที่จำกัดขอบเขตได้ชัดเจน ซึ่งเป็นที่ต้องการสำหรับเทคนิค Thermal wave probing ในการประยุกต์ใช้เลเซอร์สิ่งสำคัญคือการเลือกเลเซอร์ ซึ่งจะระบุโดยกำลังที่จะใช้สร้างความร้อน อย่างไรก็ตามในกรณีส่วนใหญ่ He-Ne เลเซอร์มีประสิทธิภาพไม่มากพอและโดยส่วนมากจะใช้อาร์กอนไอออนเลเซอร์ สำหรับการให้คลื่นมอดูเลตที่ต่อเนื่อง และ Nd-YAG เลเซอร์สำหรับการใช้งานที่เป็นพัลส์ เมื่อเร็ว ๆ นี้เลเซอร์ประเภท Semiconductor diode array กำลังสูงได้กลายมาเป็นสิ่งที่มีประโยชน์ ซึ่งมันได้ถูกพัฒนามาแทนที่

แก๊สเลเซอร์ที่มีขนาดใหญ่และหนัก พวกมันมีขนาดเล็กและใช้ง่ายจึงนำไปสู่การพัฒนาของเครื่องมือที่เคลื่อนย้ายได้และใช้พื้นที่น้อย ซึ่งได้เพิ่มความน่าดึงดูดของเทคนิคโฟโตเทอร์มอลและคลื่นความร้อน

2.4.2 เทคนิคการมอดูเลต (Modulation techniques)

เป็นวิธีการที่ถูกนำมาใช้เพื่อกำหนดความผันแปรชั่วคราวของพลังงานทางแสงที่ใส่ให้กับตัวอย่าง ประเภทของการมอดูเลตสามารถแบ่งได้เป็น

1. แบบคาบ (คลื่นไซน์หรือสี่เหลี่ยม)
2. แบบทรานเซียน (พัลส์ สั้น ,ยาวหรือไม่สิ้นสุด)
3. แบบหลายเท่าความถี่ (การสุมเทียบหรือการมอดูเลตความถี่)
4. การมอดูเลตเชิงตำแหน่ง (กวาดหรือคาบ)

สามตัวเลือกแรกเป็นการกำหนดความผันแปรแบบชั่วคราวบนลำแสงที่เป็นจุดหยุดนิ่งบนตัวอย่าง ตัวเลือกสุดท้ายทำให้เกิดการมอดูเลตที่พื้นผิวของตัวอย่างโดยการเลื่อนจุดของความร้อน

ตัวตัดแสงเชิงกล (Mechanical chopper)

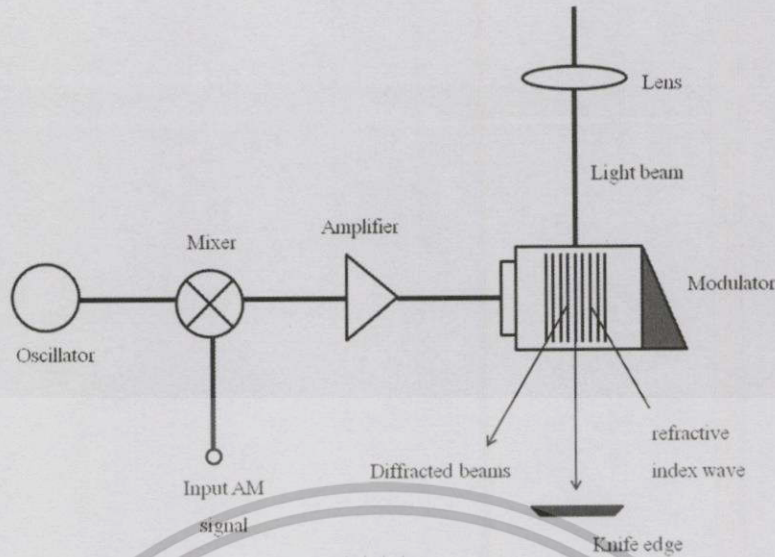
การหมุนของกงล้อใบพัดที่แยกเป็นส่วนๆ เป็นวิธีที่ง่ายและมีประสิทธิภาพในการมอดูเลตแสง มีคุณภาพสูง ,ปรับความเร็วได้ และมีสัญญาณรบกวนในการสั่นของแสงที่โดนตัดต่ำ จึงนำมาใช้ในการค้าอย่างแพร่หลาย พวกมันสร้างการมอดูเลตแบบคลื่นรูปสี่เหลี่ยมที่มีความลึกของการมอดูเลต (Modulation depth) 100% ครอบลมความถี่จาก 1 เฮิร์ตซ์ ถึง 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ข้อจำกัดหลักของตัวตัดแสงเชิงกล คือย่านความถี่และการมอดูเลตแบบคลื่นรูปสี่เหลี่ยม โดยความถี่ค่าสูงถูกจำกัดไว้ที่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ซึ่งระบุได้โดยความเร็วสูงสุดของมอเตอร์ ข้อจำกัดที่ความถี่ต่ำจะมาจาก Phase jitter ที่สูง เนื่องจากที่ความถี่ต่ำการทำงานของมอเตอร์จะแปรในการให้กำเนิดการหมุนที่สอดคล้องกับความถี่ที่ต่ำมาก

การมอดูเลตทางไฟฟ้าโดยตรง (Direct electrical modulation)

แหล่งกำเนิดแสงบางประเภท เช่น CO และ CO₂ แก๊สเลเซอร์และเลเซอร์ไดโอดสารกึ่งตัวนำแสงที่ออกมาสามารถมอดูเลตได้โดยตรง โดยการเปลี่ยนแปลงกระแสที่ขับแหล่งกำเนิดเหล่านั้น ระบบของแก๊สเลเซอร์ไม่สามารถมอดูเลตในทางที่มีความถี่สูง (> 200 เฮิร์ตซ์) แต่เลเซอร์ไดโอดสารกึ่งตัวนำสามารถมอดูเลตได้ที่ความถี่สูงมากเป็น เมกะเฮิร์ตซ์ และมันยังมีข้อดีในการแยกตัวมอดูเลตหรือทำรูปแบบคลื่นแบบอื่นๆได้อีกด้วย

ตัวมอดูเลตแสงแบบอะคูสโตออปติก (Acousto-optic modulator)

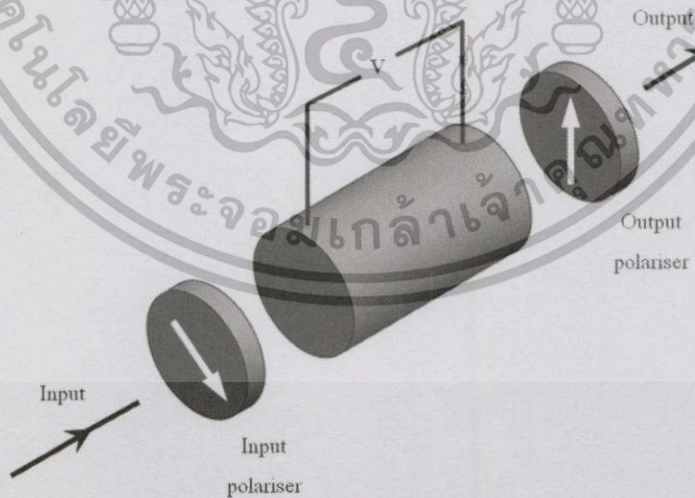
วิธีอะคูสโตออปติกจะเกี่ยวข้องกับการมอดูเลตเชิงพื้นที่ของลำแสงเลเซอร์ โดยเสียงจะทำให้เกิดเป็นรูปแบบ Diffraction grating ขึ้นในผลึก แผ่นผั่งส่วนประกอบแบบแยกส่วนอยู่ในรูปที่ 2.14 ลำแสงเลเซอร์จะถูกทำให้เลี้ยวเบนโดย Diffraction grating ที่ถูกสร้างโดยการแผ่ขยายของคลื่นอัลตราโซนิกทั่วทั้งผลึก ผลึกที่ใช้โดยปกติเป็น Flint glass, Lead molybdate หรือ Tellurium dioxide กำลังที่ได้จากการเลี้ยวเบนอาจสูงถึง 80% ของกำลังที่ให้ และอุปกรณ์อะคูสโตออปติกยังสามารถนำมาใช้สำหรับ Beam scanning ได้อีกด้วย



รูปที่ 2.14 กระบวนการมอดูเลตแบบอะคูสโตออปติก

ตัวมอดูเลตแสงแบบอเล็กโตรออปติก (Electro-optic modulator)

วิธีอเล็กโตรออปติกจะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงระนาบการโพลาไรซ์ของลำแสงโพลาไรซ์ที่กำลังเข้ามาในผลึกแบบ Non-linear (ASP หรือ KDP) โดยใช้สนามไฟฟ้าในการควบคุม แสงเลเซอร์ที่ออกมาจากผลึกจะผ่านโพลาไรซ์เซอร์ที่ขัดกับระนาบเริ่มต้นแสดงในรูปที่ 2.15 ผลึกอเล็กโตรออปติก จะมีประสิทธิภาพสูงในย่านตามมองเห็นและย่านใกล้อินฟราเรด ความลึกของการมอดูเลตสามารถทำได้สูงถึง 100% และความถี่ในการมอดูเลตอยู่ในช่วง 0-20 เมกะเฮิร์ตซ์ ในการมอดูเลตประเภทนี้กำลังของเลเซอร์ที่จะนำมาใช้ต้องระวังอย่าให้เกิดการทำลายขีดเริ่มของผลึกอเล็กโตรออปติก



รูปที่ 2.15 กระบวนการมอดูเลตแบบอเล็กโตรออปติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้ 2.4.3 ระบบการตรวจจับ (Detection schemes) เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ โดยทั่วไปของการตรวจจับคลื่นความร้อนจะใช้ เสียง, แสง และความร้อนเป็นตัวตรวจจับ เทคนิคการตรวจจับด้วยเสียงจะใช้ไมโครโฟนสำหรับตรวจจับความดันที่เปลี่ยนแปลงไปในอากาศหรือ

ใช้เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ดีวเซอร์เป็นตัวตรวจจับ Thermoelastic waves ในตัวกลางที่เป็นของแข็ง วิธีการทางแสงของการตรวจจับคลื่นความร้อนจะประกอบด้วยการใช้ Probe beams และตัวไวแสง (Photodetector) เพื่อตรวจการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางแสงของตัวอย่างที่ถูกทำให้ร้อน ในกรณีตัวอย่างที่เป็นของไหลก็ใช้วิธีเดียวกันในการตรวจจับ วิธีการทางแสงยังสามารถใช้ควบคุมการขยายความร้อนที่ถูกมอดูเลต โดยเทคนิค Probe beam displacement หรือใช้ วิธี Interferometry วิธีการตรวจจับทางความร้อนประกอบไปด้วยการใช้ Thermocouple, Thermister, Infrared detector หรือ Pyroelectric transducer เพื่อตรวจจับคลื่นความร้อนโดยตรง



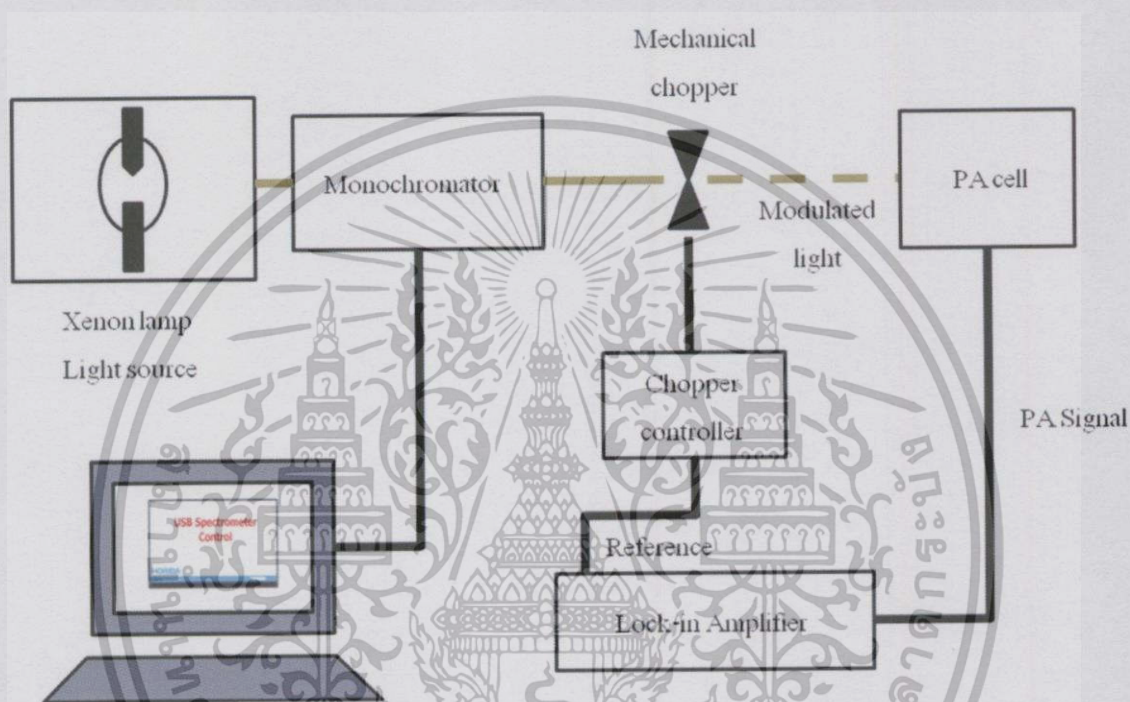
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 การจัดชุดทดลองโฟโตอะคูสติคสเปกโตรสโกปี

ในการจัดระบบโฟโตอะคูสติคสเปกโตรสโกปีจะจัดตามแบบแผนภาพ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงการจัดระบบโฟโตอะคูสติคสเปกโตรสโกปี

สำหรับการวัดในการทดลองนี้ทั้งหมดเราจะจัดชุดทดลองตามแผนภาพข้างต้น ซึ่งภายในระบบโฟโตอะคูสติคสเปกโตรสโกปีจะประกอบไปด้วย

3.1.1 แหล่งกำเนิดแสง (Light source)

ในการจัดระบบโฟโตอะคูสติคสเปกโตรสโกปี เราจะใช้หลอดปล่อยประจุซีออนขนาด 450 วัตต์ เป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยแหล่งกำเนิดแสงประเภทนี้จะให้ความยาวคลื่นในช่วง 200 - 2500 นาโนเมตร จากการอาร์คระหว่างขั้วสองขั้วในหลอดที่ถูกบรรจุด้วยแก๊สซีออนไว้ภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น "ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้"

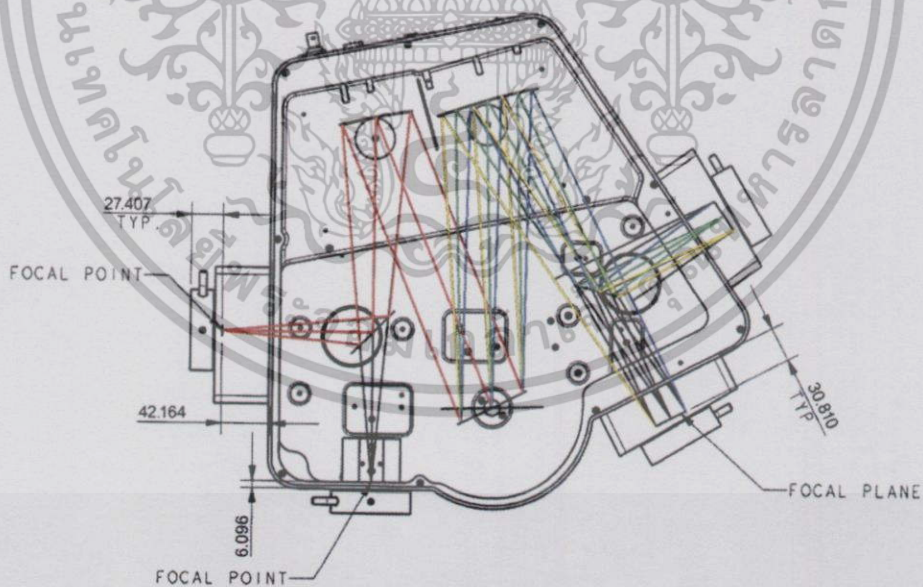
บทที่ 4



รูปที่ 3.2 แหล่งกำเนิดแสง Xenon lamp ขนาด 450 วัตต์

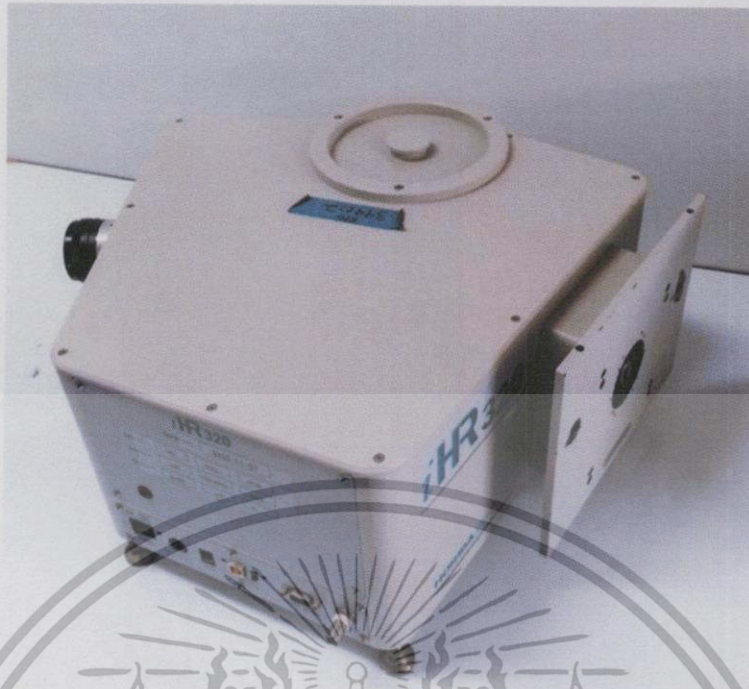
3.1.2 ตัวแยกความยาวคลื่น (Monochromator)

เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในแยกแสงหรือแยกความยาวคลื่นที่เราต้องการ โดยอาศัยเกรตติ้งในการแยกความยาวคลื่นต่างๆ ซึ่งเกรตติ้งจะถูกควบคุมผ่านพอร์ต USB ที่เชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรม USB Spectrometer Control ของบริษัท HORIBA JOBIN YVON



รูปที่ 3.3 แสดงภาพภายในตัวแยกความยาวคลื่นและเส้นทางเดินของแสง

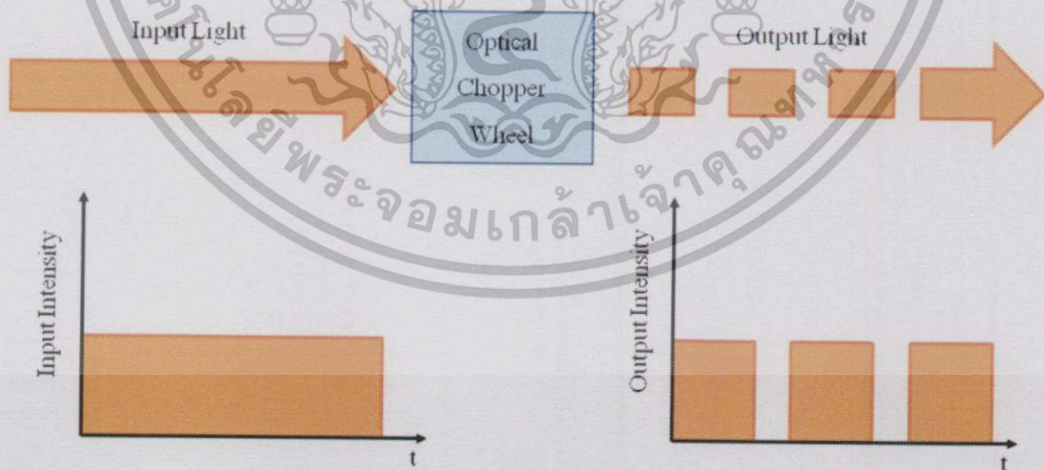
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ตัวแยกความยาวคลื่นรุ่น IHR320 (HORIBA JOBIN YVON, Inc.)

3.1.3 ตัวตัดแสง (Mechanical Chopper)

Mechanical Chopper จะทำหน้าที่ในการมอดูเลตแสง โดยใช้ใบพัดที่เป็นวงล้อในการตัดแสงเป็นช่วงๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 เพราะในการวัดสัญญาณโฟโตอะคูสติกจำเป็นต้องวัดสัญญาณการเปลี่ยนแปลงของความดันในโฟโตอะคูสติกเซลล์ซึ่งตัวตัดแสงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว อีกทั้งยังทำหน้าที่เป็นตัวให้สัญญาณอ้างอิงแก่เครื่องขยายสัญญาณลอคอิน



รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงการทำงานของตัวตัดแสงโดยคร่าว

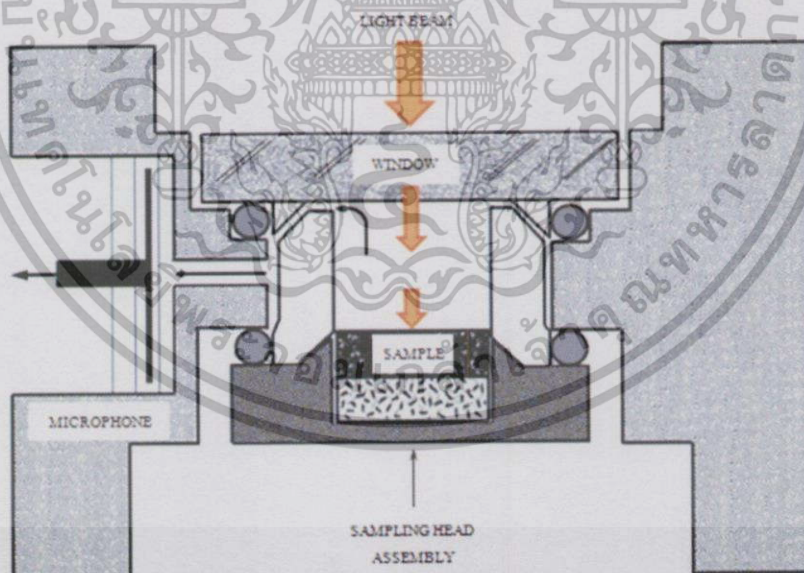
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 โฟโตดีตูดแสงและตัวควบคุมรุ่น SR540 (Stanford Research Systems, Inc.)

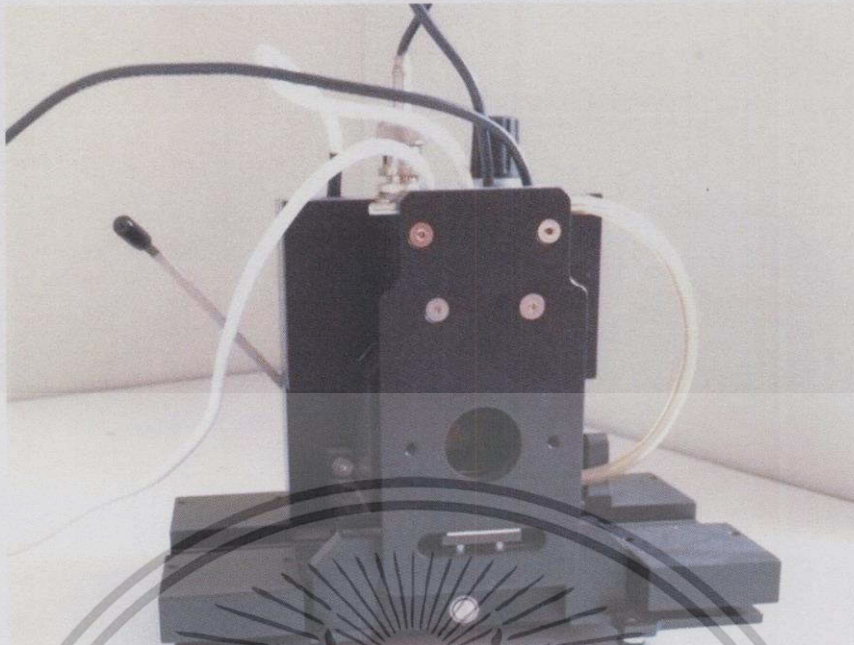
3.1.4 โฟโตอะคูสติกเซลล์ (Photoacoustic cell)

เมื่อแสงที่ผ่านการมอดูเลตมาตกกระทบบนรูเปิดที่ตัวเซลล์ สารตัวอย่างที่อยู่ภายในเซลล์ จะดูดกลืนแสงและเกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิบริเวณพื้นผิวแบบเป็นคาบตามแสงที่มอดูเลต อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปจะทำให้เกิดการอัดตัวและขยายตัวของอากาศ โดยโฟโตอะคูสติกเซลล์จะอาศัยไมโครโฟนขนาดเล็กที่อยู่ด้านในตัวของเซลล์เป็นตัวตรวจจับสัญญาณความดันดังกล่าว



รูปที่ 3.7 แสดงภาพภายในโฟโตอะคูสติกเซลล์โดยสังเขป

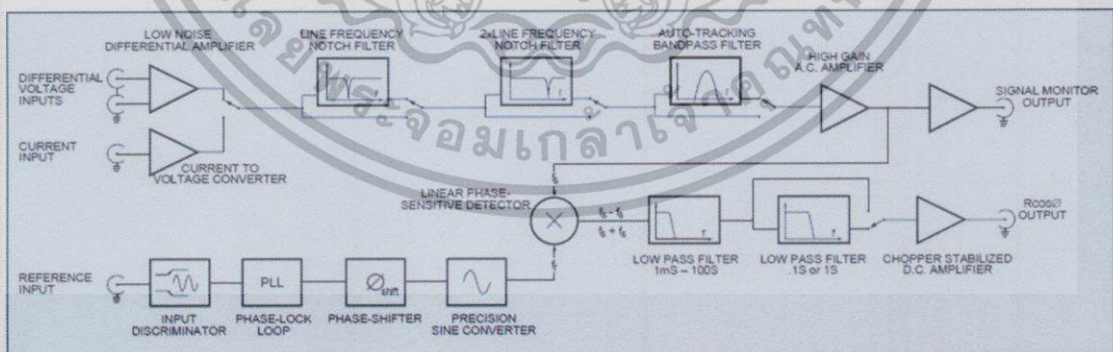
จากรูปที่ 3.7 จะเห็นได้ว่าเมื่อแสงที่ผ่านการมอดูเลตเดินทางผ่านกระจกด้านหน้าที่ทำมาจากควอตซ์ เข้าสู่ห้องปิดภายในเซลล์ แล้วตกกระทบบนยังสารตัวอย่างที่อยู่ภายใน สารตัวอย่างจะดูดกลืนแสงทำให้เกิดคลื่นความร้อนขึ้นบริเวณพื้นผิว คลื่นความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความดันภายในห้องปิดและถูกตรวจจับด้วยไมโครโฟนในด้านข้าง



รูปที่ 3.8 โฟโตอะคูสติกเซลล์ MTEC MODEL 300 (MTEC Photoacoustics, Inc.)

3.1.5 เครื่องขยายสัญญาณล็อกอิน (Lock-In Amplifier)

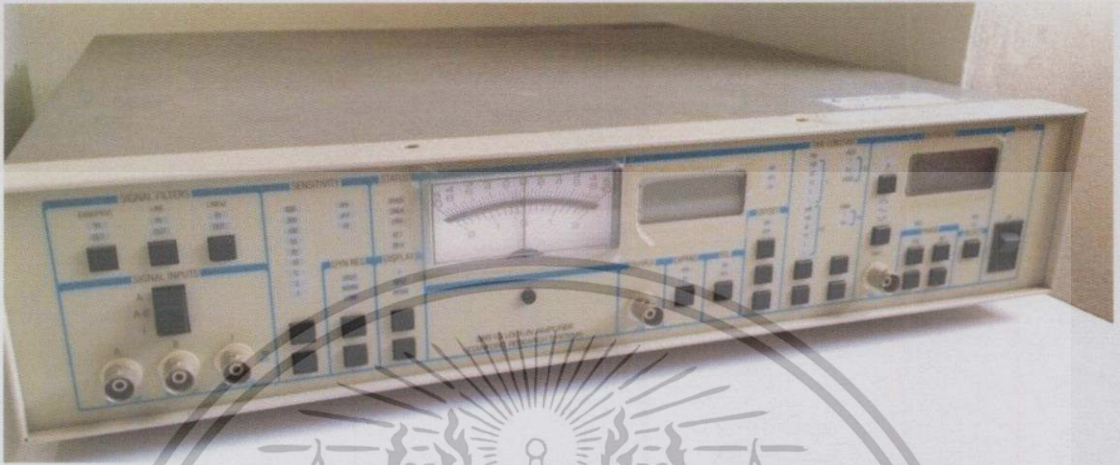
เครื่องขยายสัญญาณล็อกอินจะถูกนำมาใช้ในการลดสัญญาณรบกวนในขั้นตอนการวัด เนื่องจากขนาดสัญญาณที่ได้จากโฟโตอะคูสติกเซลล์มีขนาดเล็กมากในระดับไมโครโวลต์ จึงจำเป็นต้องใช้เครื่องขยายสัญญาณล็อกอินที่มีการวัดสัญญาณด้วยวิธี Phase-Sensitive Detection (PSD) ทำให้สามารถตรวจวัดสัญญาณด้วย Bandwidth ที่แคบมากๆ เราจึงสามารถวัดสัญญาณได้อย่างแม่นยำด้วยเครื่องดังกล่าว



รูปที่ 3.9 แสดงแผนภาพของเครื่องขยายสัญญาณล็อกอินรุ่น SR510 (Stanford Research Systems, Inc.)

จากรูปที่ 3.9 สัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ได้จากโฟโตอะคูสติกเซลล์จะถูกต่อเข้ากับอินพุตที่ของเครื่องขยายสัญญาณล็อกอิน ผ่านโวลต์เตจอินพุตที่แบบซิงเกิลเอนด์ที่มีสัญญาณ A บนแผงหน้าเครื่อง (Single Ended, A) จากนั้นเราจะปรับให้สัญญาณผ่านตัวกรองสัญญาณทั้งแบบ Bandpass Auto-tracking และ Notch ต่อมาสัญญาณจะผ่านส่วนขยายสัญญาณก่อนจะเข้าสู่ส่วน Phase-Sensitive

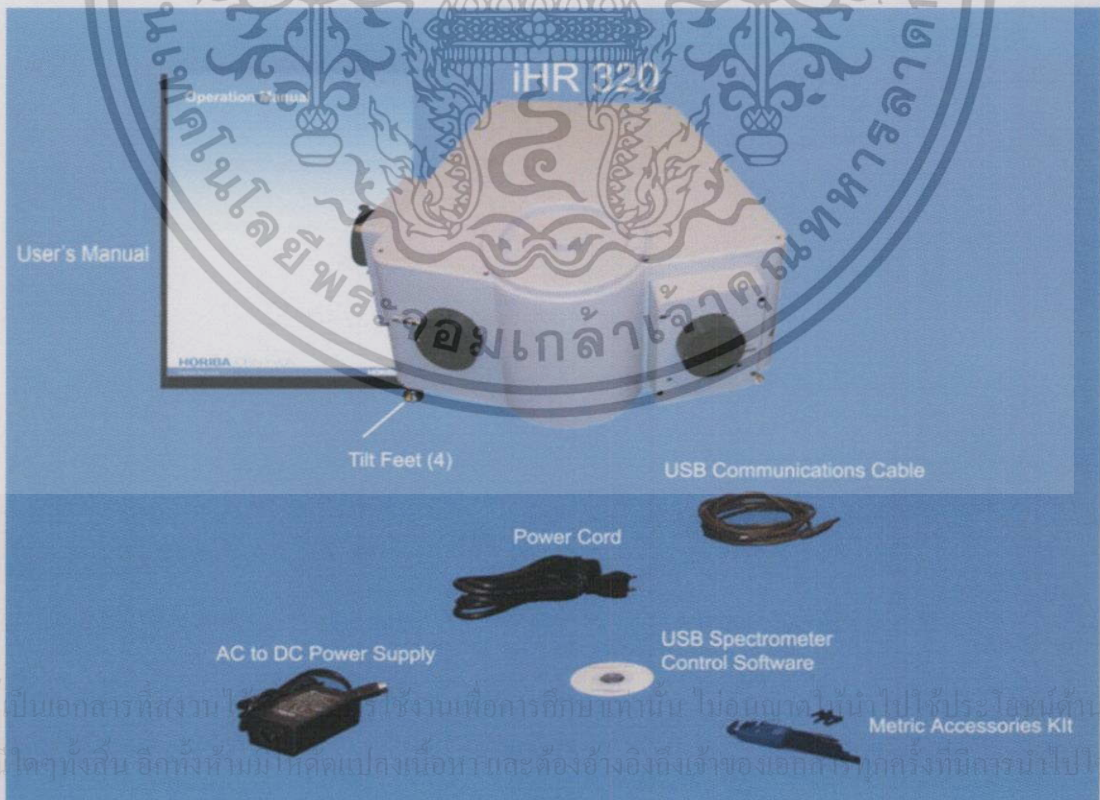
Detection ที่ทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณที่มีเฟสหรือความถี่เดียวกับสัญญาณอ้างอิงเพื่อทำการบวกหรือลบสัญญาณ สัญญาณลัพธ์ที่ได้จะถูกทำให้อยู่ในรูปของไฟกระแสดตรงก่อนที่ผ่านวงจรกรองแบบ Lowpass และถูกขยายสัญญาณอีกครั้ง โดยสัญญาณเอาต์พุตสามารถอ่านได้จากหน้าจอยแอลซีดี



รูปที่ 3.10 เครื่องขยายสัญญาณลือคอินรุ่น SR510 (Stanford Research Systems, Inc.)

3.2 โปรแกรมที่ใช้ควบคุมการทำงานของโมโนโครเมเตอร์

เราทำการเชื่อมต่อโปรแกรมกับโมโนโครเมเตอร์โดยใช้สาย USB และทำการติดตั้งโปรแกรมด้วย USB Spectrometer Control software ดังรูป

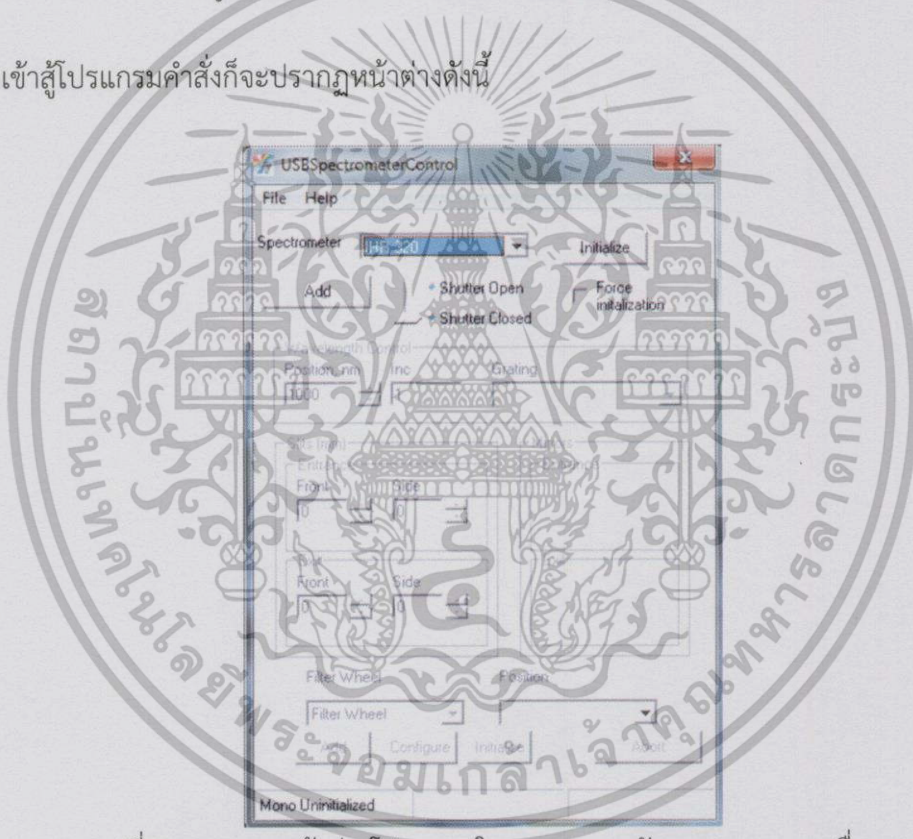


รูปที่ 3.11 ภาพแสดงส่วนประกอบของโมโนโครเมเตอร์ iHR 320



รูปที่ 3.12 แสดงโปรแกรมที่ใช้ควบคุมการทำงาน

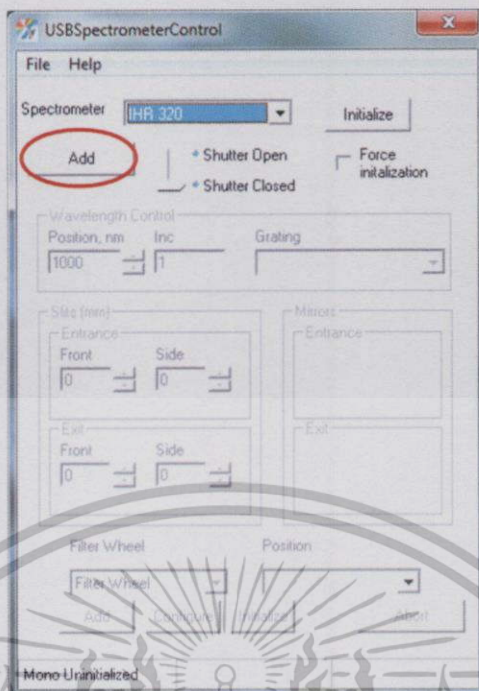
เมื่อเราเข้าสู่โปรแกรมคำสั่งก็จะปรากฏหน้าต่างดังนี้



รูปที่ 3.13 แสดงหน้าต่างโปรแกรมในการควบคุมตัวแยกความยาวคลื่น

ก่อนจะสั่งงานทำการควบคุมค่าความยาวคลื่นของตัวแยกความยาวคลื่น เราต้องทำการตั้งค่าต่างๆ โดยกดที่ Add

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

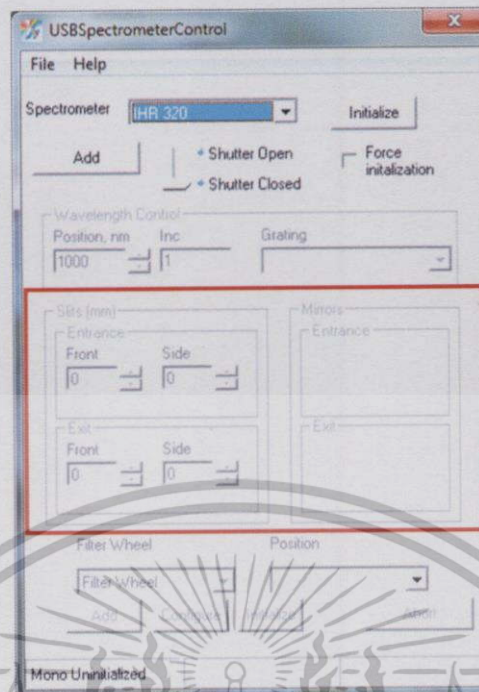


หลังจากทำการตั้งค่าเรียบร้อยแล้วก็กด Initialize เพื่อทำการบันทึกค่าที่ตั้งไว้



ทำการปิด/เปิด Slit ให้ตรงกับด้านที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เสร็จแล้วก็สามารถสั่งคำสั่งให้โมโนโครเมเตอร์ทำการเลือกค่าความยาวคลื่นที่เราต้องการ โดยการใส่ค่าความยาวคลื่นลงไปเป็น Wavelength Control พร้อมกับเลือก Grating ของโมโนโครเมเตอร์ให้ตรงกับย่านความยาวคลื่นที่ใช้งาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การเตรียมสารตัวอย่าง

3.3.1 คาร์บอน แบล็ค (Carbon Black)

คาร์บอนแบล็ค เป็นเขม่าสีดำที่ได้จากการเผาแบบย่อยสลายภายใต้การควบคุม (Controlled vapor-phase pyrolysis and Partial combustion) ของเชื้อเพลิงประเภทไฮโดรคาร์บอน โดยอาจเกิดปนกันอยู่กับสารกลุ่มฟูลเลอร์รีน คาร์บอนแบล็คมีหลายชนิด บางชนิดก็มีขนาดนาโนเท่านั้น แต่บางชนิดก็เป็นส่วนผสมของอนุภาคขนาดนาโนและอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าบ้าง

เนื่องจาก คาร์บอน แบล็ค สามารถดูดกลืนแสงได้ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและช่วงที่ตามองเห็น ดังนั้นผู้ทดลองจึงได้นำเอาคาร์บอนแบล็คมาใช้เป็นตัวอ้างอิงเพื่อหาสเปกตรัมของการปลดปล่อยของแหล่งกำเนิดเพื่อใช้เป็นตัวอ้างอิงการทดสอบระบบโฟโตอะคูสติคสเปกโตรสโกปี



รูปที่ 3.14 คาร์บอนแบล็ค (Carbon black)

3.3.2 แคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium Sulfide, CdS)

แคดเมียมซัลไฟด์ เป็น สารอนินทรีย์ เกิดจากการตกตะกอนของการละลายผลึกเกลือแคดเมียมกับไอออนของซัลไฟด์ มีลักษณะเป็นของแข็งมีสีเหลืองส้มหรือสีน้ำตาล แคดเมียมซัลไฟด์มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีค่าช่องว่างพลังงานเท่ากับ 2.42 อิเล็กตรอนโวลต์ มวลโมเลกุลเท่ากับ 144.48 กรัม ความหนาแน่นเท่ากับ 4.826 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลวอยู่ที่ 1,750 องศาเซลเซียส และจุดเดือดอยู่ที่ 980 องศาเซลเซียส

แคดเมียมซัลไฟด์ ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตวัสดุสารกึ่งตัวนำ เช่น เลเซอร์สารกึ่งตัวนำ เซลล์แสงอาทิตย์ และยังถูกนำมาใช้ในการผลิตตัวเซ็นเซอร์ต่างๆ เช่น ตัวต้านทานแปรค่าตามแสง LDR (Light Dependent Resistor) กล้อง Luminometer ควบคุมอัตโนมัติ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 แสดงแคดเมียมซัลไฟด์ที่ใช้ในการทดลอง

การอัดเม็ดแคดเมียมซัลไฟด์

เนื่องจากแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ของเรามีลักษณะเป็นผงดังนั้นจึงต้องมีขั้นตอนของการอัดเม็ดสารเพื่อที่จะสามารถนำมาใช้กับระบบโฟโตอะคูสติกได้ บล็อกอัดสารที่เราใช้จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่างๆดังรูป



รูปที่ 3.16 แสดงบล็อกอัดสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 แสดงแท่นอัดไฮดรอลิก

โดยการอัดเราจะใช้แท่นอัดไฮดรอลิกและบล็อกอัดสารเป็นตัวอัดเม็ดสาร สำหรับทุกตัวอย่างในการทดลองนี้จะใช้แรงอัดของเครื่องอัดไฮดรอลิกอยู่ที่ 3 ตัน ใช้เวลาในการอัดประมาณ 1 นาที (เวลาในการอัดที่นี้หมายถึงเวลาที่กระบอกสูบของเครื่องอัดไฮดรอลิกกดทับบล็อกอัดสารก่อนที่จะคลายออก)

3.4 การทดลอง

3.4.1 ตอนที่ 1 การหาช่องว่างแถบพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์

1. ทำการติดตั้งระบบตามรูปที่ 3.1 โดยต่อสัญญาณเอาต์พุตของโฟโตอะคูสติคเซลล์ไปยังอินพุตของเครื่องขยายสัญญาณลือคอิน และต่อสัญญาณอ้างอิงจากตัวควบคุมไบพัต เข้ากับช่องอินพุตที่อ้างอิงของเครื่องขยายสัญญาณลือคอิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 แสดงระบบโฟโตอะคูสติกที่ใช้ทดลอง

2. เปิดโปรแกรมที่ใช้สำหรับควบคุมตัวแยกความยาวคลื่น ทำการตั้งค่าโปรแกรม ใส่คาร์บอนแบล็คในโฟโตอะคูสติกเซลล์เพื่อทำการวัดสเปกตรัมการปลดปล่อยของหลอดซีนอน สำหรับการทำนอ-มอลไลซ์
3. ก่อนการวัด ควรเปิดแหล่งกำเนิดแสงทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที จากนั้นทำการวัดโดยการปรับความถี่ของตัวตัดแสง ไปที่ 80 เฮิร์ตซ์ ตั้งค่า Sensitivity และ Time Constant ของเครื่องขยายสัญญาณลือคอินให้เหมาะสมกับการอ่านค่าสัญญาณ
4. ทำการบันทึกค่าที่อ่านได้จากเครื่องขยายสัญญาณลือคอินที่ค่าความยาวคลื่นต่างๆ ตั้งแต่ 400-700 นาโนเมตร โดยเพิ่มขึ้นทีละ 5 นาโนเมตร
5. ทำการทดลองอีกครั้งโดยเปลี่ยนสารที่ใช้ทดลองเป็นแคดเมียมซัลไฟด์ แล้ววัดสัญญาณในลักษณะเดียวกัน
6. นำข้อมูลที่ได้มาหาค่าช่องว่างแถบพลังงานโดยการนำสัญญาณโฟโตอะคูสติกมาทำการนอ-มอลไลซ์

3.4.2 ตอนที่ 2 การหาค่าสภาพแพร่ทางความร้อนของแคดเมียมซัลไฟด์

1. ทำการติดตั้งระบบดังข้อที่ 1 ของตอนที่ 1

2. เปิดโปรแกรมที่ใช้สำหรับควบคุมตัวแยกความยาวคลื่น และตั้งค่าโปรแกรม ใส่แคดเมียมซัลไฟด์ในโฟโตอะคูสติกเซลล์เพื่อทำการวัดสัญญาณโฟโตอะคูสติก โดยเริ่มจากความหนา 0.042 เซนติเมตร ปรับค่าความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดตามความเหมาะสมซึ่งในการทดลองนี้จะปรับไปที่ 457.9 นาโนเมตร

3. เปิดระบบการวัดโดยเริ่มจากเปิดแหล่งกำเนิดแสงทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที ตั้งค่า Sensitivity และ Time Constant ของเครื่องขยายสัญญาณลือคอินให้เหมาะสมต่อการอ่านค่าสัญญาณ
4. ทำการบันทึกค่าสัญญาณโพโตอะคูสติค ที่ได้ ณ ความถี่ต่างๆ ตั้งแต่ 4-40 เฮิร์ตซ์โดยเพิ่มขึ้นทีละ 1 เฮิร์ตซ์
5. ทำการทดลองอีกครั้งโดยการเปลี่ยนค่าความหนาของแคดเมียมซัลไฟด์ เป็น 0.077 เซนติเมตร และ 0.123 เซนติเมตร ตามลำดับ
6. นำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าสภาพแพร่ทางความร้อน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การหาค่าช่องว่างพลังงาน (Energy gap , E_g) ของแคดเมียมซัลไฟด์

ในการหาค่าช่องว่างพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์โดยใช้เทคนิคโฟโตอะคูสติกเราจะปรับความถี่ของตัวตัดแสงไว้ที่ 80 เฮิรตซ์ ซึ่งการเลือกความถี่ก็ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของสารว่านำความร้อนได้ดีเพียงใด จากนั้นเราจะฉายแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆไปยังโฟโตอะคูสติกเซลล์แล้วบันทึกค่าที่อ่านได้จากเครื่องขยายสัญญาณลือคอินเพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าช่องว่างพลังงาน

4.1.1 การวัดสเปกตรัมโฟโตอะคูสติกของคาร์บอนแบล็ค

ในขั้นตอนการหาค่าช่องว่างพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์ เราจะเริ่มจากการหาสเปกตรัมโฟโตอะคูสติกของคาร์บอนแบล็ค เนื่องจากคาร์บอนแบล็คสามารถดูดกลืนและเปล่งแสงได้ทุกช่วงความยาวคลื่น ดังนั้นสเปกตรัมที่ได้จากคาร์บอนแบล็คจึงเปรียบเสมือนกับสเปกตรัมการปลดปล่อยของหลอดซินอนซึ่งจะเป็นตัวมาตรฐานสำหรับการทำนอร์มอลไลซ์ ค่าสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่วัดได้จากคาร์บอนแบล็คจะแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4.1 ค่าสัญญาณโฟโตอะคูสติกของคาร์บอนแบล็ค

λ (nm)	Photoacoustic Signal (μV)			
	1 st	2 nd	3 rd	Average
400	5.2	3.7	3.7	4.2000
405	4.6	4	4.7	4.4333
410	4.6	5.3	5.3	5.0667
415	4.7	5.8	5.3	5.2667
420	5	6.5	6.2	5.9000
425	5.3	8.3	8.3	7.3000
430	7.1	9.6	9.6	8.7667
435	7.8	11.8	10.7	10.1000
440	9.1	14.5	14.1	12.5667
445	10.8	15.8	15.8	14.1333

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่าสัญญาณโฟโตอะคูสติกของคาร์บอนแบล็ค (ต่อ)

λ (nm)	Photoacoustic Signal (μV)			
	1st	2nd	3rd	Average
450	11.8	17.7	18.1	15.8667
455	12.8	20.7	19.5	17.6667
460	15.8	22.5	22.5	20.2667
465	18.5	24.7	23.5	22.2333
470	21.8	27.6	25.6	25.0000
475	26.5	30.3	29	28.6000
480	30.1	34.7	33.2	32.6667
485	39.3	42.5	40.1	40.6333
490	50.2	51.2	49.5	50.3000
495	54.5	54.5	51.8	53.6000
500	54.3	53.2	48.7	52.0667
505	53.2	49.6	45.2	49.3333
510	50.1	48.6	44.2	47.6333
515	49.5	46.7	43.3	46.5000
520	48.1	45.7	41.8	45.2000
525	45.7	45	39.3	43.3333
530	42.6	42.3	38.3	41.0667
535	41.5	40.8	38.1	40.1333
540	40.5	40.5	38.2	39.7333
545	39.8	39.6	37.1	38.8333
550	39	39.8	37.1	38.6333
555	39.3	39.7	36.5	38.5000
560	37.7	39.1	36.6	37.8000
565	36	39.7	36.8	37.5000
570	35.8	39.8	37.1	37.5667
575	37.2	39.3	37.8	38.1000
580	40.5	40	37.5	39.3333

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้ภายในเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามนำไปเผยแพร่หรือแจ้งถึงเจ้าพนักงานที่เกี่ยวข้องที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่าสัญญาณโฟโตอะคูสติกของคาร์บอนแบล็ค (ต่อ)

λ (nm)	Photoacoustic Signal (μV)			
	1st	2nd	3rd	Average
585	39.6	40.5	37.8	39.3000
590	39.7	40.8	37.8	39.4333
595	39.8	42.1	38.5	40.1333
600	40.1	43.8	38.7	40.8667
605	41.1	45.2	40.5	42.2667
610	41.7	45.2	41.5	42.8000
615	42.3	45.5	41.7	43.1667
620	42.1	45.1	41.3	42.8333
625	41.5	43.7	40.5	41.9000
630	40.8	44	40.7	41.8333
635	41.5	45.7	41.7	42.9667
640	45.5	48.2	42.7	45.4667
645	45.8	48.8	45.5	46.7000
650	46.5	49	45	46.8333
655	47	49.6	44.5	47.0333
660	46.2	50.1	44.2	46.8333
665	46.2	49.3	44.2	46.5667
670	46.3	48.6	43.8	46.2333
675	44.2	47	42.3	44.5000
680	42.1	44.6	40.6	42.4333
685	40.5	42.7	38.8	40.6667
690	39	42.5	37.2	39.5667
695	37.6	41.1	37.7	38.8000
700	37.7	40.6	37.6	38.6333
705	39.3	42	38.1	39.8000
710	40.1	43.6	39.5	41.0667
715	40.2	43.7	39.8	41.2333

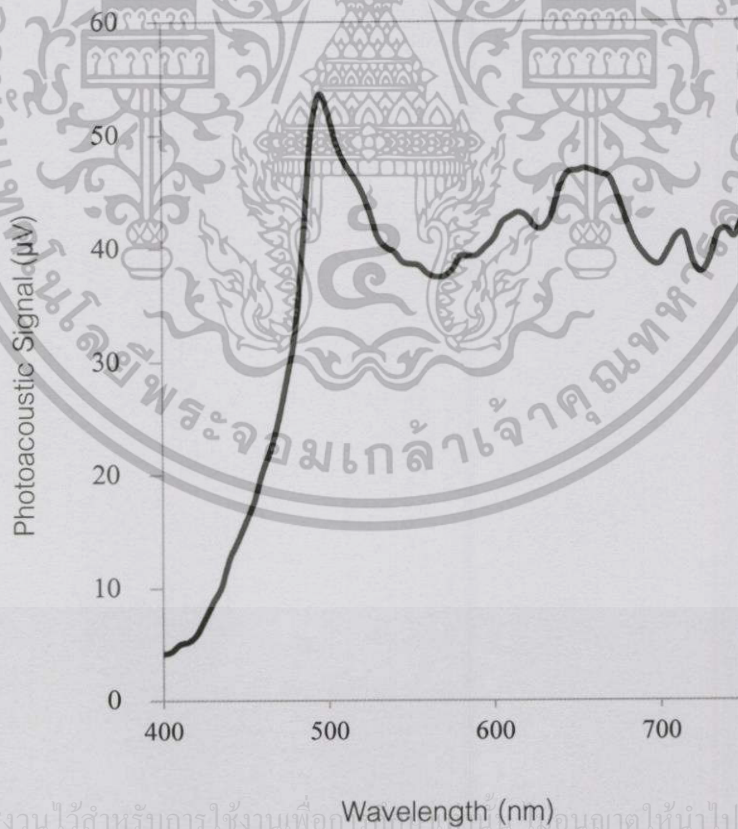
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรนำออกไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่าสัญญาณโฟโตอะคูสติกของคาร์บอนแบล็ค (ต่อ)

λ (nm)	Photoacoustic Signal (μV)			
	1st	2nd	3rd	Average
720	39.1	41.1	36.2	38.8000
725	38.1	40.5	35.1	37.9000
730	37.8	41.7	37.6	39.0333
735	39.5	44.5	40	41.3333
740	40.2	44.6	40.2	41.6667
745	39.6	43.7	39.8	41.0333
750	43.8	44.3	40.6	42.9000

เมื่อนำค่าสัญญาณโฟโตอะคูสติกของคาร์บอนแบล็คที่เฉลี่ยแล้วมาพล็อตเทียบกับความยาวคลื่นจะได้สเปกตรัมโฟโตอะคูสติกของคาร์บอนแบล็คดังรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อวัตถุประสงค์ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้า รูปที่ 4.1 แสดงสเปกตรัมโฟโตอะคูสติกของคาร์บอนแบล็ค

4.1.2 การวัดสเปกตรัมโฟโตอะคูสติกของแคดเมียมซัลไฟด์

ทำการวัดสัญญาณโฟโตอะคูสติกของแคดเมียมซัลไฟด์ในลักษณะเดียวกัน เพื่อที่จะหาสเปกตรัมโฟโตอะคูสติกของแคดเมียมซัลไฟด์ โดยค่าสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่วัดได้จากแคดเมียมซัลไฟด์จะแสดงอยู่ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าสัญญาณโฟโตอะคูสติกของแคดเมียมซัลไฟด์

λ (nm)	Photoacoustic Signal (μV)			
	1 st	2 nd	3 rd	Average
400	1.8	2.2	2.8	2.2667
405	2.1	3.1	3.3	2.8333
410	2.2	3.3	3.5	3.0000
415	2.5	3.5	3.7	3.2333
420	3.3	4	4.3	3.8667
425	4.3	4.6	5.1	4.6667
430	5.2	5.8	5.8	5.6000
435	6.5	6.5	7.2	6.7333
440	7.2	7.7	8.2	7.7000
445	9.3	8.7	9.1	9.0333
450	9.6	9.6	10	9.7333
455	10.3	11.5	11.3	11.0333
460	11.6	12	12.2	11.9333
465	12.2	13.8	13.8	13.2667
470	14.5	15.3	15.3	15.0333
475	15.8	17.6	17.5	16.9667
480	18.8	19.5	20	19.4333
485	23.3	24.7	24.6	24.2000
490	29.1	28.7	29.1	28.9667
495	29.3	30.1	30.1	29.8333
500	27.5	28.1	27.7	27.7667
505	25.6	27.1	26.8	26.5000
510	25	26.2	26.2	25.8000
515	24	24.3	25.2	24.5000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าสัญญาณโฟโตอะคูสติกของแคดเมียมซัลไฟด์ (ต่อ)

λ (nm)	Photoacoustic Signal (μV)			
	1 st	2 nd	3 rd	Average
520	22.8	23.5	23.5	23.2667
525	21.2	22.2	21.8	21.7333
530	20.2	21.3	21.3	20.9333
535	20	20.2	20.2	20.1333
540	19.1	20	20	19.7000
545	18.1	19.3	19	18.8000
550	17.1	19.1	18.3	18.1667
555	16.3	18.2	17.2	17.2333
560	15.3	16.2	16.5	16.0000
565	14.1	15	14.7	14.6000
570	13.7	15.3	14	14.3333
575	12.7	13.3	13.1	13.0333
580	12.2	12.2	12.1	12.1667
585	11.5	12.1	11.2	11.6000
590	10.6	10.2	10.6	10.4667
595	10.1	10.6	10.1	10.2667
600	9.6	9.7	9.5	9.6000
605	8.3	8.7	9.3	8.7667
610	8.1	9	8.3	8.4667
615	7.6	8.3	8.1	8.0000
620	7.1	7.2	7.5	7.2667
625	6.8	7.2	6.3	6.7667
630	6.3	7	6.6	6.6333
635	6.6	6.2	6.5	6.4333
640	6.8	6.2	6.5	6.5000
645	6.3	6.8	6.2	6.4333
650	6.6	6.2	6.5	6.4333
655	6.8	6.6	6.2	6.5333
660	7.1	6.8	6.8	6.9000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าสัญญาณโฟโตอะคูสติกของแคดเมียมซัลไฟด์ (ต่อ)

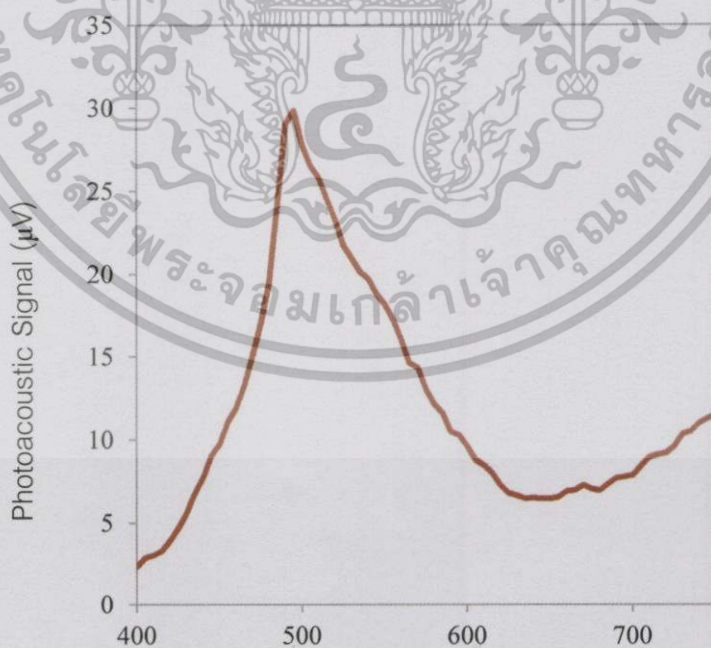
λ (nm)	Photoacoustic Signal (μV)			
	1 st	2 nd	3 rd	Average
665	6.6	7.2	7.1	6.9667
670	7.2	7	7.6	7.2667
675	7.2	6.8	7.1	7.0333
680	7.2	6.5	7.1	6.9333
685	7.8	7	7.2	7.3333
690	8.1	7.5	7.5	7.7000
695	7.8	7.7	7.8	7.7667
700	8.2	7.2	8.2	7.8667
705	8.8	8.2	8.3	8.4333
710	9.3	8.5	9	8.9333
715	8.7	9.6	9	9.1000
720	8.8	9.3	9.5	9.2000
725	9	10.1	9.7	9.6000
730	10.2	10.8	10	10.3333
735	10.6	10.3	10.6	10.5000
740	10.8	11	11.2	11.0000
745	11	11.3	11.5	11.2667
750	11.3	11.5	11.8	11.5333
650	6.6	6.2	6.5	6.4333
655	6.8	6.6	6.2	6.5333
660	7.1	6.8	6.8	6.9000
665	6.6	7.2	7.1	6.9667
670	7.2	7	7.6	7.2667
675	7.2	6.8	7.1	7.0333
680	7.2	6.5	7.1	6.9333
685	7.8	7	7.2	7.3333
690	8.1	7.5	7.5	7.7000
695	7.8	7.7	7.8	7.7667
700	8.2	7.2	8.2	7.8667

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าสัญญาณโฟโตอะคูสติกของแคดเมียมซัลไฟด์ (ต่อ)

λ (nm)	Photoacoustic Signal (μV)			
	1 st	2 nd	3 rd	Average
705	8.8	8.2	8.3	8.4333
710	9.3	8.5	9	8.9333
715	8.7	9.6	9	9.1000
720	8.8	9.3	9.5	9.2000
725	9	10.1	9.7	9.6000
730	10.2	10.8	10	10.3333
735	10.6	10.3	10.6	10.5000
740	10.8	11	11.2	11.0000
745	11	11.3	11.5	11.2667
750	11.3	11.5	11.8	11.5333
740	10.8	11	11.2	11.0000
745	11	11.3	11.5	11.2667
750	11.3	11.5	11.8	11.5333

เมื่อนำค่าสัญญาณโฟโตอะคูสติกของแคดเมียมซัลไฟด์ที่เฉลี่ยแล้วมาพล็อตเทียบกับความยาวคลื่นจะได้สเปกตรัมโฟโตอะคูสติกของแคดเมียมซัลไฟด์ดังรูปที่ 4.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและเผยแพร่ไปยังเว็บไซต์ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัมโฟโตอะคูสติกของแคดเมียมซัลไฟด์

4.1.3 สเปกตรัมที่ผ่านการนอร์มอลไลซ์ของแคดเมียมซัลไฟด์

เมื่อได้ค่าสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ค่าความยาวคลื่นต่างๆแล้ว เราจะนำค่าสัญญาณที่วัดได้จากคาร์บอนแบล็คและแคดเมียมซัลไฟด์มาทำการนอร์มอลไลซ์ เพื่อที่จะได้เห็นบริเวณที่เกิดการดูดกลืนชัดเจนขึ้น ค่าสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ได้ทำการนอร์มอลไลซ์แล้วจะแสดงดังตาราง

ตารางที่ 4.3 ค่าสัญญาณโฟโตอะคูสติกของคาร์บอนแบล็คและแคดเมียมซัลไฟด์ที่ได้ทำการนอร์มอลไลซ์แล้ว

λ (nm)	Carbon black PA Signal Average (μV)	Cadmium Sulfide PA Signal Average (μV)	Normalized PA Signal
400	4.2000	2.2667	0.5397
405	4.4333	2.8333	0.6391
410	5.0667	3.0000	0.5921
415	5.2667	3.2333	0.6139
420	5.9000	3.8667	0.6554
425	7.3000	4.6667	0.6393
430	8.7667	5.6000	0.6388
435	10.1000	6.7333	0.6667
440	12.5667	7.7000	0.6127
445	14.1333	9.0333	0.6392
450	15.8667	9.7333	0.6134
455	17.6667	11.0333	0.6245
460	20.2667	11.9333	0.5888
465	22.2333	13.2667	0.5967
470	25.0000	15.0333	0.6013
475	28.6000	16.9667	0.5932
480	32.6667	19.4333	0.5949
485	40.6333	24.2000	0.5956
490	50.3000	28.9667	0.5759
495	53.6000	29.8333	0.5566
500	52.0667	27.7667	0.5333
505	49.3333	26.5000	0.5372
510	47.6333	25.8000	0.5416

เอกสารนี้เป็นเอกสารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 500 งานเพื่อการศึกษา มอนูเมนต์ให้
 505 ทั้งห้ามมิให้
 510 นื้อหาและต้องอ้าของเอกสารทุก
 510 การนำ
 510 การนำ
 510 การนำ

ตารางที่ 4.3 ค่าสัญญาณโฟโตอะคูสติกของคาร์บอนแบล็คและแคดเมียมซัลไฟด์ที่ได้ทำการนอร์มอลไลซ์แล้ว (ต่อ)

λ (nm)	Carbon black PA Signal Average (μV)	Cadmium Sulfide PA Signal Average (μV)	Normalized PA Signal
515	46.5000	24.5000	0.5269
520	45.2000	23.2667	0.5147
525	43.3333	21.7333	0.5015
530	41.0667	20.9333	0.5097
535	40.1333	20.1333	0.5017
540	39.7333	19.7000	0.4958
545	38.8333	18.8000	0.4841
550	38.6333	18.1667	0.4702
555	38.5000	17.2333	0.4476
560	37.8000	16.0000	0.4233
565	37.5000	14.6000	0.3893
570	37.5667	14.3333	0.3815
575	38.1000	13.0333	0.3421
580	39.3333	12.1667	0.3093
585	39.3000	11.6000	0.2952
590	39.4333	10.4667	0.2654
595	40.1333	10.2667	0.2558
600	40.8667	9.6000	0.2349
605	42.2667	8.7667	0.2074
610	42.8000	8.4667	0.1978
615	43.1667	8.0000	0.1853
620	42.8333	7.2667	0.1696
625	41.9000	6.7667	0.1615
630	41.8333	6.6333	0.1586
635	42.9667	6.4333	0.1497
640	45.4667	6.5000	0.1430
645	46.7000	6.4333	0.1378

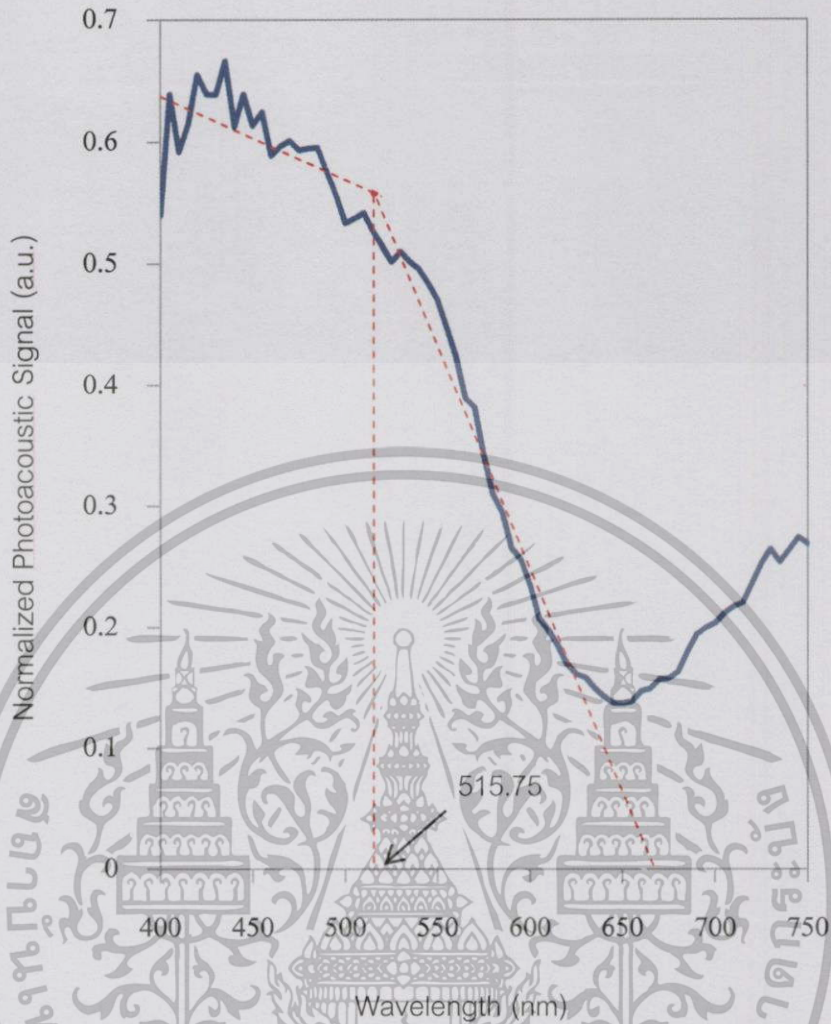
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยและต้องขอร้องถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่าสัญญาณโฟโตอะคูสติกของคาร์บอนแบล็คและแคดเมียมซัลไฟด์ที่ได้ทำการนอร์มอลไลซ์แล้ว (ต่อ)

λ (nm)	Carbon black PA Signal Average (μV)	Cadmium Sulfide PA Signal Average (μV)	Normalized PA Signal
650	46.8333	6.4333	0.1374
655	47.0333	6.5333	0.1389
660	46.8333	6.9000	0.1473
665	46.5667	6.9667	0.1496
670	46.2333	7.2667	0.1572
675	44.5000	7.0333	0.1581
680	42.4333	6.9333	0.1634
685	40.6667	7.3333	0.1803
690	39.5667	7.7000	0.1946
695	38.8000	7.7667	0.2002
700	38.6333	7.8667	0.2036
705	39.8000	8.4333	0.2119
710	41.0667	8.9333	0.2175
715	41.2333	9.1000	0.2207
720	38.8000	9.2000	0.2371
725	37.9000	9.6000	0.2533
730	39.0333	10.3333	0.2647
735	41.3333	10.5000	0.2540
740	41.6667	11.0000	0.2640
745	41.0333	11.2667	0.2746
750	42.9000	11.5333	0.2688

เมื่อนำสัญญาณโฟโตอะคูสติกของแคดเมียมซัลไฟด์ที่ได้ทำการนอร์มอลไลซ์กับสัญญาณโฟโตอะคูสติกของคาร์บอนแบล็คมาพล็อตเทียบกับความยาวคลื่นจะทำให้ได้สเปกตรัมโฟโตอะคูสติกที่ผ่านการนอร์มอลไลซ์ดังรูป

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินส่วนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงสเปกตรัมโฟโตอะคูสติกที่ผ่านการนอร์มอลไลซ์

จากสเปกตรัมโฟโตอะคูสติกที่ผ่านการนอร์มอลไลซ์ดังรูปที่ 4.3 เราได้ค่าความยาวคลื่นของโฟตอนทีแคดเมียมซัลไฟด์เริ่มทำการดูดกลืนอยู่ที่ 515.75 นาโนเมตร หากแปลงเป็นรูปของพลังงานโฟตอนจะได้ 2.41 อิเล็กตรอนโวลต์ จากค่าช่องว่างพลังงานที่ได้ มันจะถูกนำไปใช้ในการระบุค่าความยาวคลื่นที่ใช้หาสภาพแพร่ทางความร้อนในขั้นต่อไป

4.2 การหาค่าสภาพแพร่ทางความร้อน (thermal diffusivity, α) ของแคดเมียมซัลไฟด์

ทำการทดลอง โดยการปรับค่าความถี่จาก 4-40 เฮิรตซ์ และเราจะใช้ความยาวคลื่นที่มีพลังงานสูงกว่าค่าช่องว่างพลังงานเพื่อให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานในรูปของโฟนอน ในขั้นตอนนี้เราจะใช้ความยาวคลื่น 457.9 นาโนเมตร จากนั้นทำการวัดแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติก ที่ค่าความหนา 3 ค่า ซึ่งได้ผลการทดลองในตารางที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 ดังนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทางสน อักทงห้ามมิ ให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 ความหนา เท่ากับ 0.042 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ค่าความถี่ 4-40 เฮิรตซ์ ของตัวอย่างที่มีความหนา 0.042 เซนติเมตร

frequency (Hz)	Photoacoustic signal (μV)			
	1 st	2 nd	3 rd	Average
4	316.5	308.1	323.0	315.8667
5	287.5	271.7	276.5	278.5667
6	243.3	241.0	251.5	245.2667
7	204.5	196.5	204.6	201.8667
8	178.7	169.3	161.2	169.7333
9	152.0	148.5	144.5	148.3333
10	137.0	132.2	130.7	133.3000
11	118.0	112.5	114.6	115.0333
12	105.2	102.1	100.1	102.4667
13	96.3	93.6	93.2	94.3667
14	90.5	85.1	85.5	87.0333
15	82.6	80.0	78.1	80.2333
16	78.6	74.5	72.6	75.2333
17	74.3	70.0	68.1	70.8000
18	68.1	65.7	64.0	65.9333
19	64.5	62.0	60.0	62.1667
20	60.6	57.7	56.7	58.3333
21	57.0	54.5	53.7	55.0667
22	53.7	51.7	51.7	52.3667
23	50.6	49.2	49.0	49.6000

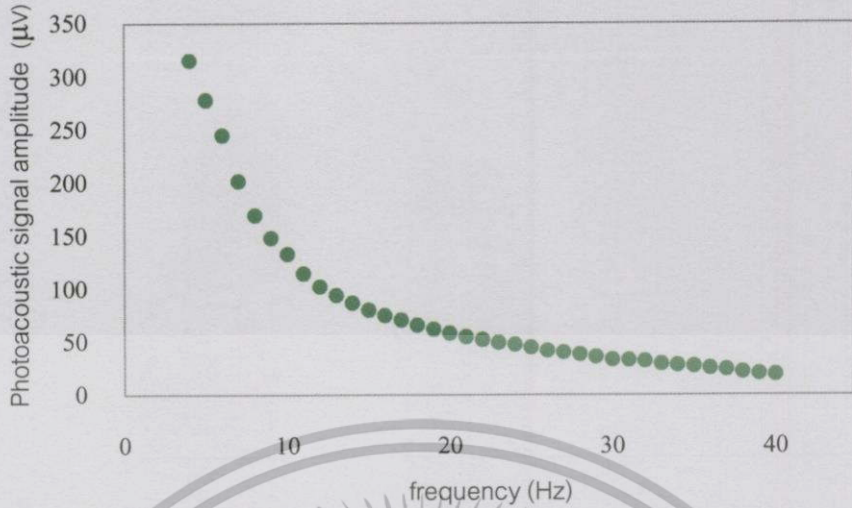
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ค่าความถี่ 4-40 เฮิร์ตซ์ ของตัวอย่างที่มีความหนา 0.042 เซนติเมตร (ต่อ)

frequency (Hz)	Photoacoustic signal (μV)			
	1 st	2 nd	3 rd	Average
24	49.2	47.0	46.7	47.6333
25	46.1	44.6	44.3	45.0000
26	43.8	41.5	40.7	42.0000
27	40.7	39.7	40.7	40.3667
28	38.7	38.2	39.0	38.6333
29	36.3	36.2	36.0	36.1667
30	33.7	32.8	33.5	33.3333
31	33.7	32.2	33.3	33.0667
32	32.6	31.2	32.8	32.2000
33	30.8	28.7	29.3	29.6000
34	28.8	27.5	28.5	28.2667
35	27.7	26.8	27.5	27.3333
36	26.5	24.5	25.8	25.6000
37	24.7	24.1	24.6	24.4667
38	21.8	21.8	22.6	22.0667
39	20.6	20.0	20.8	20.4667
40	18.5	20.1	19.6	19.4000

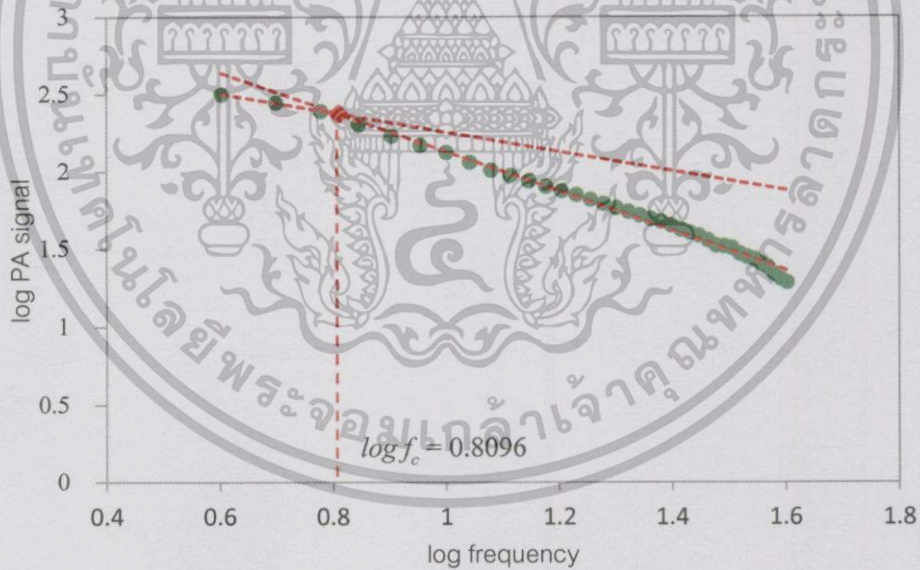
นำค่าเฉลี่ยของแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ได้ มาพล็อตเทียบกับค่าความถี่ของตัวตัดแสง เพื่อดูแนวโน้มของค่าที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงกราฟที่พล็อตระหว่างค่าเฉลี่ยแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกกับความถี่ของตัววัดแสง สำหรับตัวอย่างที่มีความหนา 0.042 เซนติเมตร

เมื่อได้ผลการทดลอง ทำการใส่ log ลงไปเพื่อให้เห็นความชันที่แตกต่างกันของกราฟนี้อย่างชัดเจน แล้วนำกราฟนี้มาหาค่า Characteristic frequency (f_c) เพื่อนำไปหาค่าสภาพแพร่ทางความร้อน



รูปที่ 4.5 แสดงกราฟที่พล็อตระหว่าง log ของแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกกับ log ของความถี่ของตัวอย่างที่มีความหนา 0.042 เซนติเมตร

เมื่อทราบค่า Characteristic frequency ก็สามารถหาค่าสภาพแพร่ทางความร้อนได้โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการอ้างอิงถึงงานวิจัยที่นำเสนอไว้หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และข้อมูลงานวิจัยนี้ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha = l^2 f_c = (0.042 \text{ cm})^2 (6.45 \text{ Hz}) = 0.011 \text{ cm}^2 / \text{s}$$

$$\alpha = 1.1 \times 10^{-2} \text{ cm}^2 / \text{s}$$

4.2.2 ความหนา เท่ากับ 0.077 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ค่าความถี่ 4-40 เฮิร์ตซ์ ของตัวอย่างที่มีความหนา 0.077 เซนติเมตร

frequency (Hz)	Photoacoustic signal (μV)			
	1 st	2 nd	3 rd	Average
4	346.1	331.2	328.2	335.1667
5	301.6	307.7	291.5	300.2667
6	274.5	263	269.6	269.0333
7	231.1	224.5	219.5	225.0333
8	197.5	190	187.5	191.6667
9	166.5	165.6	162.7	164.9333
10	150	142.3	145.5	145.9333
11	130.5	125.6	123.7	126.6000
12	117.6	113.8	113.7	115.0333
13	106.7	105.5	103.7	105.3000
14	98.6	95	96.5	96.7000
15	91.7	89.5	88	89.7333
16	85.1	82.1	83.3	83.5000
17	80.1	78.7	78.2	79.0000
18	74.2	74.3	73.2	73.9000
19	70.2	70.2	69.5	69.9667
20	65.7	63.8	64.2	64.5667

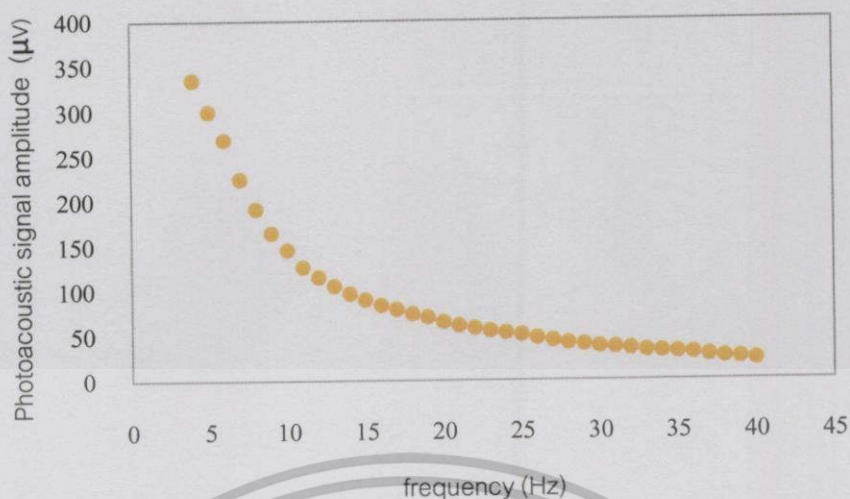
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ค่าความถี่ 4-40 เฮิรตซ์ ของตัวอย่างที่มีความหนา 0.077 เซนติเมตร (ต่อ)

frequency (Hz)	Photoacoustic signal (μV)			
	1 st	2 nd	3 rd	Average
21	61.2	60.2	61.1	60.8333
22	58.2	57	58.2	57.8000
23	55.1	53.7	55.1	54.6333
24	53.1	51.1	53.6	52.6000
25	51.2	50.1	50.2	50.5000
26	48.2	47	45.5	46.9000
27	46.3	42.1	43.6	44.0000
28	43.8	39.7	40	41.1667
29	40.1	39.6	39.6	39.7667
30	36	37.6	37.8	37.1333
31	35.8	36.2	37.6	36.5333
32	34.5	34.7	35.8	35.0000
33	32.5	32	32.8	32.4333
34	31.5	31.8	31.8	31.7000
35	30.2	30.2	31.5	30.6333
36	29.3	29.6	29.6	29.5000
37	27.6	26.3	27.8	27.2333
38	25	25.8	24.6	25.1333
39	24.5	24.5	23.7	24.2333
40	22.7	22	22	22.2333

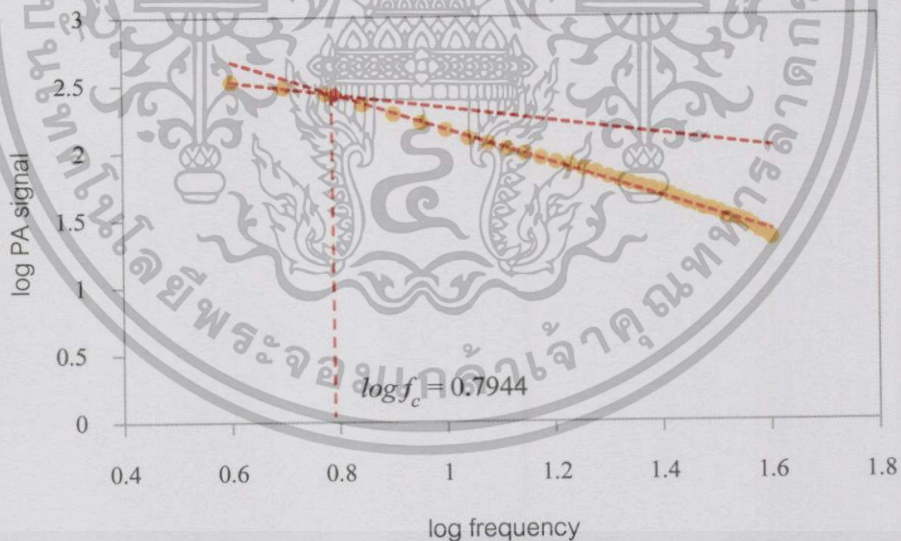
นำค่าเฉลี่ยแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ได้ มาพล็อตเทียบกับค่าความถี่ของตัวตัดแสง เพื่อดูแนวโน้มของค่าที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงกราฟที่พล็อตระหว่างค่าเฉลี่ยแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกกับความถี่ของตัววัดแสง สำหรับตัวอย่างที่มีความหนา 0.077 เซนติเมตร

เมื่อได้ผลการทดลอง ทำการใส่ \log ลงไปเพื่อให้เห็นความชันที่แตกต่างกันของกราฟนี้อย่างชัดเจน แล้วนำกราฟนี้มาหาค่า Characteristic frequency (f_c) เพื่อนำไปหาค่าสภาพแพร่ทางความร้อนในลำดับต่อไป



รูปที่ 4.7 แสดงกราฟที่พล็อตระหว่าง \log ของแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกกับ \log ของความถี่ของตัวอย่างที่มีความหนา 0.077 เซนติเมตร

เมื่อทราบค่า Characteristic frequency ก็สามารถหาค่าสภาพแพร่ทางความร้อนได้โดย

$$\alpha = l^2 f_c = (0.077 \text{ cm})^2 (6.23 \text{ Hz}) = 0.037 \text{ cm}^2 / \text{s}$$

$$\alpha = 3.7 \times 10^{-2} \text{ cm}^2 / \text{s}$$

4.2.3 ความหนา เท่ากับ 0.123 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ค่าความถี่ 4-40 เฮิร์ตซ์ ของตัวอย่างที่มีความหนา 0.123 เซนติเมตร

frequency (Hz)	Photoacoustic signal (μV)			
	1 st	2 nd	3 rd	Average
4	336.5	345.7	343.1	341.7667
5	317.5	317.6	329.2	321.4333
6	279.5	271.5	289	280.0000
7	237.6	235.5	247.6	240.2333
8	212.6	199	214.2	208.6000
9	182.3	174.3	185.3	180.6333
10	164.6	147.6	160.5	157.5667
11	144.1	136	136.8	138.9667
12	126.3	118.6	124.2	123.0333
13	115.6	111.2	110.2	112.3333
14	107.3	102.5	100.1	103.3000
15	98.2	94.5	92.6	95.1000
16	90	86.7	86.7	87.8000
17	85.1	81.1	83.2	83.1333
18	79.8	76.1	75.7	77.2000
19	76.5	72.5	71.7	73.5667
20	69.8	66.5	68.6	68.3000

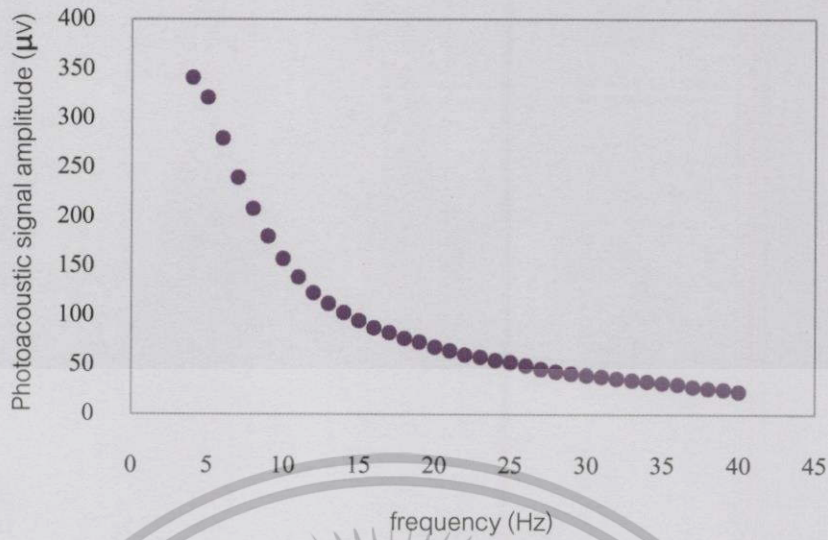
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ค่าความถี่ 4-40 เฮิร์ตซ์ ของตัวอย่างที่มีความหนา 0.123 เซนติเมตร (ต่อ)

frequency (Hz)	Photoacoustic signal (μV)			
	1 st	2 nd	3 rd	Average
21	65.7	63.6	64.8	64.7000
22	62.1	58.6	60.6	60.4333
23	59.6	57.6	57	58.0667
24	56.8	54.2	53.7	54.9000
25	54.8	52.5	51.7	53.0000
26	50.8	48	50	49.6000
27	45.7	45.5	47.3	46.1667
28	43.7	42.1	44.5	43.4333
29	42.7	41.2	41.1	41.6667
30	41.8	39.8	38.5	40.0333
31	39.8	38.5	37.2	38.5000
32	37.1	36.5	36.2	36.6000
33	36.3	33.7	35.1	35.0333
34	34.6	33.1	33.7	33.8000
35	32.2	31.8	32.5	32.1667
36	31.2	30.7	30.6	30.8333
37	29	28.2	27.6	28.2667
38	26.5	27.6	25.3	26.4667
39	25.8	26.2	24.6	25.5333
40	23.8	23.8	22.5	23.3667

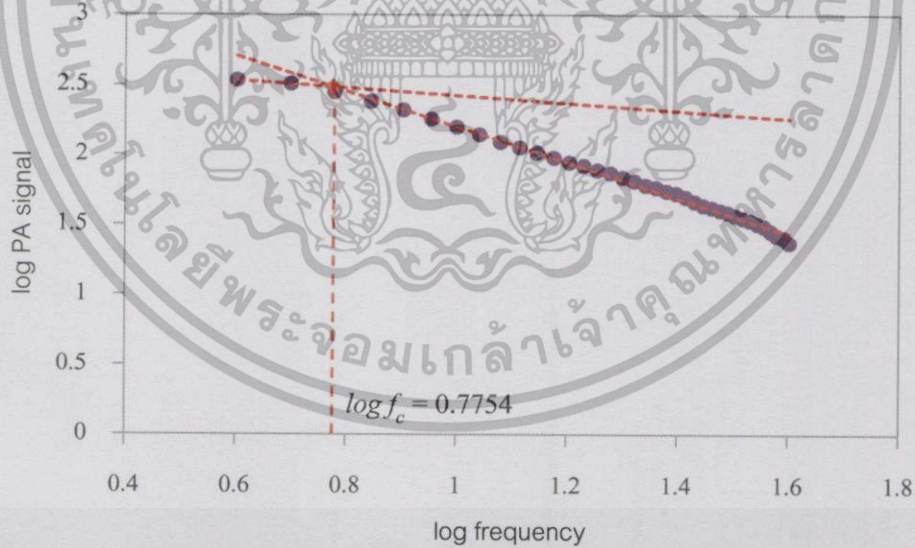
นำค่าเฉลี่ยแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกที่ได้ มาพล็อตเทียบกับค่าความถี่ของตัวตัดแสง เพื่อดูแนวโน้มของค่าที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แสดงกราฟที่พล็อตระหว่างค่าเฉลี่ยแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกกับความถี่ของตัวตัดแสง สำหรับตัวอย่างที่มีความหนา 0.123 เซนติเมตร

เมื่อได้ผลการทดลอง ทำการใส่ \log ลงไปเพื่อให้เห็นความชันที่แตกต่างกันของกราฟนี้อย่างชัดเจน แล้วนำกราฟนี้มาหาค่า Characteristic frequency (f_c) เพื่อนำไปหาค่าสภาพแพร่ทางความร้อนในลำดับต่อไป



รูปที่ 4.9 แสดงกราฟที่พล็อตระหว่าง \log ของแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติกกับ \log ของความถี่ของตัวอย่างที่มีความหนา 0.123 เซนติเมตร

เมื่อทราบค่า Characteristic frequency ก็สามารถหาค่าสภาพแพร่ทางความร้อนได้โดย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกงานชิ้นนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

$$\alpha = l^2 f_c = (0.123 \text{ cm})^2 (5.96 \text{ Hz}) = 0.09 \text{ cm}^2 / \text{s}$$

$$\alpha = 9.0 \times 10^{-2} \text{ cm}^2 / \text{s}$$

วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

5.1 การหาค่าช่องว่างพลังงาน (Energy gap, E_g) ของแคดเมียมซัลไฟด์

การหาค่าช่องว่างพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์โดยเทคนิคโฟโตอะคูสติกจากหัวข้อ 4.1 เรา จะเริ่มจากการหาสเปกตรัมโฟโตอะคูสติกของคาร์บอนแบล็คซึ่งเทียบได้กับสเปกตรัมการปลดปล่อย ของหลอดซินอน ในการหาสเปกตรัมการปลดปล่อยของหลอดซินอนก่อนก็เพื่อที่จะได้เห็นว่ สเปกตรัมของหลอดมีพีการปลดปล่อยตรงกับสเปกตรัมจากแหล่งอ้างอิงอื่นๆ หรือไม่ โดยสเปกตรัม ที่เราวัดได้พบว่าพีการปลดปล่อยของหลอดซินอนส่วนใหญ่มีลักษณะใกล้เคียงกับแหล่งอ้างอิงอื่นๆ แต่มีส่วนน้อยที่ลักษณะแตกต่างกัน อันเนื่องมาจากคุณภาพของหลอดที่ลดลงตามจำนวนชั่วโมงใน การใช้งาน จากนั้นเราจะทำการหาสเปกตรัมโฟโตอะคูสติกของแคดเมียมซัลไฟด์แล้วนำค่าสัญญาณ ของทั้งสองตัวอย่างมาทำการนอร์มอลไลซ์เพื่อที่จะได้เห็นบริเวณการดูดกลืน

จากรูปสเปกตรัมโฟโตอะคูสติกที่ผ่านการนอร์มอลไลซ์ เราจะเห็นได้ว่าช่วงแรกค่านอร์มอลไลซ์มีค่าค่อนข้างสูงจากนั้นค่านอร์มอลไลซ์จะลดลงตามความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น ซึ่งจากการเฉลี่ยค่านอร์มอลไลซ์บริเวณที่มีค่าสูงและบริเวณที่ค่านอร์มอลไลซ์มีลักษณะลดลง จะทำให้ได้จุดตัดของค่าเฉลี่ย จากกลุ่มข้อมูลทั้งสองที่จะแสดงถึงบริเวณที่เริ่มดูดกลืนโฟตอนของแคดเมียมซัลไฟด์ โดยมีค่าอยู่ที่ ความยาวคลื่น 515.75 นาโนเมตร หรือเทียบได้กับพลังงานของโฟตอนที่มีค่า 2.41 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าค่าช่องว่างพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์ที่เป็นตัวอย่างของเรามีค่าเท่ากับ 2.41 อิเล็กตรอนโวลต์ (ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลวิน) โดยแหล่งอ้างอิงอื่นๆระบุค่าช่องว่างพลังงาน ของแคดเมียมซัลไฟด์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลวินว่ามีค่าเท่ากับ 2.42 อิเล็กตรอนโวลต์ หาก เปรียบเทียบกับค่าที่เราได้จะพบว่ามีค่าแตกต่างกันน้อยมากซึ่งถือได้ว่าเทคนิคโฟโตอะคูสติกของ เรามีประสิทธิภาพพอในการหาค่าช่องว่างพลังงาน โดยค่าช่องว่างพลังงานที่หาได้นี้จะถูกนำไปใช้ใน การระบุค่าความยาวคลื่นที่ต้องใช้ในกระบวนการหาค่าสภาพแพร่ทางความร้อนในขั้นตอนต่อไป

5.2 การหาค่าสภาพแพร่ทางความร้อน (thermal diffusivity, α) ของแคดเมียมซัลไฟด์

การทดลองครั้งนี้เราทำการวัดค่าสภาพแพร่ทางความร้อน โดยใช้ค่าความยาวคลื่นที่มีค่าเท่ากับ 457.9 นาโนเมตร จากนั้นทำการเพิ่มค่าความถี่แล้วเก็บค่าแอมพลิจูดสัญญาณโฟโตอะคูสติก เมื่อนำมาคำนวณเป็นค่าพลังงาน ค่าพลังงานนี้จะมีค่าสูงกว่าค่าช่องว่างพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์ เราเปลี่ยนแปลงความหนาแล้ววัดค่าสภาพแพร่ความร้อนที่ความหนาต่างๆ ผลที่ได้คือ แคดเมียมซัลไฟด์ที่ความหนาเท่ากับ 0.042 เซนติเมตร, Characteristic frequency มีค่าเท่ากับ 6.45 เฮิร์ตซ์ ค่าสภาพแพร่ทางความร้อน เท่ากับ $1.1 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$, แคดเมียมซัลไฟด์ที่ความหนาเท่ากับ 0.077 เซนติเมตร, Characteristic frequency มีค่าเท่ากับ 6.23 เฮิร์ตซ์ ค่าสภาพแพร่ทางความร้อน เท่ากับ $3.7 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ และ แคดเมียมซัลไฟด์ที่ความหนาเท่ากับ 0.123 เซนติเมตร, Characteristic frequency มีค่าเท่ากับ 5.96 เฮิร์ตซ์ ค่าสภาพแพร่ทางความร้อน เท่ากับ

$9.0 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ จะพบว่าที่ความหนาเพิ่มขึ้น ค่าสภาพแพร่ทางความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นและ Characteristic frequency มีค่าลดลง

หากเปรียบเทียบค่าที่ได้กับค่าทฤษฎี (ค่าสภาพแพร่ทางความร้อนทางทฤษฎีของแคดเมียมซัลไฟด์มีค่าเท่ากับ $8.83 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$) ค่าที่ได้นั้นอยู่ในอเดอร์เดียวกันกับค่าทฤษฎี ซึ่งการทำการทดลองที่เกี่ยวกับงานทางด้านความร้อนนั้น เราจะทราบค่าที่แน่นอนและแม่นยำนั้นเป็นการทำได้ยาก จากการค้นคว้าข้อมูลทำให้เราพบว่าการหาค่าสภาพแพร่ทางความร้อนของแต่ละงานวิจัย ทำให้เราทราบว่ายังไม่มียานไหนที่สามารถบอกค่าได้เที่ยงตรงและแม่นยำ โดยเราอ้างอิงค่าทฤษฎีจากงานวิจัยของ M.L. Albor-Aguilera, M.A. González-Trujillo, A. Cruz-Orea และ M. Tufiño-Velázquez ในหัวข้อ Thermal and optical properties of polycrystalline CdS thin films deposited by the gradient recrystallization and growth (GREG) technique using photoacoustic methods นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ C. L. Cesar, H. Vargas, J. Mendes Filho และ L. C. M. Miranda ในหัวข้อ Photoacoustic determination of thermal diffusivity of solids: Application to CdS ซึ่งได้ค่าสภาพแพร่ทางความร้อนของแคดเมียมซัลไฟด์เท่ากับ $15 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ และยังมีงานวิจัยของ Zahrah EL-Qahtani, Ali Badawi, K. Easawi, N. Al-Hosiny และ S. Abdallah ในหัวข้อ Photoacoustic study of optical and thermal properties of alloyed $\text{CdTe}_x\text{S}_{1-x}$ nanocrystals ซึ่งได้ค่าสภาพแพร่ทางความร้อนของแคดเมียมซัลไฟด์เท่ากับ $25.2 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ แต่ละงานวิจัยก็มีค่าแตกต่างกันไป ดังที่กล่าวมาแล้ว

5.3 ปัญหาและข้อเสนอนแนะ

ควรศึกษาวิธีการใช้งานของระบบและอุปกรณ์ก่อนลงมือปฏิบัติงานจริง เพื่อเป็นการป้องกันความผิดพลาดในการใช้อุปกรณ์ซึ่งอาจนำไปสู่ความเสียหายของอุปกรณ์และระบบได้ อีกทั้งยังทำให้ผลที่ได้เป็นไปตามเงื่อนไขของการทดลอง เช่น แหล่งกำเนิดแสง (Xenon lamp) ควรเปิดแหล่งกำเนิดแสงทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที และควรเปลี่ยนหลอดใหม่เมื่อใช้ครบ 1000 ชั่วโมง เพื่อให้ได้สเปกตรัมที่ยังคงเป็นมาตรฐาน ชีตจำกัดของเครื่องมือมีผลอย่างมากกับการทดลองนี้ เช่น ค่าความถี่ต่ำสุดของตัวตัดแสงอยู่ที่ 4 เฮิรตซ์ และมีความละเอียดในหลักหน่วยเพียงเท่านั้น ดังนั้นควรหาตัวมอดูเลตแสงที่สามารถให้ค่าความถี่ต่ำกว่านี้และสามารถปรับความถี่ได้ละเอียดกว่าเพื่อให้ได้ค่าที่ความถี่ต่ำและได้ความละเอียดมากขึ้น การเก็บข้อมูลจากเครื่องขยายสัญญาณคืออินในแต่ละครั้งใช้เวลาค่อนข้างนาน ฉะนั้นเพื่อความสะดวกและรวดเร็วควรหาอุปกรณ์ในการเก็บข้อมูลมาช่วยเก็บค่าข้อมูลสายโคแอกเซียลที่ใช้ควรมีค่าอิมพีแดนซ์ของสายเท่ากับค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของเครื่องขยายสัญญาณคืออินเพื่อป้องกันการสูญเสียของสัญญาณ การสั้นสะพานของบริเวณที่ใช้ทำการทดลอง อาจก่อความระบอบการวัดได้ ดังนั้นควรใช้โต๊ะที่มีความแข็งแรงในการวางอุปกรณ์ ในส่วนของระบบอัดสารควรใช้บล็อกอัดสารที่ทำมาจากวัสดุที่แข็งแรงสามารถทนต่อแรงอัดได้สูง เช่น เหล็ก ไม่ควรใช้อลูมิเนียมชุบแข็งเพราะมีความแข็งแรงไม่เพียงพอกับระบบอัดดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] C. L. Cesar, H. Vargas, J. Mendes Filho, and L. C. M. Miranda. Photoacoustic determination of thermal diffusivity of solids: Application to CdS. Applied Physics Letters; 1983(Lett.43): 555.

[2] Wicharn Techitdheera, and Wisanu Pecharapa. Energy Gap of CdS by Photoacoustic Spectroscopy. KMITL Sci. Tech. J.; 2009(Vol. 9): 2.

[3] DARRYL ALMOND, and PRAVIN PATEL. Photothermal Science and Techniques. London : CHAPMAN & HALL, 1996.

[4] J.P. HOLMAN. HEAT TRANSFER. Sixth Edition. New York : McGraw-Hill Book Company, 1986.

[5] Douglas A. Skoog, F. James Holler, and Stanley R. Crouch. Principles of Instrumental Analysis. Sixth Edition. Belmont : THOMSON BROOKS/COLE, 2007.

[6] รศ.ดร. วราวุฒิ เถาลัดดา. Optoelectronics. สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น "ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้"