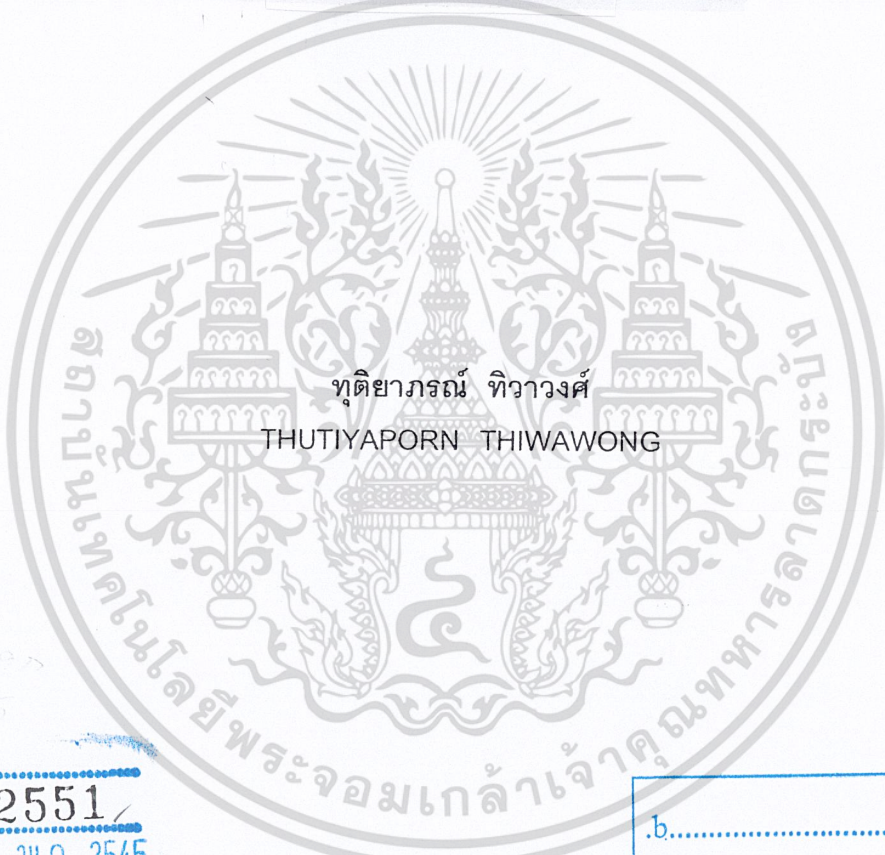


การสร้างต้นแบบของระบบวัดโฟโตรีเฟล็กแทนซ์สเปกโทรสโกปีสำหรับ  
สารกึ่งตัวนำแกเลเลียมอาร์เซไนด์

PROTOTYPE OF PHOTOREFLECTANCE SPECTROSCOPY  
MEASUREMENT SYSTEM FOR GaAs SEMICONDUCTOR



ทุติยาภรณ์ ทิววงศ์  
THUTIYAPORN THIWAWONG



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 42551  
วัน, เดือน, ปี 3 1 พ.ศ. 2545

b.....  
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2545

ISBN 974-648-568-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

*[Handwritten signature]*

PROTOTYPE OF PHOTOREFLECTANCE SPECTROSCOPY  
MEASUREMENT SYSTEM FOR GaAs SEMICONDUCTOR



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE  
OF MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2002  
ISBN 974-648-568-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การสร้างต้นแบบของระบบวัดโพโตรีเฟลกแทนซ์สเปกโทรสโกปีสำหรับ  
สารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนต์  
PROTOTYPE OF PHOTOREFLECTANCE SPECTROSCOPY  
MEASUREMENT SYSTEM FOR GaAs SEMICONDUCTOR

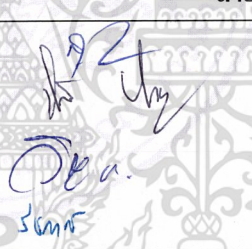
ชื่อนักศึกษา นางสาวศุติยาภรณ์ ทิววงศ์

รหัสประจำตัว 41065007

ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.จิติ หนูแก้ว

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.สุวรรณ	คุณ้ำารณู	
ผศ.ดร.จิติ	หนูแก้ว	
ผศ.วิชาญ	เตชิตธิระ	
ดร.รัชภักย์	จิตต์อารี	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 20 ธันวาคม 2544 เวลา 16.00 น. เป็นต้นไป

สถานที่สอบ ณ อาคารจุฬารามวลัยลักษณ์ 1 ชั้น 3 ห้อง 307



วันที่ 14 เดือน มกราคม พ.ศ. 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสร้างต้นแบบของระบบวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์สเปกโทรสโกปีสำหรับสารกึ่งตัวนำแกเลียมอาร์เซไนด์
นักศึกษา	นางสาวหุติยาภรณ์ ทิวาวงศ์
รหัสประจำตัว	41065007
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.จิติ หนูแก้ว

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการสร้างต้นแบบของระบบวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์สเปกโทรสโกปี ที่อุณหภูมิห้อง สำหรับศึกษาโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำแกเลียมอาร์เซไนด์ ระบบนี้จะติดตั้งบนโต๊ะแสงโดยมีแสงเลเซอร์จากฮีเลียมนีออนใช้ในการมอดูเลต ส่งผ่านตัวตัดแสงไปยังแผ่นฟิล์มสารกึ่งตัวนำแกเลียมอาร์เซไนด์ ทำการแยกแสงจากหลอดไฟทั้งสแตนด์บายเป็นแสงที่มีความยาวคลื่น 700 ถึง 1300 นาโนเมตร โดยโมโนโครเมเตอร์และผ่านไปตามกระทบแผ่นฟิล์มสารกึ่งตัวนำแล้ววัดแสงที่สะท้อนกลับด้วยตัวตรวจวัดซึ่งต่อเข้ากับเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน สัญญาณที่วัดได้มี 2 ส่วน คือ สัญญาณ a.c. ที่มีความสัมพันธ์กับค่าการเปลี่ยนแปลงรีเฟลกติวิตี (reflectivity  $\Delta R$ ) และสัญญาณ d.c. ที่มีความสัมพันธ์กับค่ารีเฟลกติวิตี (reflectivity  $R$ ) ทั้งนี้คอมพิวเตอร์ถูกใช้ทำการควบคุมระบบและเก็บข้อมูล พร้อมทั้งหาค่าสเปกตรัมของ  $\Delta R/R$  กับพลังงานโฟตอน ที่อุณหภูมิห้องสารกึ่งตัวนำแกเลียมอาร์เซไนด์มีค่าแถบพลังงานต้องห้าม  $1.42 \pm 0.01$  อิเล็กตรอนโวลต์ และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าของแถบพลังงานต้องห้ามลดลง สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจากสมการของ Varshni  $E(T) = E_0 - \alpha T^2 / (\beta + T)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Prototype of Photoreflectance Spectroscopy Measurement System for GaAs Semiconductor
Student	Ms. Thutiyaporn Thiwawong
Student ID.	41065007
Degree	Master of science
Programme	Applied Physic
Year	2002
Thesis Advisor	Assist.Prof.Dr. Jiti Nukeaw

### ABSTRACT

The objective of this research is to construct the prototype of room-temperature photoreflectance (PR) spectroscopy measurement system for studying the energy band structures of GaAs semiconductor. The system is set up on an optical table and modulation light is provided by He-Ne laser. The chopped laser light is irradiated onto GaAs sample. Light from a tungsten lamp passed through a monochromator, acts as a probe light. The reflected probe light from the sample is detected for each wavelength from 700 nm to 1300 nm. The detected signal has two parts: The ac part measured by the lock-in amplifier synchronizing to the modulating frequency is related to the change in reflectivity,  $\Delta R$ , while its dc part is related to the reflectivity,  $R$ . Using a computer for control system and data acquisition, a spectrum of  $\Delta R/R$  versus photon energy can be obtained. The band gap of GaAs was about  $1.42 \pm 0.01$  eV at room temperature. The band gap of GaAs decreases with increasing temperature. The Varshni thermal coefficient has been determined from the Varshni empirical equation

$$E(T) = E_0 - \alpha T^2 / (\beta + T)$$

## กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยความสามารถของ ผศ.ดร. จิติ หนูแก้ว ที่ได้ให้คำปรึกษาทางด้านหลักการและทฤษฎีต่างๆตลอดจนช่วยแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในขณะทำงานวิจัยนี้อย่างใกล้ชิด ซึ่งผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์และกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณสมาชิก Quantum and Optical Semiconductors Research Laboratory ซึ่งคอยให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำต่างๆแก่ผู้วิจัยตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติพี่น้องที่คอยให้กำลังใจตลอดเวลาจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้ ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

สุดท้ายนี้คุณค่าและประโยชน์อันได้มาจากการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแต่ บิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่าน

ทิตยาภรณ์ ทิวาวงศ์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 การดำเนินงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	3
2.1 โครงสร้างผลึกสารกึ่งตัวนำ.....	3
2.2 ทฤษฎีโครงสร้างแถบพลังงานสารกึ่งตัวนำ.....	5
2.3 กระบวนการเกิดและกระบวนการรวมตัวใหม่.....	11
2.4 สมบัติที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์.....	13
2.5 หลักการมอดูเลชันสเปกโทรสโกปี.....	13
2.6 ทฤษฎีเกี่ยวกับโฟโตรีเฟลกแทนซ์สเปกโทรสโกปี.....	15
2.6.1 สเปกตรัมรีเฟลกแทนซ์ที่มอดูเลตและฟังก์ชันไดอิเล็กตริก.....	15
2.6.2 การแสดงความหมายโดยทั่วไปของฟังก์ชันไดอิเล็กตริก.....	16
2.6.3 ฟังก์ชันไดอิเล็กตริกที่มอดูเลต.....	20
2.6.4 ฟังก์ชันรูปทรงเส้นของโฟโตรีเฟลกแทนซ์.....	22
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	24
3.1 การสร้างระบบวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์สเปกโทรสโกปี.....	24
3.1.1 หลักการของระบบวัด.....	24
3.1.2 องค์ประกอบของระบบวัด.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2 การสร้างโปรแกรมควบคุมระบบวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์สเปกโทรสโกปี.....	32
3.3 การสร้างโปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ.....	38
3.4 การวัดสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์.....	40
3.4.1 การวัดสเปกตรัมการสะท้อนของแสงของสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์และซีลีเนียม.....	40
3.4.2 การวัดสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์สารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์.....	41
3.4.3 การวัดสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์สารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์ในกรณีที่เปลี่ยนความถี่ของตัวตัดแสง.....	41
3.4.4 การวัดสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์สารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์ในกรณีที่เปลี่ยนความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์.....	41
3.4.5 การวัดสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์สารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์ในกรณีที่เปลี่ยนความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์.....	42
3.4.6 การวัดสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์สารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่มุมระหว่างแนวแสงตกกระทบกับแนวแสงสะท้อนต่างๆ.....	42
3.4.7 การวัดสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์สารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	43
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	45
4.1 ผลการทดลองการวัดสเปกตรัมการสะท้อนของแสงของสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์และซีลีเนียม.....	45
4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลจากสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์สารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์.....	46
4.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลการวัดสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์สารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์ในกรณีที่เปลี่ยนความถี่ของตัวตัดแสง.....	48
4.4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลการวัดสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์สารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์ในกรณีที่เปลี่ยนความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์.....	53

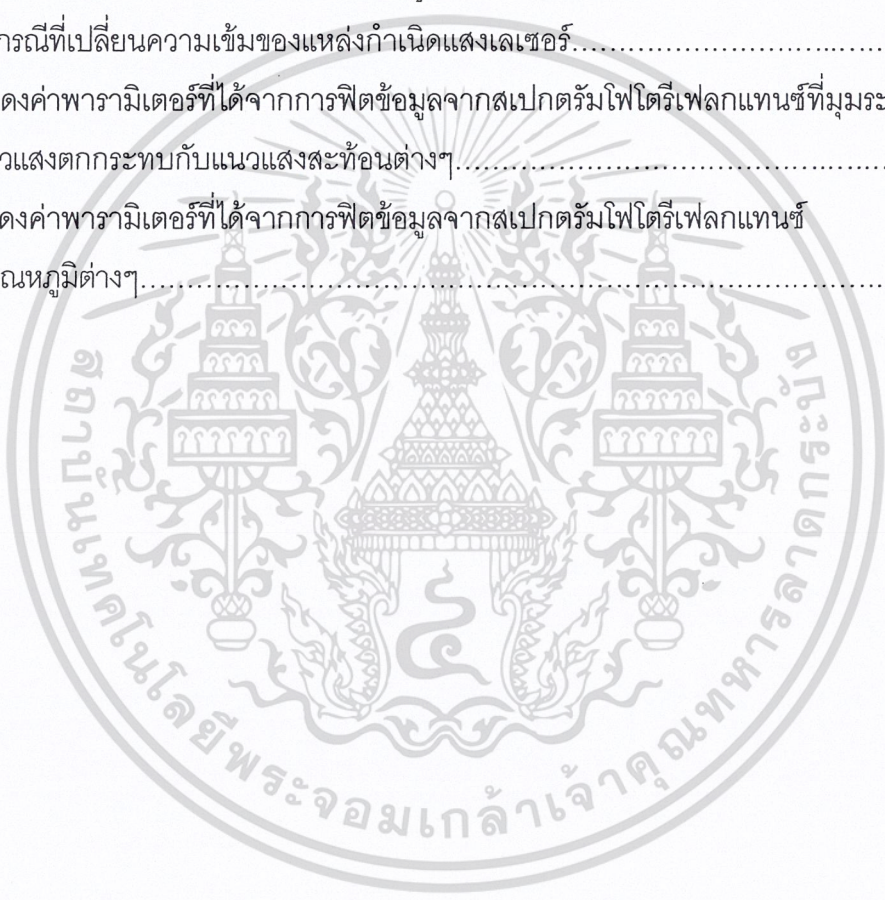
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลการวัดสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ สารกึ่งตัวนำแกเลียมอาร์เซไนด์ในกรณีที่เปลี่ยนความความเข้มแสงของ แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์.....	55
4.6 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลการวัดสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ สารกึ่งตัวนำแกเลียมอาร์เซไนด์ที่มุมระหว่างแนวแสงตกกระทบกับแนวแสงสะท้อน ต่างๆ.....	57
4.7 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลการวัดสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ สารกึ่งตัวนำแกเลียมอาร์เซไนด์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	59
4.8 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	64
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	65
เอกสารอ้างอิง.....	67
ประวัติผู้เขียน.....	69

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการฟิตข้อมูลจากสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ ในกรณีที่เปลี่ยนความถี่ของตัวตัดแสง.....	50
4.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการฟิตข้อมูลจากสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ ในกรณีที่เปลี่ยนความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์.....	54
4.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการฟิตข้อมูลจากสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ ในกรณีที่เปลี่ยนความเข้มของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์.....	56
4.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการฟิตข้อมูลจากสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ที่มุมระหว่าง แนวแสงตกกระทบกับแนวแสงสะท้อนต่างๆ.....	58
4.5 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการฟิตข้อมูลจากสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	61



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างผลึกแบบเพชร.....	4
2.2 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์.....	5
2.3 บริลลันโซนของโครงสร้างผลึกเฟสเซนเตอร์.....	6
2.4 บริลลันโซนของโครงสร้างผลึกบอดีเซนเตอร์.....	7
2.5 เปรียบเทียบบริลลันโซนที่ลำดับต่างกันของอลูมิเนียม.....	7
2.6 บริลลันโซนในกรณีสองมิติของโครงสร้างผลึกแบบเฟสเซนเตอร์.....	8
2.7 ผลของบริลลันโซนที่เป็นแบบหนึ่งมิติของโครงสร้างผลึกแบบเฟสเซนเตอร์.....	8
2.8 โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำเจอร์มาเนียมและซิลิกอน.....	10
2.9 โครงสร้างแถบพลังงานของแกลเลียมอาร์เซไนด์.....	11
2.10 กระบวนการเกิดและกระบวนการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอน-โฮล.....	11
2.11 การใช้โฟตอนกระตุ้นเพื่อให้เกิดคู่ของอิเล็กตรอน-โฮล.....	12
2.12 โครงสร้างผลึกของแกลเลียมอาร์เซไนด์.....	13
2.13 รูปแบบของการมอดูเลตภายนอก.....	14
3.1 แสดงระบบวัตไฟไดร์เฟลกแทนซ์สเปกโทรสโกปี.....	24
3.2 การใช้แสงที่ผ่านจากตัวตัดแสงไปกระตุ้นให้เกิดกระบวนการเกิดและกระบวนการรวมตัวใหม่.....	25
3.3 ไดอะแกรมของโมโนโครเมเตอร์.....	26
3.4 สัญญาณเมื่อผ่านตัวตัดแสง.....	27
3.5 ไดอะแกรมของเครื่องขยายสัญญาณแบบลือคอินรุ่น SR510.....	28
3.6 เครื่องขยายสัญญาณแบบลือคอินในระบบวัด.....	29
3.7 สเตปป์มอเตอร์ในระบบวัด.....	29
3.8 ไมโครคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมการทำงานของระบบวัด.....	30
3.9 ระบบวัตไฟไดร์เฟลกแทนซ์สเปกโทรสโกปี.....	31
3.10 ผังการทำงานของโปรแกรมหลัก.....	33
3.11 ผังการทำงานของโปรแกรมป้อนค่าพารามิเตอร์.....	34
3.12 ผังการทำงานของโปรแกรมการวัด.....	35
3.13 ผังการทำงานของโปรแกรมการพลอตกราฟ.....	36
3.14 เมนูหลักของโปรแกรม.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.15 ส่วนของการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ.....	37
3.16 ส่วนของการพลอตกราฟ.....	38
3.17 ผังการทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูล.....	39
3.18 แสดงระบบวัดการสะท้อนของแสง.....	40
3.19 แสดงการกำหนดมุมระหว่างแนวแสงตกกระทบกับแนวแสงสะท้อนในระบบวัด.....	42
3.20 แสดงการควบคุมอุณหภูมิที่ให้แก่สารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์.....	43
4.1 สเปกตรัมการสะท้อนของแสงของสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์และซิลิเนียม.....	45
4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $R$ และ $\Delta R$ กับค่าพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์.....	47
4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\Delta R}{R}$ กับค่าพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์.....	47
4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\Delta R}{R}$ กับค่าพลังงานโฟตอนในกรณีที่เปลี่ยนความถี่ตัวตัดแสง.....	48
4.5 แสดงการฟิตข้อมูลจากสเปกตรัมในกรณีที่เปลี่ยนความถี่ตัวตัดแสง.....	49
4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของแถบพลังงานต้องห้ามกับความถี่ของตัวตัดแสง.....	51
4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ความกว้างกับความถี่ของตัวตัดแสง.....	51
4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์เฟสกับความถี่ของตัวตัดแสง.....	52
4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดกับความถี่ของตัวตัดแสง.....	52
4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\Delta R}{R}$ กับค่าพลังงานโฟตอนในกรณีที่เปลี่ยนความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์.....	53
4.11 แสดงการฟิตข้อมูลจากสเปกตรัมในกรณีที่เปลี่ยนความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์.....	54
4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\Delta R}{R}$ กับค่าพลังงานโฟตอนในกรณีที่เปลี่ยนความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์.....	55

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 แสดงการฟิตข้อมูลจากสเปกตรัมในกรณีที่เปลี่ยนความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์.....	56
4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\Delta R}{R}$ กับค่าพลังงานโฟตอนที่มุมระหว่างแนวแสงตกกระทบกับแนวแสงสะท้อนต่างๆ.....	57
4.15 แสดงการฟิตข้อมูลจากสเปกตรัมที่มุมระหว่างแนวแสงตกกระทบกับแนวแสงสะท้อนต่างๆ.....	58
4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\Delta R}{R}$ กับค่าพลังงานโฟตอนที่อุณหภูมิต่างๆ.....	59
4.17 แสดงการฟิตข้อมูลจากสเปกตรัมที่อุณหภูมิต่างๆ.....	61
4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของแถบพลังงานต้องห้ามกับอุณหภูมิ.....	61
4.19 แสดงการฟิตข้อมูลจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าของแถบพลังงานต้องห้ามกับอุณหภูมิ.....	63
4.20 แสดงค่าจากสมการ Varshni Empirical Equation และจากการทดลอง.....	63

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในการพัฒนาและประยุกต์ทำสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีคุณภาพสูง โดยปลูกผลึกด้วยวิธี molecular beam epitaxy (MBE) และ organometallic vapor phase epitaxy (OMVPE) เพื่อทำโครงสร้างสารกึ่งตัวนำใหม่ อาทิเช่น super lattice (SL), single quantum well (SQW) และ multi quantum well (MQW) นั้น ปัจจุบันได้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวางเพื่อผลิตเป็นสิ่งประดิษฐ์ใหม่ขึ้นในอุตสาหกรรม ตัวอย่างเช่น การผลิตแสงเลเซอร์จากสารกึ่งตัวนำโครงสร้างบ่อควอนตัม เป็นต้น

การตรวจสอบคุณสมบัติเฉพาะของสารกึ่งตัวนำนั้นเพื่อป้องกันข้อผิดพลาดในการปลูกผลึกให้มีคุณภาพดีขึ้น มีวิธีการหลายวิธีขึ้นอยู่กับคุณสมบัติที่ต้องการตรวจสอบ เช่น วิธีกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (scanning electron microscope : SEM), กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบลำอิเล็กตรอนผ่าน (transmission electron microscope : TEM) ฯลฯ ซึ่งวิธีต่างๆ เหล่านี้ในปัจจุบันมีเครื่องมือที่ถูกสร้างขึ้นมาใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยมีประสิทธิภาพการใช้งานที่แตกต่างกัน และมีราคาค่อนข้างสูง

ในปี ค.ศ. 1985 มีรายงานวิจัยกล่าวถึงการใช้วิธีโฟโตรีเฟลคแทนซ์สเปกโทรสโกปี (Photo-reflectance spectroscopy) ในการศึกษาโครงสร้างแถบพลังงาน (band-energy structure) ของสารกึ่งตัวนำและสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโครงสร้างที่แตกต่างกัน [1] จนมาถึงปัจจุบันพบว่ามีการวิจัยมากกว่า 200 เรื่องที่ใช้เทคนิคการวัดนี้ การศึกษาโดยวิธีนี้ในปัจจุบันได้รับการยอมรับว่าสามารถศึกษาโครงสร้างแถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำและสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งระบบนี้มีประโยชน์อย่างมากในการตรวจสอบคุณภาพของการปลูกผลึกในโครงสร้างระดับไมโครและนาโน

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อสร้างระบบวัดโฟโตรีเฟลคแทนซ์สเปกโทรสโกปี
- 1.2.2 เพื่อวิเคราะห์หาค่าแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ
- 1.2.3 เพื่อศึกษาถึงผลกระทบอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในระบบวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 การดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยในเรื่องของการสร้างระบบวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์สเปกโทรสโกปีเริ่มต้นด้วยการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีเกี่ยวกับหลักการของมอดูเลชันสเปกโทรสโกปีและองค์ประกอบของระบบวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์สเปกโทรสโกปี จากนั้นทำการสร้างระบบวัดและทำการทดลองกับสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) โดยผลการทดลองที่ได้คือเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่ารีเฟลกติวิตี (reflectivity,  $\Delta R/R$ ) ของสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์ จากนั้นทดลองวัดสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์โดยเป็นผลเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความถี่ของตัวตัดแสง และเปรียบเทียบสเปกตรัมของผลการทดลองที่ได้ ซึ่งพบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงทางแอมพลิจูด (amplitude) ต่อจากนั้นทดลองวัดสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์โดยเป็นผลเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ จากนั้นทดลองเปลี่ยนความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่ความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร และทดลองเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างแนวแสงตกกระทบกับแนวแสงสะท้อน จากผลการทดลองทั้งหมดทำให้ทราบถึงเงื่อนไขอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ในระบบวัด เช่น ตัวตัดแสง แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ ความเข้มของแสงเลเซอร์ มุมระหว่างแนวแสงตกกระทบกับแนวแสงสะท้อน ว่ามีผลอย่างไรต่อสเปกตรัมของการเปลี่ยนแปลงของรีเฟลกติวิตี ทำยสุดสามารถเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมต่อระบบวัดและสามารถหาค่าของแถบพลังงานต้องห้ามของสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์ได้จากการฟิตข้อมูลสเปกตรัมของการเปลี่ยนแปลงของรีเฟลกติวิตีได้ จากนั้นทดลองวัดสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิห้องถึง 360 เคลวิน เพื่อศึกษาถึงผลของอุณหภูมิต่อค่าของแถบพลังงานต้องห้ามของสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์ และทำการฟิตข้อมูลเพื่อหาสัมประสิทธิ์อุณหภูมิในสมการของ Varshni

### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

- 1.4.1 ทำให้ทราบถึงหลักการของมอดูเลชันสเปกโทรสโกปีที่ประยุกต์ใช้ในระบบวัดนี้
- 1.4.2 ทำให้ได้ต้นแบบของระบบวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์สเปกโทรสโกปีที่สามารถใช้งานได้จริงในห้องปฏิบัติการวิจัยสารกึ่งตัวนำ
- 1.4.3 สามารถนำระบบวัดนี้ไปใช้วิเคราะห์หาค่าของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำได้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการพื้นฐาน

### 2.1 โครงสร้างผลึกสารกึ่งตัวนำ

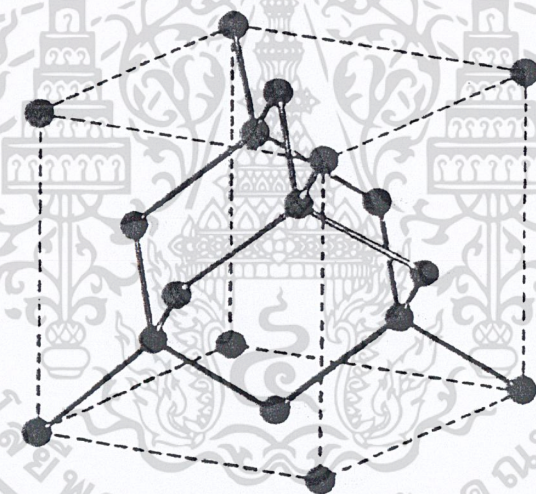
เมื่ออะตอมหลายอะตอมอาจจะจะเป็นอะตอมของธาตุชนิดเดียวกันหรืออะตอมของธาตุต่างชนิดกันก็ตามมาอยู่ใกล้ชิดกัน อะตอมดังกล่าวจะเข้ายึดเกาะเกี่ยวซึ่งกันและกันเพื่อความมั่นคงของอะตอม การเกาะเกี่ยวกับระหว่างอะตอมนี้เรียกว่า บอนด์ (bond) ซึ่งบอนด์ดังกล่าวนี้จะเกิดขึ้นระหว่างอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกัน กลไกในการเกาะเกี่ยวหรือการเกิดบอนด์นี้มีอยู่หลายชนิด แต่จะกล่าวถึงเฉพาะบอนด์ที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำโดยทั่วไปเท่านั้น

ในสารกึ่งตัวนำเมื่ออะตอมต่างๆ เข้ามาอยู่ใกล้ชิดกัน จะทำให้วงโคจรชั้นนอกสุดของแต่ละอะตอมเดิมทับซ้อนกัน อันจะทำให้เกิดบอนด์แบบที่เรียกว่า โควาเลนต์บอนด์ (covalence bond) โดยที่อะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันจะใช้อิเล็กตรอนร่วมกันเพื่อให้อะตอมอยู่ในภาวะที่มั่นคง ตัวอย่างของอะตอมซึ่งมีการเกาะเกี่ยวกันด้วยบอนด์แบบนี้ก็คือ โมเลกุลของไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากอะตอมไฮโดรเจนมาเกาะเกี่ยวกันแต่ละอะตอมจะมีอิเล็กตรอนอยู่หนึ่งตัว ดังนั้นขณะที่อะตอมอยู่เดี่ยวๆ แต่ละอะตอมจะยังไม่มั่นคง กล่าวคือยังขาดหรือต้องการอิเล็กตรอนอีกหนึ่งตัวเพื่อทำให้อะตอมมั่นคง ดังนั้นเมื่ออะตอมสองอะตอมของไฮโดรเจนเข้ามาใกล้กัน วงโคจรชั้นนอกก็จะทับซ้อนกัน อิเล็กตรอนซึ่งมีการหมุนต่างกันก็จะดึงดูดซึ่งกันและกันทำให้เกิดบอนด์ขึ้นสำหรับอิเล็กตรอนที่มีการหมุนที่เหมือนกันจะไม่สามารถอยู่ร่วมในบอนด์เดียวกันได้ ทั้งนี้เพราะเป็นการขัดแย้งกับกฎการกีดกันของเพาวลี ดังนั้นในโมเลกุลของไฮโดรเจนอิเล็กตรอนจะถูกใช้ร่วมกันระหว่างอะตอมทั้งสอง และเนื่องจากโมเลกุลของไฮโดรเจนเป็นโมเลกุลชนิดสมมาตร กล่าวคืออิเล็กตรอนแต่ละตัวจะมีฟังก์ชันคลื่นที่เหมือนกัน ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนสองตัวมาอยู่ร่วมกันจึงสามารถเป็นได้ทั้งกรณีสมมาตรหรือไม่สมมาตร และเมื่อนำสมการของชเรอดิงเงอร์มาแก้ปัญหาดังกล่าวนี้จะพบว่า  $|\Psi|^2$  จะมีค่าสูงสุดบริเวณกึ่งกลางระหว่างนิวเคลียสของอะตอมทั้งสอง นั่นก็คือมีโอกาสอย่างมากที่อิเล็กตรอนทั้งสองจะอยู่ตรงบริเวณนี้

สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างคล้ายเพชร อะตอมจะมีการจัดเรียงตัวแบบพันธะเชิงสี่ ซึ่งจากการจำแนกชนิดสารกึ่งตัวนำที่เป็นธาตุเดี่ยวจึงได้โครงสร้างผลึกที่มีรูปร่างแตกต่างกันออกไปโดยจำแนกได้ดังนี้

#### 1. โครงสร้างผลึกแบบเพชร (diamond structure)

โครงสร้างแบบเพชรนี้เกิดจากการนำโครงสร้างผลึกแบบกึ่งกลางผิวหน้าลูกบาศก์ (face-centered cubic lattice) 2 หน่วยเซลล์ มาวางเรียงซ้อนกันให้เหลื่อมกันเป็นระยะทาง  $\frac{1}{4}$  ตามแนวเส้นทแยงมุมดังรูปที่ 2.1 อะตอมในแต่ละหน่วยเซลล์เป็นชนิดเดียวกันซึ่งในหนึ่งหน่วยเซลล์ของโครงสร้างผลึกแบบเพชรมีจำนวนอะตอมทั้งหมด 8 อะตอม อยู่ที่ตำแหน่ง  $0\ 0\ 0$ ,  $0\ \frac{1}{2}\ \frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{2}\ 0\ \frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{2}\ \frac{1}{2}\ 0$ ,  $\frac{1}{4}\ \frac{1}{4}\ \frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{4}\ \frac{3}{4}\ \frac{3}{4}$ ,  $\frac{3}{4}\ \frac{1}{4}\ \frac{3}{4}$ ,  $\frac{3}{4}\ \frac{3}{4}\ \frac{1}{4}$  โดยที่อะตอมหนึ่งๆ จะมีอะตอมข้างเคียงกันเป็นอะตอมชนิดเดียวกัน 4 ตัวจับกันในแต่ละแขนของพันธะเชิงสี่หน้าจึงให้แรงดึงเท่ากันหมดทุกทิศทาง โครงสร้างผลึกจึงมีสมมาตรมากที่สุด ซึ่งสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบนี้คือผลึกของธาตุในกลุ่ม IV ได้แก่ C, Si, Ge, Sn



รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกแบบเพชร

#### 2. โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (zincblend structure)

โครงสร้างผลึกแบบนี้เกิดจากการนำโครงสร้างผลึกแบบกึ่งกลางผิวหน้าลูกบาศก์ที่มีอะตอมต่างชนิดกันมาซ้อนกันในแบบเดียวกับโครงสร้างแบบเพชร ซึ่งผลึกที่มีโครงสร้างแบบนี้ได้แก่ ผลึกกึ่งตัวนำของสารประกอบเชิงคู่ ในกลุ่ม II-VI และ III-V ดังนั้นในหนึ่งหน่วยเซลล์ของโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์จะมีอะตอมอยู่สองชนิด แต่ละชนิดมี 4 อะตอม ตัวอย่างเช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์ ดังรูปที่ 2.2 มีตำแหน่งของอะตอมดังนี้

อะตอม Ga อยู่ที่  $0\ 0\ 0, 0\ \frac{1}{2}\ \frac{1}{2}, \frac{1}{2}\ 0\ \frac{1}{2}, \frac{1}{2}\ \frac{1}{2}\ 0$

อะตอม As อยู่ที่  $\frac{1}{4}\ \frac{1}{4}\ \frac{1}{4}, \frac{1}{4}\ \frac{3}{4}\ \frac{3}{4}, \frac{3}{4}\ \frac{1}{4}\ \frac{3}{4}, \frac{3}{4}\ \frac{3}{4}\ \frac{1}{4}$

โดยที่อะตอมของ Ga จะมีอะตอมของ As จับอยู่ 4 อะตอม

และอะตอมของ As จะมีอะตอมของ Ga จับอยู่ 4 อะตอม

ดังนั้นโครงสร้างผลึกแบบนี้จึงมีสมมาตรน้อยกว่าโครงสร้างผลึกแบบเพชร



รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์

## 2.2 โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ (Band Structure)

ในวัสดุสารกึ่งตัวนำจะมีแถบพลังงานที่น่าสนใจอยู่สองแถบด้วยกันคือแถบวาเลนซ์ (Valence band) และแถบความนำ (Conduction band) ในช่องว่างแถบพลังงานทั้งสองนี้จะเรียกว่าแถบต้องห้าม (Band gap) หรือ  $E_g$  (Energy gap) กันอยู่ ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน แถบวาเลนซ์จะมีอิเล็กตรอนอยู่อย่างมากมาเติมทุกสถานะของพลังงาน ดังนั้นแถบวาเลนซ์นี้จึงถูกเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า แถบเต็ม (Full band) ส่วนแถบความนำจะว่างเปล่าไม่มีอิเล็กตรอนอยู่เลยจะถูกเรียกว่า แถบว่าง (Empty band) [2]

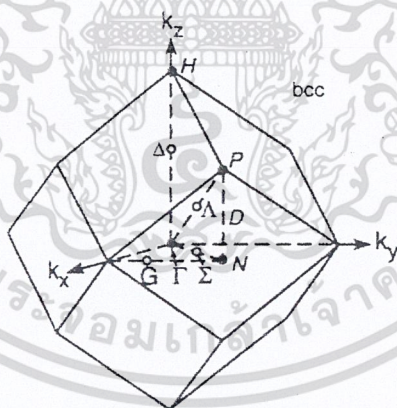
แถบพลังงานของของแข็งคือ ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน  $E$  กับเวกเตอร์คลื่น (wave-vector)  $k$  อาจคำนวณได้จากสมการชเรอดิงเงอร์ (Schrodinger) โดยเป็นการคำนวณแบบประมาณของอิเล็กตรอนตัวเดียวซึ่งอาศัยทฤษฎีของบล็อคและแบบจำลองของโคโรนิกและเพนนี่ จากความสัมพันธ์ระหว่าง  $E$  กับ  $k$  ที่  $k$  ค่าต่างๆ จะเหมือนกันในโซนแรกของบริลลันโซน (1-st

Brillouin Zone) ตามคุณสมบัติสมมาตรในผลึก ดังนั้นการเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง  $E$  กับ  $k$  จึงอยู่ในโซนแรกเท่านั้น

เมื่อพิจารณาโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์ (face-center cubic) และบอดีเซนเตอร์ (body-center cubic) ซึ่งถ้าพิจารณาถึงบริลลันโซน (Brillouin zone) จะพบว่า[3]

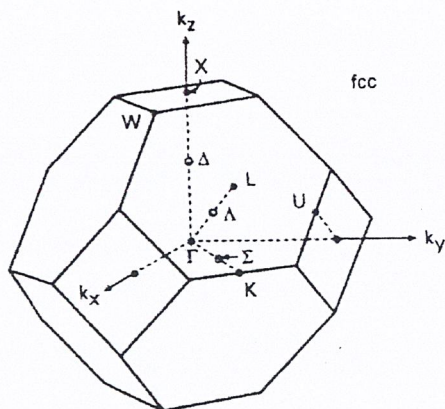
$$\begin{array}{l} \text{โซนลำดับที่ 1} \\ \text{โซนลำดับที่ 2} \\ \text{โซนลำดับที่ } n \end{array} \quad \begin{array}{l} -\frac{\pi}{a} \text{ ถึง } \frac{\pi}{a} \\ -\frac{2\pi}{a} \text{ ถึง } -\frac{\pi}{a} \text{ และ } \frac{\pi}{a} \text{ ถึง } \frac{2\pi}{a} \\ -\frac{n\pi}{a} \text{ ถึง } -\frac{(n-1)\pi}{a} \text{ และ } \frac{(n-1)\pi}{a} \text{ ถึง } \frac{n\pi}{a} \end{array}$$

ซึ่งในโซนลำดับที่ 1 โครงสร้างผลึกเฟซเซนเตอร์ มีรูปร่างตามรูปที่ 2.3 และโครงสร้างผลึกบอดีเซนเตอร์ มีรูปร่างตามรูปที่ 2.4 ซึ่งในแต่ละโซนนั้นมีผลทำให้รูปร่างที่พิจารณานั้นเปลี่ยนไปดังแสดงในรูปที่ 2.5 เป็นการเปรียบเทียบ โซนลำดับที่ 1 โซนลำดับที่ 2 โซนลำดับที่ 3 และ โซนลำดับที่ 4 ของโลหะอลูมิเนียมซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์

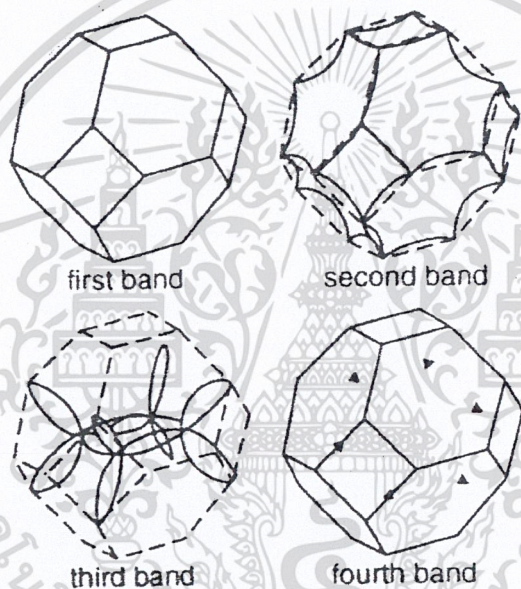


รูปที่ 2.3 บริลลันโซนของโครงสร้างผลึกเฟซเซนเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 Brillouin zone ของโครงสร้างผลึกบอดี้เซนเตอร์



รูปที่ 2.5 เปรียบเทียบ Brillouin zone ที่ลำดับต่างกันของอลูมิเนียม

พิจารณาโซนแรก Brillouin zone ในโครงสร้างผลึกซึ่งจะสามารถหาแถบพลังงานของโครงสร้างผลึกได้ โดยที่ตำแหน่งของ  $\Gamma, X, W, K, L$  ของโครงสร้างผลึกแบบเฟสเซนเตอร์ คือ [3]

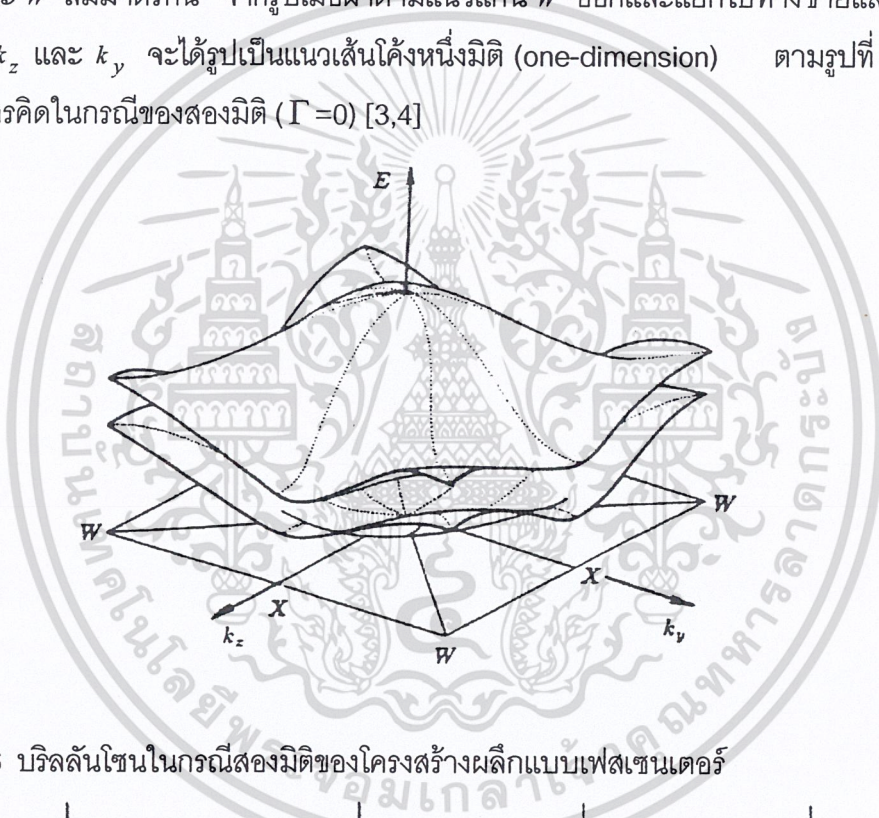
$\Gamma$	$\langle 0,0,0 \rangle$
$X$	$\langle 1,0,0 \rangle$
$W$	$\langle 1,1/2,0 \rangle$
$K$	$\langle 3/4,3/4,0 \rangle$
$L$	$\langle 1/2,1/2,1/2 \rangle$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

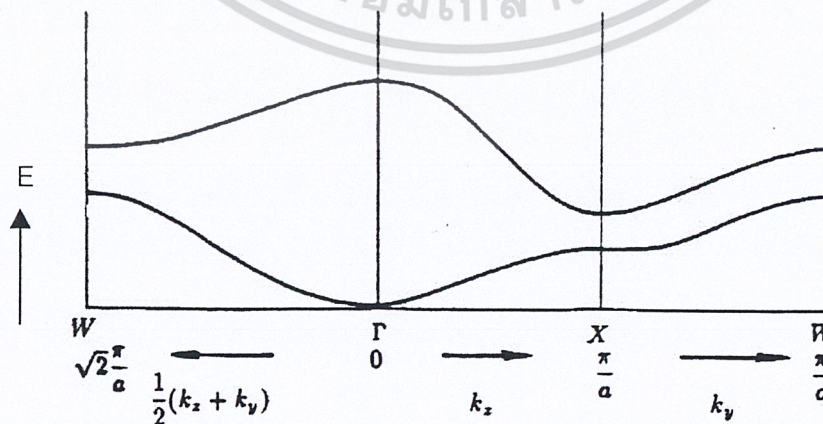
และตำแหน่ง  $L, H, P, N$  ของโครงสร้างผลึกบอดีเซนเตอร์ คือ

$\Gamma$	$\langle 0,0,0 \rangle$
$H$	$\langle 1,0,0 \rangle$
$P$	$\langle 1,1,1 \rangle$
$N$	$\langle 1,1,0 \rangle$

โดยเมื่อพิจารณาจากตำแหน่งของ  $\Gamma, X, W, K, L$  ในโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์ เพื่อให้พิจารณาง่ายขึ้น ตามรูปที่ 2.4 เป็นการพิจารณาในสองมิติ (two-dimension) คือจากรูปกำหนดให้  $x$  และ  $w$  สมมาตรกัน จากรูปเมื่อผ่าตามแนวแกน  $w$  ออกและแยกไปทางซ้ายและขวาตามทิศของ  $k_z$  และ  $k_y$  จะได้รูปเป็นแนวเส้นโค้งหนึ่งมิติ (one-dimension) ตามรูปที่ 2.5 แต่ในที่นี้เป็นการคิดในกรณีของสองมิติ ( $\Gamma=0$ ) [3,4]



รูปที่ 2.6 ปริลันโซนในกรณีสองมิติของโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์



รูปที่ 2.7 ปริลันโซนในกรณีแบบหนึ่งมิติของโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์

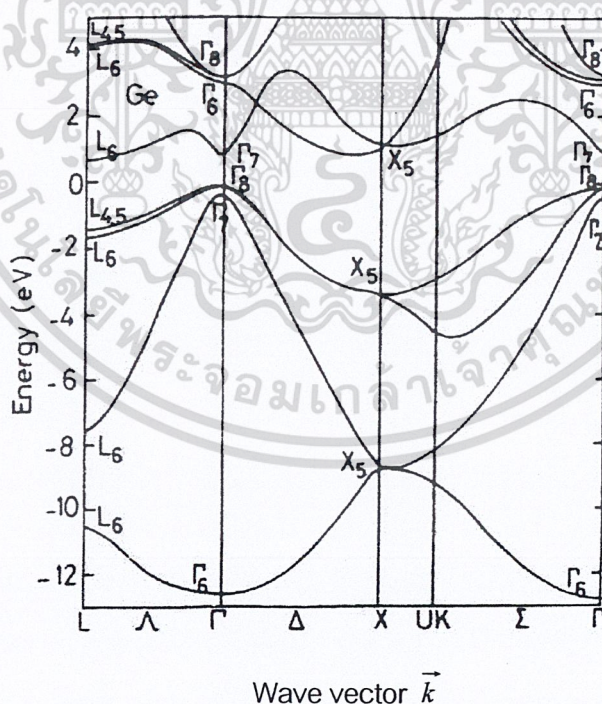
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการคำนวณจริงเมื่อมีการพิจารณาแบบสามมิติ (three dimension) โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกต่างๆ ยังมีลักษณะที่แตกต่างกันไปตามชนิดของอะตอมในผลึก โครงสร้างผลึก ระยะห่างระหว่างอะตอม ดังนั้นโครงสร้างแถบพลังงานจึงแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ที่มีโครงสร้างแถบพลังงานคล้ายคลึงกันได้ตามลักษณะโครงสร้างผลึก

### 1. โครงสร้างแถบพลังงานของโครงสร้างผลึกแบบเพชร

โครงสร้างแถบพลังงานแบบนี้จะมีจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์อยู่ไม่ตรงกับจุดต่ำสุดของแถบการนำ เราเรียกโครงสร้างแถบพลังงานแบบนี้ว่า โครงสร้างแถบพลังงานต้องห้ามแบบอ้อม เช่น ซิลิกอน(Si) มีจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์อยู่ที่จุด  $\Gamma$  และจุดต่ำสุดของแถบการนำอยู่ที่จุด  $X$  ของบริลลันโซน หรือเจอร์มาเนียม(Ge) มีจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์อยู่ที่จุด  $\Gamma$  และจุดต่ำสุดของแถบการนำอยู่ที่จุด  $L$  ของบริลลันโซน ส่วนแถบพลังงานต้องห้ามที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน มีขนาดเท่ากับ 1.12 และ 0.66 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ

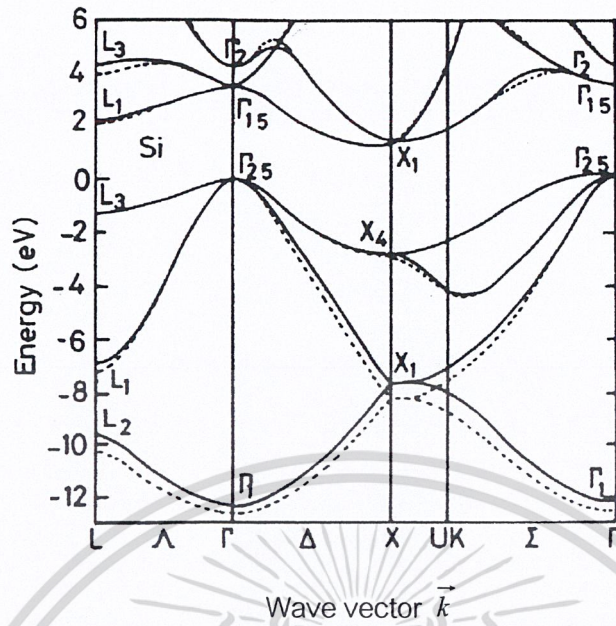
นอกจากนั้นทั้งซิลิกอนและเจอร์มาเนียมมีการแยกของแถบวาเลนซ์ เนื่องจากอันตรกิริยาของสปินกับออร์บิต (spin-orbit Interaction) เท่ากับ 0.044 และ 0.29 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ [5]



(ก) เจอร์มาเนียม(Ge)

### รูปที่ 2.8 โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำเจอร์มาเนียมและซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

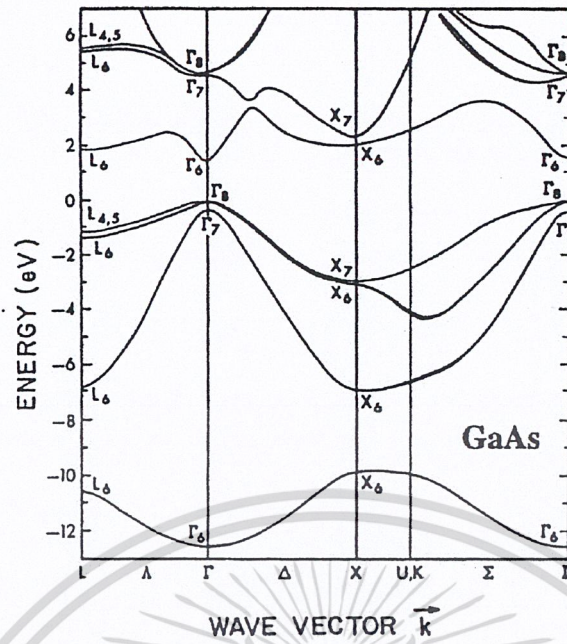


(ข) ซิลิกอน(Si)

รูปที่ 2.8 (ต่อ)

## 2. โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกแบบซิงค์เบลนด์

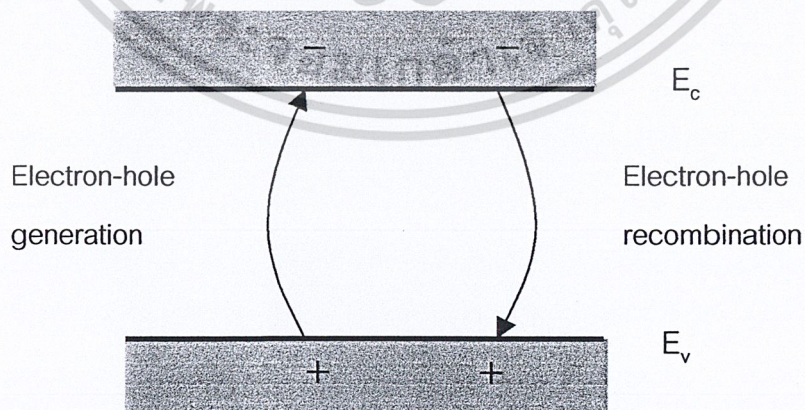
โครงสร้างแถบพลังงานแบบนี้จะมีจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์และจุดต่ำสุดของแถบการนำอยู่ที่จุดเดียวกัน เราเรียกโครงสร้างแถบพลังงานแบบนี้ว่า โครงสร้างแถบพลังงานต้องห้ามแบบตรง เช่น โครงสร้างแถบพลังงานของแกเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) ที่มีจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์และจุดต่ำสุดของแถบการนำอยู่ที่จุด  $\Gamma$  ของบริลลันโซน มีขนาดของแถบพลังงานต้องห้ามเท่ากับ 1.424 อิเล็กตรอนโวลต์ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน และมีการแยกของแถบวาเลนซ์เนื่องจากอันตรกิริยาของสปินกับออร์บิทัลเท่ากับ 0.33 อิเล็กตรอนโวลต์



รูปที่ 2.9 โครงสร้างแถบพลังงานของแกลเลียมอาร์เซไนด์

### 2.3 กระบวนการเกิดและกระบวนการรวมตัวใหม่

กระบวนการเกิด (generation) ก็คือการที่อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานจากภายนอกซึ่งอิเล็กตรอนจะขึ้นไปอยู่ยังระดับพลังงานในแถบความนำกลายเป็นอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าที่มีสภาพเป็นอิสระและทิ้งให้เกิดขึ้นที่ว่างในแถบวาเลนซ์ซึ่งเรียกว่า โฮล จะทำให้ได้อิเล็กตรอนนำไฟฟ้าและโฮล 1 คู่ เรียกว่า คู่อิเล็กตรอน-โฮล (Electron-Hole pair) ดังแสดงในรูปที่ 2.10

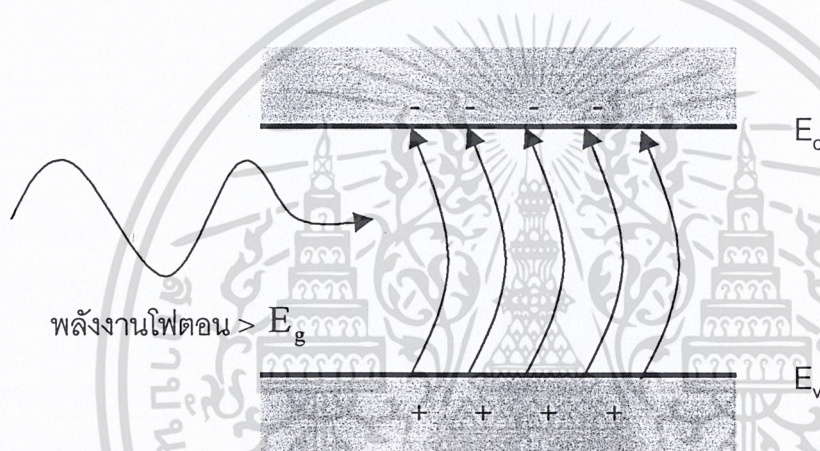


รูปที่ 2.10 กระบวนการเกิดและกระบวนการรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดพาหะเนื่องจากความร้อน(Thermal carrier generation) เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น พลังงานความร้อนมีค่ามากขึ้น ความหนาแน่นของพาหะนำไฟฟ้า อิเล็กตรอน และโฮล ก็มีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย ดังนั้นความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจึงมีค่าเพิ่มขึ้นกับอุณหภูมิ คุณสมบัตินี้คือความนำไฟฟ้าเนื่องจากความร้อน

นอกจากพลังงานความร้อนแล้วพลังงานโฟตอนจากแสงก็สามารถทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลได้เช่นกัน เมื่อพลังงานโฟตอนมีค่ามากกว่า ( $E > E_g$ ) ซึ่งการเกิดพาหะเนื่องจากแสงในสารกึ่งตัวนำเรียกว่า การเกิดพาหะเนื่องจากแสง (Photo carrier generation) อิเล็กตรอนนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในกรณีของการกระตุ้นด้วยแสงเรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน(Photoelectron) ทำให้เกิดความนำไฟฟ้าแสง(Photo conductivity) ดังแสดงในรูปที่ 2.11



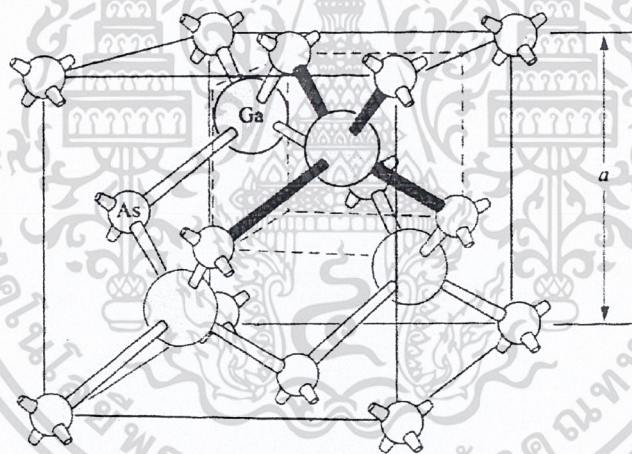
รูปที่ 2.11 การใช้โฟตอนกระตุ้นเพื่อให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล

ในกรณีเดียวกันกับกระบวนการเกิดนั้น ก็มีปรากฏการณ์ การรวมตัวใหม่(Recombination) ของอิเล็กตรอนกับโฮลเกิดขึ้นด้วย กล่าวคือจะมีอิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าลดระดับพลังงานกลับไปรวมตัวกับโฮลที่แถบวาเลนซ์ ทำให้จำนวนอิเล็กตรอนและโฮลลดลง ยิ่งความหนาแน่นของพาหะเพิ่มขึ้น อัตราการรวมตัวใหม่ก็เพิ่มขึ้นตาม อัตราการรวมตัวใหม่(Recombination rate)ของพาหะจะมีค่าเท่ากับอัตราการเกิด(Generation rate) จึงเป็นเหตุให้ความหนาแน่นของพาหะคงที่เพราะจำนวนอิเล็กตรอน-โฮล ที่เกิดขึ้นจะเท่ากับอิเล็กตรอน-โฮลที่หายไปเพราะการรวมตัวใหม่

ในกรณีที่มีพลังงานภายนอกที่มีค่ามากกว่าแถบพลังงานต้องห้ามมากระตุ้นก็จะทำให้เกิดกระบวนการเกิดและเมื่อค่าพลังงานภายนอกลดลงหรือมีค่าน้อยกว่าแถบพลังงานต้องห้ามก็จะเกิดกระบวนการรวมตัวใหม่

## 2.4 สมบัติที่สำคัญของแกเลียมอาร์เซไนด์

สารกึ่งตัวนำแกเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) เป็นวัสดุที่ไม่มีอยู่ตามธรรมชาติ แกเลียมอาร์เซไนด์ เป็นสารกึ่งตัวนำกลุ่มสาม-ห้า มีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (Zinc Blende) ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งมีโครงสร้างอะตอมเดี่ยวของแกเลียมคือ  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^1$  และของอาร์เซไนค คือ  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^3$  มีค่าคงที่แลตติซ =  $5.653 \text{ \AA}$  [6] และมีชนิดของแถบพลังงานต้องห้ามเป็นแบบแถบพลังงานต้องห้ามแบบตรงดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยจะพบว่าแกเลียมอาร์เซไนด์ มีค่าของแถบพลังงานต้องห้าม = 1.424 อิเล็กตรอนโวลต์ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน และ 1.51 อิเล็กตรอนโวลต์ ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน มีการแยกของแถบวาเลนซ์เนื่องจากอันตรกิริยาของ สปินกับ ออร์บิทัลเท่ากับ 0.33 อิเล็กตรอนโวลต์ เนื่องจากแกเลียมอาร์เซไนด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีชนิดของแถบพลังงานต้องห้ามแบบตรงจึงมีคุณสมบัติทางด้านแสงและด้านไฟฟ้าที่ดี สิ่งประดิษฐ์ของสารกึ่งตัวนำแกเลียมอาร์เซไนด์ที่ผลิตมากคือ เลเซอร์ไดโอด [7]



รูปที่ 2.12 โครงสร้างผลึกของแกเลียมอาร์เซไนด์

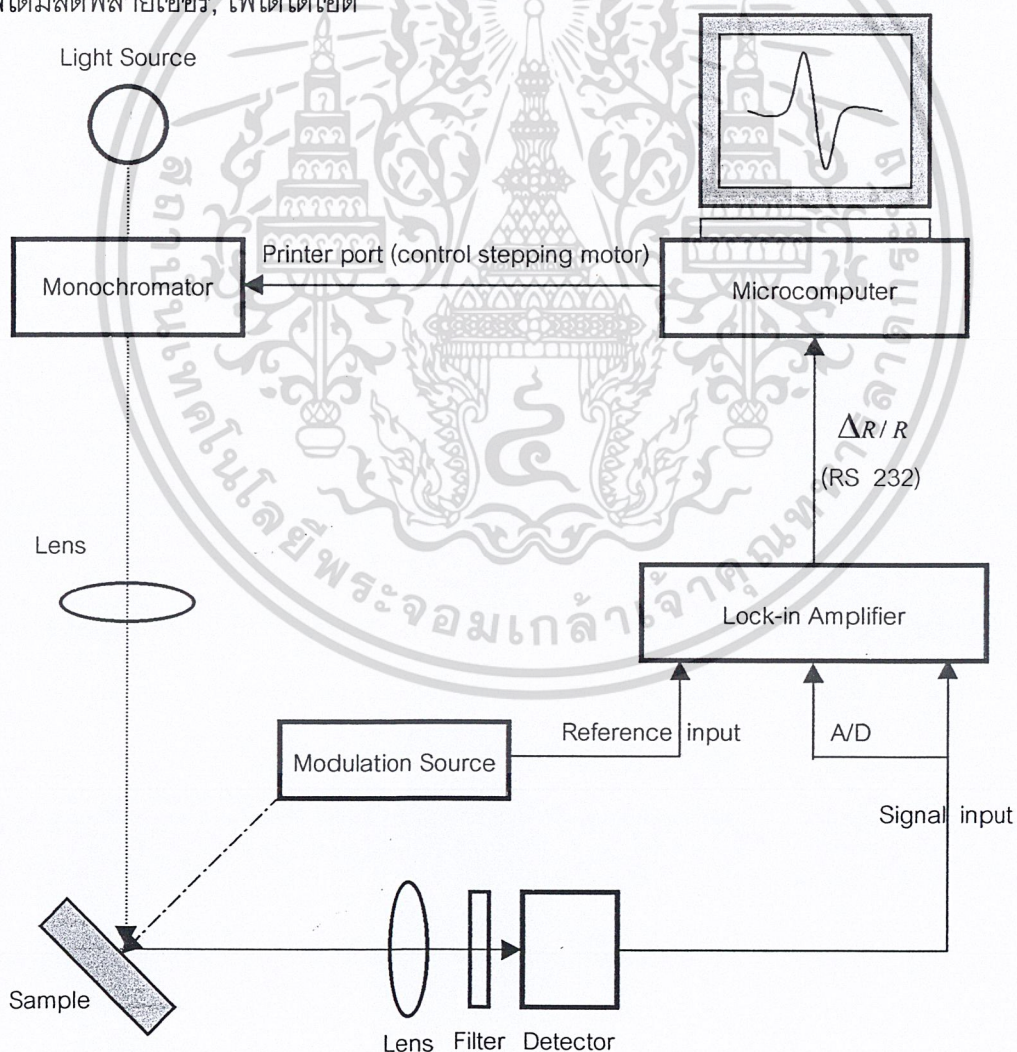
## 2.5 หลักการของมอดูเลชันสเปกโทรสโกปี

มอดูเลชันสเปกโทรสโกปีเป็นเทคนิคในการศึกษาคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเทคนิคของการมอดูเลชันนั้นแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ (1) การมอดูเลตภายนอก (External modulation) (2) การมอดูเลตภายใน (Internal modulation) โดยที่การมอดูเลตภายนอกนั้นจะเป็นการป้อนค่าพารามิเตอร์ที่น่าสนใจเข้าไปในสารตัวอย่าง (Sample) แล้วสังเกตผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากพารามิเตอร์นั้น ส่วนการมอดูเลตภายในเป็นเงื่อนไขที่เกิดขึ้นภายในสารตัวอย่างเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าการตอบสนองทางสเปกตรัมของสารสามารถหาได้จากการป้อนสิ่งรบกวนเข้าไปในสาร (perturbation) ตัวอย่างเช่น สนามไฟฟ้า (Electric field : EM), ความร้อน (thermo modulation) ขั้นตอนเหล่านี้เป็นหลักการของการมอดูเลตภายนอก วิธีการคือการใช้การมอดูเลตพารามิเตอร์ต่างๆ เข้าไป ตัวอย่างเช่น การมอดูเลตทางเฟส มอดูเลตทางความถี่ มอดูเลตทางแอมพลิจูด เป็นต้น

ดังแสดงในรูปที่ 2.13 เป็นรูปของการทดลองการมอดูเลตที่เรียกว่า “แบบภายนอก” ในรูปเป็นการทดลองรีเฟลกแทนซ์ (reflectance) โดยสามารถปรับเปลี่ยนเป็นโฟโตรีเฟลกแทนซ์ (photorelectance) หรืออิเล็กโตรรีเฟลกแทนซ์ (electroreflectance) แสงจากแหล่งกำเนิดแสง (ซีเนออน, ฮาโลเจน, ทังสเตน) ผ่านมายังโมโนโครเมเตอร์ (monochromator) ที่ความยาวคลื่น  $\lambda$  จะให้ค่าความเข้มแสงเป็น  $I_0(\lambda)$  และโฟกัสไปที่สารตัวอย่างโดยผ่านเลนส์เพื่อให้ได้ความเข้มแสงมากที่สุด ในส่วนของการมอดูเลต (เช่น สนามไฟฟ้า, อุณหภูมิ) ถูกป้อนเข้าไปยังสารตัวอย่างที่มีความถี่  $\Omega_m$  และสะท้อนจากสารตัวอย่างผ่านเลนส์ และโฟกัสไปยังตัวตรวจวัดสัญญาณ เช่น โฟโตมัลติพลายเออร์, โฟโตไดโอด



รูปที่ 2.13 รูปแบบของการมอดูเลตภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณจากตัวตรวจจับสัญญาณนั้น มีด้วยกัน 2 สัญญาณ คือค่าของ d.c. ที่ได้จาก  $I_0(\lambda)R(\lambda)$  เมื่อ  $R(\lambda)$  เป็นค่าของการสะท้อนของสัญญาณ d.c. จากสารตัวอย่าง ส่วนค่าที่ได้จากการมอดูเลต (ที่ความถี่  $\Omega_m$ ) คือ  $I_0(\lambda)\Delta R(\lambda)$  เมื่อ  $\Delta R(\lambda)$  คือค่าของการสะท้อนจากการเปลี่ยนแปลงของแหล่งกำเนิดการมอดูเลต สัญญาณ a.c. ที่ได้จากตัวตรวจวัดสัญญาณจะเป็น  $I_0\Delta R$  ซึ่งถูกวัดโดยเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน (Lock-in Amplifier) [8,9]

## 2.6 ทฤษฎีเกี่ยวกับโฟโตรีเฟลกแทนซ์

### 2.6.1 สเปกตรัมรีเฟลกแทนซ์ที่มอดูเลตและฟังก์ชันไดอิเล็กตริก [10-13]

ปริมาณที่พิจารณาถึงการตอบรับไดอิเล็กตริกของวัสดุที่มีต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้แก่ ฟังก์ชันไดอิเล็กตริก

$$\varepsilon(\omega, \vec{k}) = \varepsilon_1(\omega, \vec{k}) + i\varepsilon_2(\omega, \vec{k}) \quad (2.1)$$

ซึ่งเป็นฟังก์ชันเชิงซ้อนของสองตัวแปร อันได้แก่ความถี่เชิงมุม  $\omega$  และเวกเตอร์คลื่น  $\vec{k}$  (wave vector) ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า การแปรผันของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วย  $\vec{k}$  สามารถที่จะตัดทิ้งได้ หมายความว่า  $\varepsilon$  จะเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับตัวแปร  $\omega$  แต่เพียงอย่างเดียว

$$\varepsilon(\vec{k}) = \varepsilon_1(\omega) + i\varepsilon_2(\omega) \quad (2.2)$$

โดยที่ฟังก์ชันไดอิเล็กตริกมีความสัมพันธ์กับสภาพสะท้อนเฟรสเนล  $R$  (Fresnel reflectivity) ดังนี้

$$R = \left| \frac{n - n_a}{n + n_a} \right|^2 \quad (2.3)$$

ในที่นี้  $n^2 = \varepsilon$  (2.4)

$$n_a^2 = \varepsilon_a \quad (2.5)$$

การรบกวน (perturbation) ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลง  $\Delta R$  ในการเกิดรีเฟลกแทนซ์  $R$  ของสารตัวอย่าง ซึ่งผลของการเปลี่ยนแปลงในความเข้ม (intensity) ของการสะท้อนอยู่ในรูปของ

สัญญาน  $\frac{\Delta R}{R}$  สมการที่(2.3)แสดงสภาพสะท้อนเฟรสนเอล  $R$  สำหรับกรณีที่แสงตกกระทบบนตั้งฉากให้กับผิวหน้าของระบบฐานรองล้อมรอบ (substrate-ambient system) โดยที่  $n$  คือดรรชนีหักเหเชิงซ้อนของฐานรอง และ  $n_a$  คือดรรชนีหักเหของแอมเบียน (ambient) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 สำหรับปริภูมิอิสระ (free space) โดยจากสมการ(2.2) (2.3) (2.4) และ (2.5) จะสามารถเขียน  $R$  ให้เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับฟังก์ชันไดอิเล็กตริก โดยมี  $\epsilon_1$  คือส่วนจริงและ  $\epsilon_2$  คือส่วนจินตภาพ ดังนั้นถ้ามีการเปลี่ยนแปลง  $\epsilon$  ก็จะทำให้  $R$  เปลี่ยนแปลงไปด้วย ที่น่าสนใจก็คือปริมาณ  $\frac{\Delta R}{R}$  ซึ่งแสดงรูปทรงเส้น (lineshape) ของสเปกตรัมรีเฟล็กแทนซ์ที่มอดูเลต โดยการใช้สมการ (2.3) (2.4) และ (2.5) เราจะได้

$$\frac{\Delta R}{R} = \operatorname{Re} \left[ \frac{2n_a}{n(\epsilon - \epsilon_a)} \Delta \epsilon \right] \quad (2.6)$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \operatorname{Re} [(\alpha - i\beta) \Delta \epsilon] \quad (2.7)$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \alpha \Delta \epsilon + \beta \Delta \epsilon \quad (2.8)$$

ซึ่ง  $\alpha, \beta$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของ Seraphin

## 2.6.2 การแสดงความหมายโดยทั่วไปของฟังก์ชันไดอิเล็กตริก

เพโทรฟฟ์ (petroff) [7] ได้ให้ความหมายโดยทั่วไปสำหรับฟังก์ชันไดอิเล็กตริก  $\epsilon$  ของสารกึ่งตัวนำโดยผ่านสถานะบลอค (bloch state)  $\varphi_n(\vec{k}, r)$  กับพลังงาน  $E_n(\vec{k})$  ของดรรชนีแถบ  $n$  และเวกเตอร์คลื่น  $\vec{k}$  ในการประมาณแบบ 1 อิเล็กตรอน (one-electron approximation) เพโทรฟฟ์ พบว่า

$$\epsilon(E, \Gamma) = 1 + \frac{4\pi e^2 \hbar^2}{m^2 E^2} \sum_{\vec{k}, c, v} |\hat{e} \cdot \vec{P}_{cv}(\vec{k})|^2 \left[ \frac{1}{E_{cv}(\vec{k}) - E - i\Gamma} + \frac{1}{E_{cv}(\vec{k}) + E + i\Gamma} \right] \quad (2.9)$$

ฟังก์ชันไดอิเล็กตริกทั่วไปจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือส่วนจริงและส่วนจินตภาพและยังเป็นฟังก์ชัน

ที่มีสองตัวแปร อันได้แก่ พลังงานของโฟตอน  $E = \hbar\omega$  และพารามิเตอร์ความกว้างของเฟโนเมโลเอกสารเป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จคัฒ  $\Gamma$  (phenomological broadening parameter) ชงเงงนคัวตบสนองล่ำหำภคกลไกการกระเจงที่หำให้เกดทรนชขง (transition) ดงนงน เมอไมม่กคกลไกการกระเจง  $\Gamma$  จะม่ค้ำเทำภคกับศูนย

นสมการที่ (2.9)  $e$  คอ ประจุไฟฟ้ำสมบูรณของอเลกตรอน  
 $\hbar$  คอ ค้ำคงที่ของพลงค (plank's constant)  
 $m$  คอ มวลของอเลกตรอน  
 $n = c, v$  ชงแสดงแถบการนำและแถบวาลนชตามล่ำดับ  
 $\hat{e}$  คอ เวกเตอรหนวยโพลารเซชง (unit polarization vector)  
 ของสนวมไฟตอน

$\vec{P}_{cv}(\vec{k}) = \langle \varphi_{c\vec{k}} | \vec{P} | \varphi_{v\vec{k}} \rangle$  คอ เมทรคชอิลเมนคของโมเมนตัม (momentum matrix element) ที่ได้จกหลักการเลอภทรนชขง (selection rules of transition)

$E_{cv}(\vec{k}) = E_c(\vec{k}) - E_v(\vec{k})$  คอ พลังงานแถบภยใน (interband energy)

สมการ (2.9) ประกอบดวย 3 พจนคัวภคกันคอ พจนของค้ำคงที่ พจนของเรชเนนช  
 $\frac{1}{E_{cv}(\vec{k}) - E - i\Gamma}$  และพจนที่ไมเรชเนนช  $\frac{1}{E_{cv}(\vec{k}) + E + i\Gamma}$  มม่เพียงแต่พจนเรชเนนชเทำนงนที่มี

สวนเหมำสมภคกับคองสรำงของสเปกตรัมไฟโตรเฟลกแทนช (photoreflectance spectrum)

จกสมการ(2.9) จะชงพิจำรณำถงสเปกตรัมคอเลกตรค โดยพิจำรณำจกการรวมของ พงคชขง  $f(\vec{k})$  (sum over  $(\vec{k})$ ) นบรลลนชนที่หนง

$$\sum_k^{1stBZ} f(\vec{k}) = 2 \int_{BZ} f(k) \rho_k dk \quad (2.10)$$

ชง  $\rho_k$  คอ จำนวนของเวกเตอรยนยอม  $k$  (allow  $k$  vector) ที่แจกแจงอภยใน บรลลนชน ตอ หนวยปรมำตร เทำภคกับ  $(\frac{1}{2\pi})^3$  และแพกเตอร 2 มำจกการยนยอมของสภณะเดยวกันของ อเลกตรอนที่มีสบนชงและสบนลงจะได้

$$\mathcal{E}(E, \Gamma) = 1 + \frac{e^2 \hbar^2}{\pi^2 m^2 E^2} \int_{BZ} d^3 k |\hat{e} \cdot \vec{P}_{cv}(\vec{k})|^2 \times \left[ \frac{1}{E_{cv}(\vec{k}) - E - i\Gamma} + \frac{1}{E_{cv}(\vec{k}) + E + i\Gamma} \right] \quad (2.11)$$

เอกสรนงนเป็นเอกสรนงนที่สงวนไว้ล่ำหำภคการชงงานเพอการศึกษาเทำนงน ไม่อนุญจตให้นำไปชงประยอชนดำนการค้ำ ไม่วำกรณีคอง พงลลน อภคชงหำมมให้ดดเปลงนอหำ และดองอำงอภคถงเจ้ำของเอกสรนงนคองชงนงนที่ม่การนำไปชง

อินทิกรัล  $\int_{BZ} d^3k$  ถูกแทนด้วยการอินทิกรัล  $\int_S \frac{dk_1 dk_2}{|\nabla_{\vec{k}} E_{cv}(\vec{k})|}$  อินทิกรัลนี้คือพื้นผิวพลังงานคงที่ (constant energy surface) ที่กำหนดด้วย  $E_{cv}(\vec{k}) = E_S$  กับสองตัวแปร  $k_1$  และ  $k_2$  ที่บอกตำแหน่งของจุดบนพื้นผิว ดังนั้นสามารถเขียนฟังก์ชัน  $\mathcal{E}$  ได้เป็น

$$\mathcal{E}(E, \Gamma) = 1 + \frac{e^2 \hbar^2}{\pi^2 m^2 E^2} \int dE \int_S dk_1 dk_2 \frac{|\dot{e} \cdot \vec{P}_{cv}(\vec{k})|^2}{|\nabla_{\vec{k}} E_{cv}(\vec{k})|} \times \left[ \frac{1}{E_{cv}(\vec{k}) - E - i\Gamma} + \frac{1}{E_{cv}(\vec{k}) + E + i\Gamma} \right] \quad (2.12)$$

สมการที่ (2.12) มีจุดที่ไม่ปกติ (singularity) อยู่กับแต่ละ  $k$  สำหรับคู่แถบ (แถบการนำและแถบวาเลนซ์)

$$\text{ซึ่ง} \quad E_{cv}(\vec{k}) = 0 \quad (2.13)$$

เรียกจุดที่  $\vec{k} = \vec{k}_j^{cv}$  ซึ่งเป็นผลเฉลยของสมการ (2.13) ว่าจุดวิกฤต (critical point) เนื่องจาก  $\nabla_{\vec{k}} E_{cv}(\vec{k}) = \nabla_{\vec{k}} E_c(\vec{k}) - \nabla_{\vec{k}} E_v(\vec{k})$  สมการที่ (2.13) จะเป็นจริง

$$\text{โดย} \quad \nabla_{\vec{k}} E_c(\vec{k}) = \nabla_{\vec{k}} E_v(\vec{k}) = 0 \quad (2.14)$$

$$\text{หรือ} \quad \nabla_{\vec{k}} E_c(\vec{k}) = \nabla_{\vec{k}} E_v(\vec{k}) \neq 0 \quad (2.15)$$

บริเวณล้อมรอบจุดวิกฤตดังกล่าว จะนำไปสู่โครงสร้างที่สำคัญในสเปกตรัมของโฟโตมอดูเลชัน (photomodulation spectra) ด้วยการวิเคราะห์รูปร่างเส้น (lineshape) ของสเปกตรัมจะสามารถทราบถึงชนิดของจุดวิกฤตได้ เราสามารถพิจารณาบริเวณล้อมรอบจุดวิกฤต โดยการขยาย  $E_{cv}(\vec{k})$  ในรูปแบบของอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor's series) จนถึงพจน์ล้อมรอบจุดวิกฤต  $j$

$$E_{cv}(\vec{k}) = E_{cv}(\vec{k}_j^{cv} + \Delta\vec{k}) \quad \text{ซึ่ง} \quad \Delta\vec{k} = \vec{k} - \vec{k}_j^{cv}$$

$$E_{cv}(\vec{k}) = E_{cv}(\vec{k}_j^{cv}) + \nabla E_{cv}(\vec{k}_j^{cv}) \Delta\vec{k} + \nabla^2 E_{cv}(\vec{k}_j^{cv}) \frac{(\Delta\vec{k})^2}{2} \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก

$$\nabla_{\vec{k}} E_{cv}(\vec{k}_j^{cv}) = 0$$

ดังนั้น

$$E_{cv}(\vec{k}) = E_{cv}(\vec{k}_j^{cv}) + \frac{1}{2} \hbar^2 \left[ \frac{(k_x - k_{jx}^{cv})}{\mu_{xx}^{cv}} + \frac{(k_y - k_{jy}^{cv})}{\mu_{yy}^{cv}} + \frac{(k_z - k_{jz}^{cv})}{\mu_{zz}^{cv}} \right] \quad (2.17)$$

โดยที่  $\mu_{xx}, \mu_{yy}, \mu_{zz}$  คือ ส่วนประกอบในแนวทแยงมุมของเทนเซอร์มวลส่วนกลับ (reciprocal mass tensor) กำหนดด้วย

$$\mu_{cv}^{-1}(\vec{k}) = \frac{1}{\hbar^2} \nabla_{\vec{k}} \nabla_{\vec{k}} E_{cv}(\vec{k}) \quad (2.18)$$

สมมติให้จุดวิกฤตเชิงเดียวเป็นจุดกำเนิด (origin) โดยการใช้ระบบโคออร์ดิเนตเฉพาะที่  $(x, y, z)$  (local coordinate system) จะสามารถย่อ  $E_{cv}(\vec{k})$  ในสมการ (2.17) จะได้เป็น

$$E_{cv}(\vec{k}) = E_g + \frac{1}{2} \hbar^2 \left[ \frac{k_x^2}{\mu_{xx}} + \frac{k_y^2}{\mu_{yy}} + \frac{k_z^2}{\mu_{zz}} \right] \quad (2.19)$$

ดังนั้นจึงสามารถเขียนฟังก์ชันไดอิเล็กตริกอยู่ในรูปของการซ้อนทับของฟังก์ชันเฉพาะที่ (superposition of local function)

$$\mathcal{E}(E, \Gamma) = \frac{e^2 \hbar^2}{\pi^2 m^2 E^2} |\hat{e} \cdot \vec{P}_{cv}(\vec{k})|^2 \int \frac{d^3 k}{E_{cv}(\vec{k}) - E - i\Gamma} \quad (2.20)$$

ด้วยการตัดพจน์ที่ไม่เรโซแนนซ์และพจน์ค่าคงที่เพราะว่า พจน์เหล่านี้จะให้โครงสร้างของสเปกตรัมที่มอดูเลตไม่เด่นชัด

แทนสมการ (2.19) ลงในสมการ (2.20) แล้วทำการอินทิเกรตสำหรับ 1 2 หรือ 3 มิติ จะได้

$$\mathcal{E}(E, \Gamma) = \frac{Q}{E^2} D_x K_y K_z i^{l+1} (E - E_g + i\Gamma)^{-\frac{1}{2}} \quad \text{สำหรับ 1 มิติ} \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathcal{E}(E, \Gamma) = \frac{Q}{E^2} D_x K_y K_z i^{l+2} (E - E_g + i\Gamma) \quad \text{สำหรับ 2 มิติ} \quad (2.22)$$

$$\mathcal{E}(E, \Gamma) = \frac{2\pi Q}{E^2} D_x K_y K_z i^{l+1} (E - E_g + i\Gamma)^2 \quad \text{สำหรับ 3 มิติ} \quad (2.23)$$

ซึ่ง

$$Q = \frac{e^2 \hbar^2}{\pi^2 m^2} |\dot{e} \cdot \vec{P}_{cv}(\vec{k})|^2$$

$$D_i = \left( \frac{2|\mu_{ii}|}{\hbar^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad i = x, y, z$$

$K_i$  คือ cutoff lengths ในบริลลันโซน สำหรับ 1 และ 2 มิติ

$l$  คือ ตัวเลขของมวลลบ

### 2.6.3 ฟังก์ชันไดอิเล็กตริกที่มอดูเลต(modulate dielectric function)

เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าประยุกต์ ( $\vec{\xi}$ ) ผลของสนามไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงเวกเตอร์คลื่นของสถานะบอลลอค จาก  $\vec{k}$  เป็น  $\vec{k} - \frac{e\vec{\xi}}{\hbar}$  การแทนที่แสดงถึง สนามไฟฟ้าเป็นตัวผสมฟังก์ชันคลื่นทั้งหมดซึ่งมีส่วนประกอบตามทิศทางของสนามไฟฟ้า ขนาดของการผสม จะกำหนดได้ด้วยพารามิเตอร์เวลา  $t$

พจน์ที่ไม่เรโซแนนซ์และพจน์ค่าคงที่ไม่มีส่วนช่วยให้โครงสร้างของสเปกตรัมที่มอดูเลตคมชัดขึ้น ดังนั้น

$$\mathcal{E}(E, \Gamma) = \frac{ie^2 \hbar^2}{\pi^2 m^2 E^2} \int_{BZ} d^3 k |\dot{e} \cdot \vec{P}_{cv}(\vec{k})|^2 \int \exp \left[ \frac{d^3 k}{E_{cv}(\vec{k}) - E - i\Gamma} \right] dt \quad (2.24)$$

ในการบวก  $E_{cv}(\vec{k})$  จะต้องเปลี่ยนเป็น

$$E_{cv}(\vec{k} - \frac{e\vec{\xi}t}{\hbar}) \cong E_{cv}(\vec{k}) + \frac{1}{2\hbar^2} e^2 (\vec{\xi} \cdot \nabla_{\vec{k}})^2 E_{cv}(\vec{k}) t^2 \quad (2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{cv}(\vec{k} - \frac{e\vec{\xi}t}{\hbar}) \cong E_{cv}(\vec{k}) + \frac{1}{2\mu_{\parallel}} e^2 |\vec{\xi}|^2 t^2 \quad (2.26)$$

ซึ่ง พจน์อันดับหนึ่งของ  $t$  หายไปจากสมการ(2.13) และ  $\mu_{\parallel}$  คือมวลของพาหะที่กระโดดระหว่างแถบ (interband mass) ตามทิศทางของสนามไฟฟ้า แทนสมการ (2.25) และ (2.26) ลงไปในสมการ (2.24) และใช้สมมาตรของเอกซ์โพเนนเชียลในอินวาเรียนที่ผันกลับได้ตามเวลา (the exponential in time-reversal invariance) (Aspnes)

$$\exp\left[\int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} x dt\right] = \exp(xt) \quad (2.27)$$

$$\varepsilon(E, \xi, \Gamma) = \frac{ie^2 \hbar^2}{\pi^2 m^2 E^2} \int_{BZ} d^3 k |\hat{e} \cdot \vec{P}_{cv}(\vec{k})|^2 \int_0^{\infty} \exp\left[-\frac{i(E_{cv}(\vec{k}) - E - i\Gamma)t}{\hbar}\right] \times \exp\left[\frac{i\Omega^3 t^3}{3}\right] dt \quad (2.28)$$

ซึ่ง  $\hbar\Omega$  คือพลังงานคาเรกเตอร์สติก (characteristic energy) ที่ได้จากพจน์ของพลังงานของพาหะที่กระโดดระหว่างแถบ (interband energy)  $E_{cv}(\vec{k})$  หรือ มวลลดทอนของพาหะที่กระโดดระหว่างแถบ (interband redue mass)  $\mu_{\parallel}$  ตามทิศทางของสนามไฟฟ้า

$$(\hbar\Omega)^3 = \frac{e^2 (\vec{\xi} \cdot \nabla_{\vec{k}})^2 E_{cv}(\vec{k})}{8} \quad (2.29)$$

$$= \frac{e^2 \hbar^2 \xi^2}{8} \quad (2.30)$$

ในลิมิตสนามไฟฟ้าต่ำ  $\xi^2$  มีค่าน้อย หมายความว่า  $\hbar\Omega \ll \Gamma$  เอกซ์โพเนนเชียลของ  $-\frac{\Gamma t}{\hbar}$  ต่างจาก 0 อย่างชัดเจน ดังนั้น

$$\exp\left(\frac{i\Omega^3 t^3}{3}\right) = 1 - \frac{i\Omega^3 t^3}{3} \quad (2.31)$$

แทนสมการ (2.31) ลงในสมการ (2.28) จะสามารถหาสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\varepsilon(E, \vec{\xi}, \Gamma) = \varepsilon(E, 0, \Gamma) + \Delta\varepsilon(E, \vec{\xi}, \Gamma) \quad (2.32)$$

จาก

$$\Delta\varepsilon = \frac{e^2 \hbar^2}{3\pi^2 m^2 E^2} \int_{BZ} d^3 k |\hat{e} \cdot \vec{P}_{cv}(\vec{k})|^2 \Omega^3 \int_0^\infty t^3 \exp\left[-\frac{i(E_{cv}(\vec{k}) - E - i\Gamma)t}{\hbar}\right] dt \quad (2.33)$$

$t^3$  เท่ากับ  $\left[-i\hbar \frac{\partial}{\partial E}\right]^3$

$$\Delta\varepsilon = \frac{(\hbar\Omega)^3}{3E^2} \frac{\partial^3}{\partial E^3} \left[ E^2 \varepsilon(E, 0, \Gamma) \right] \quad (2.34)$$

#### 2.6.4 ฟังก์ชันรูปทรงเส้นของโฟโตรีเฟลกแทนซ์

จากสมการ (2.7) สเปกตรัมที่ถูกมอดูเลตคือ

$$\frac{\Delta R}{R} = \text{Re}[(\alpha - i\beta)\Delta\varepsilon] \quad (2.35)$$

ในกรณีที่สารกึ่งตัวนำเป็นก้อนผลึก (bulk semiconductor) จากสมการที่ (2.23) จะแทนลงในสมการ (2.34) จะได้เป็น

$$\Delta\varepsilon = \frac{\pi}{4} Q D_x D_y D_z i^{l+1} (\hbar\Omega)^3 [E - E_g + i\Gamma]^{-\frac{5}{2}} \quad (2.36)$$

จากนั้นแทนสมการ (2.36) นี้ลงในสมการ (2.7) จะได้การแสดงความหมายของสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ ที่เป็นฟังก์ชันของ  $E$  ดังนี้

$$\frac{\Delta R}{R} = \text{Re} \left[ C e^{i\phi} (E - E_g + i\Gamma)^{-\frac{5}{2}} \right] \quad (2.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย 
$$C e^{i\phi} = \frac{1}{4}(\alpha - i\beta)\pi Q D_x D_y D_z i^{l+1} (\hbar\Omega)^3$$

สมการ (2.37) ประกอบด้วยพารามิเตอร์ 4 ตัวสำคัญด้วยกันคือ

- $C$  คือ แอมพลิจูด (amplitude)
- $\phi$  คือ แฟกเตอร์เฟส (phase factor)
- $E_g$  คือ แถบพลังงานต้องห้าม (energy gap)
- $\Gamma$  คือ พารามิเตอร์ความกว้าง (broadening parameter)

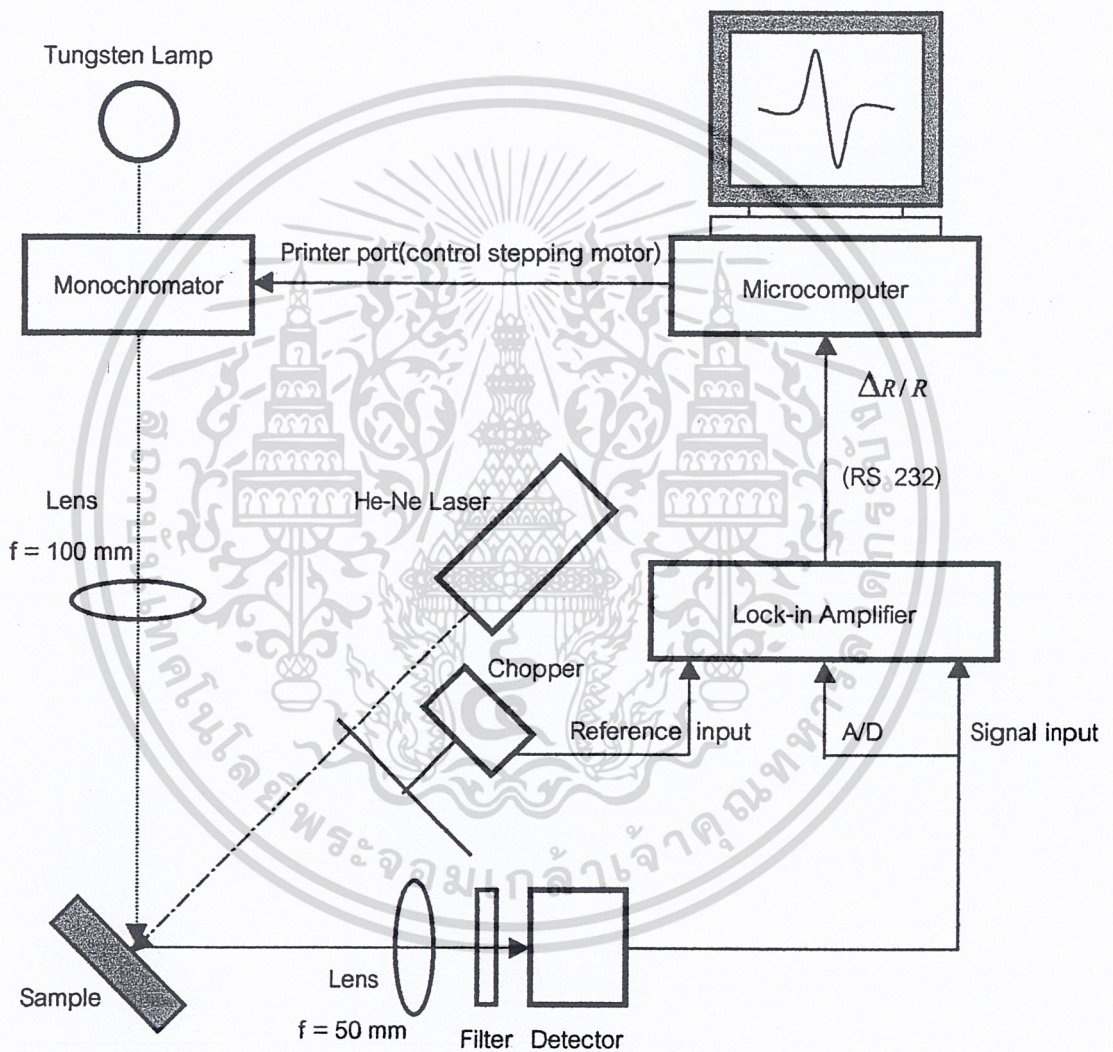


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 การสร้างระบบวัดโฟตรีเฟลกแทนซ์สเปกโทรสโกปี

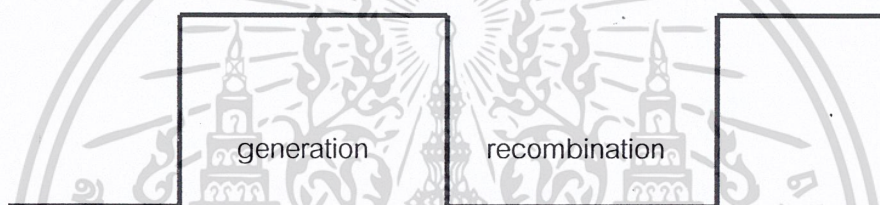
##### 3.1.1 หลักการของระบบวัดโฟตรีเฟลกแทนซ์สเปกโทรสโกปี



รูปที่ 3.1 แสดงระบบวัดโฟตรีเฟลกแทนซ์สเปกโทรสโกปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองของระบบวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เป็นการมอดูเลตของสนามไฟฟ้าในสารตัวอย่างโดยอาศัยหลักการกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล โดยการกระตุ้นจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ผ่านตัวตัดแสง (chopper) ที่ความถี่  $\Omega_m$  เมื่อมีการกระตุ้นจากแสงเลเซอร์โดยผ่านตัวตัดแสงจะทำให้เกิดกระบวนการเกิด (generation) ในช่วงที่ผ่านช่องว่างตัวตัดแสง (on) และเกิดกระบวนการรวมตัวใหม่ (recombination) ในช่วงที่ไม่ผ่านตัวตัดแสง (off) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งในจังหวะของกระบวนการเกิดและกระบวนการรวมตัวใหม่จะเกิดมากที่สุดบริเวณที่เป็นแถบพลังงานต้องห้ามของสารกึ่งตัวนำหมายถึงมีค่าของการเปลี่ยนแปลงสูงสุด (critical point) ที่บริเวณแถบพลังงานต้องห้ามของสารกึ่งตัวนำ สัญญาณที่วัดได้มี 2 ส่วน คือ สัญญาณ a.c. ที่มีความสัมพันธ์กับค่าการเปลี่ยนแปลงรีเฟลกติวิตี (reflectivity  $\Delta R$ ) และสัญญาณ d.c. ที่มีความสัมพันธ์กับค่ารีเฟลกติวิตี (reflectivity  $R$ )



รูปที่ 3.2 การใช้แสงที่ผ่านจากตัวตัดแสงไปกระตุ้นให้เกิดกระบวนการเกิดและกระบวนการรวมตัวใหม่

เครื่องมือไมโครไมโครคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในระบบจะทำการควบคุมการหมุนสเตปปีงมอเตอร์ของโมโนโครเมเตอร์ (monochromator) ผ่านทางพรีนเตอร์พอร์ทแบบพูลสเตปและทำการอ่านค่าสัญญาณ a.c. และ d.c. จากเครื่องขยายสัญญาณแบบลือคอินผ่านทาง RS-232 พร้อมทั้งเขียนกราฟสเปกตรัมที่วัดได้ปรากฏบนจอภาพของเครื่องมือไมโครไมโครคอมพิวเตอร์โดยตั้งสเกลอัตโนมัติ เมื่อเสร็จสิ้นการทำงานโปรแกรมจะทำการหาค่าสเปกตรัมของ  $\frac{\Delta R}{R}$  กับพลังงานโฟตอนพร้อมแสดงผลอีกครั้งบนจอภาพ และจะทำการเก็บข้อมูลเพื่อใช้วิเคราะห์ผลต่อไป

### 3.1.2 องค์ประกอบของระบบวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์สเปกโทรสโกปี

องค์ประกอบของระบบวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์สเปกโทรสโกปีประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดแสง (หลอดทั้งสแตน) แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ โมโนโครเมเตอร์ ตัวตัดแสง ตัวตรวจวัดสัญญาณ,เลนส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวกรองแสง แผ่นยึดสาร เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน สเตปมิงมอเตอร์ และไมโครคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆ ดังต่อไปนี้

### 1. แหล่งกำเนิดแสง (tungsten Lamp)

ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงกำลัง 100 วัตต์ ให้แสงในช่วงความยาวคลื่น 200 -2200 นาโนเมตร เพื่อให้เป็นแสงที่ตกกระทบสารตัวอย่างในรูปของสัญญาณ d.c.

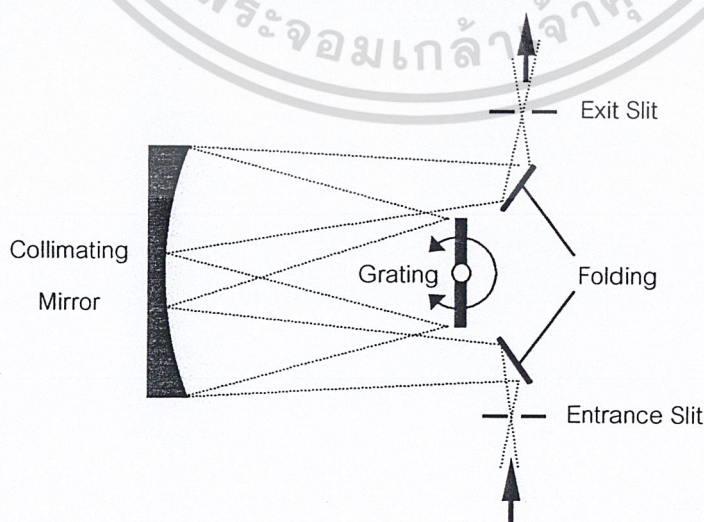
### 2. แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ (laser source)

ทำหน้าที่กระตุ้นให้เกิดกระบวนการเกิด และกระบวนการรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล โดยในระบบวัดมีการทดลองโดยใช้แสงเลเซอร์ดังต่อไปนี้

- ความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร, กำลัง 1 มิลลิวัตต์
- ความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร, กำลัง 15 มิลลิวัตต์
- ความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร, กำลัง 5 มิลลิวัตต์

### 3. ไมโครโมเนเตอร์ (monochromator)

ทำหน้าที่แยกแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ โดยไดอะแกรมของไมโครโมเนเตอร์แสดงในรูปที่ 3.3 หลักการคือเมื่อแสงเข้ามาทางสลิต (slit) จะสะท้อนผ่านกระจก (folding mirror) ไปตกกระทบที่คอลลิเมตติง (collimating mirror) และสะท้อนไปยังเกรตติง (grating) เกรตติงจะให้แสงที่ความยาวคลื่นต่างตามการตกกระทบบนเกรตติงและแสงจากเกรตติงจะสะท้อนกลับไปยังคอลลิเมตติงสะท้อนกระจกออกไปยังสลิตต่อไป ไมโครโมเนเตอร์ที่ใช้ในการทดลองเป็นรุ่น digital monochromator Model SDMC1-04, ช่วงความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร -1200 นาโนเมตร

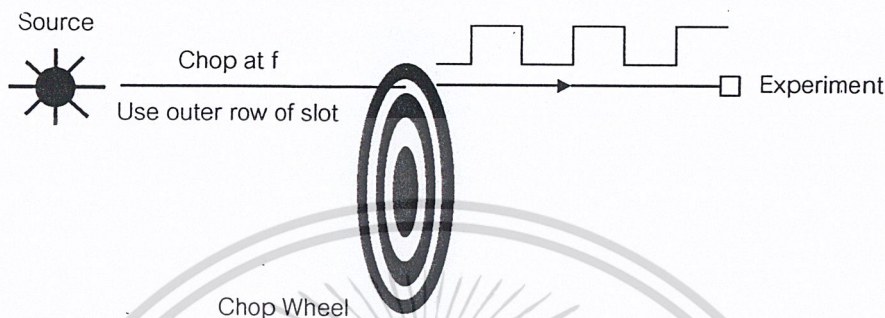


รูปที่ 3.3 ไดอะแกรมของไมโครโมเนเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. ตัวตัดแสง (Chopper)

ทำหน้าที่ตัดแสงของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ในลักษณะของสัญญาณพัลส์โดยสัญญาณที่ผ่านตัวตัดแสงเป็นสัญญาณ a.c. ดังแสดงดังรูปที่ 3.4 ซึ่งเป็นรุ่น Stanford research system model SR540



รูปที่ 3.4 สัญญาณเมื่อผ่านตัวตัดแสง

#### 5. ตัวตรวจวัดสัญญาณ (detector)

ทำหน้าที่เปลี่ยนความเข้มแสงให้อยู่ในรูปของกระแสและแรงดัน โดยที่ตัวตรวจวัดสัญญาณเจอร์มาเนียม (Ge-detector) ให้สัญญาณในรูปของกระแส และตัวตรวจวัดสัญญาณซิลิกอน (Si-detector) ให้สัญญาณในรูปของแรงดัน โดยในระบบวัดมีการใช้ตัวตรวจวัดสัญญาณต่างๆ ดังต่อไปนี้

- ตัวตรวจวัดสัญญาณซิลิกอนที่มีความยาวคลื่น 350-1100 นาโนเมตร
- ตัวตรวจวัดสัญญาณเจอร์มาเนียมที่มีความยาวคลื่น 600-1720 นาโนเมตร

#### 6. เลนส์

ทำหน้าที่ให้ความเข้มแสงที่จุดความยาวโฟกัสของเลนส์ โดยความยาวโฟกัสพิจารณาจากระยะทางและความเหมาะสมของระบบวัดโดยในระบบวัดมีการใช้เลนส์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

- ความยาวโฟกัส 100 มิลลิเมตร
- ความยาวโฟกัส 50 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ตัวกรองแสง (Filter)

ทำหน้าที่กรองแสงที่ความยาวคลื่นช่วงที่สนใจต่างๆ ซึ่งในระบบวัดที่มีการใช้ตัวกรองแสงนั้นก็เพื่อต้องการกรองแสงในช่วงความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ออก โดยในระบบวัดมีการใช้ตัวกรองแสงต่างๆ ดังต่อไปนี้

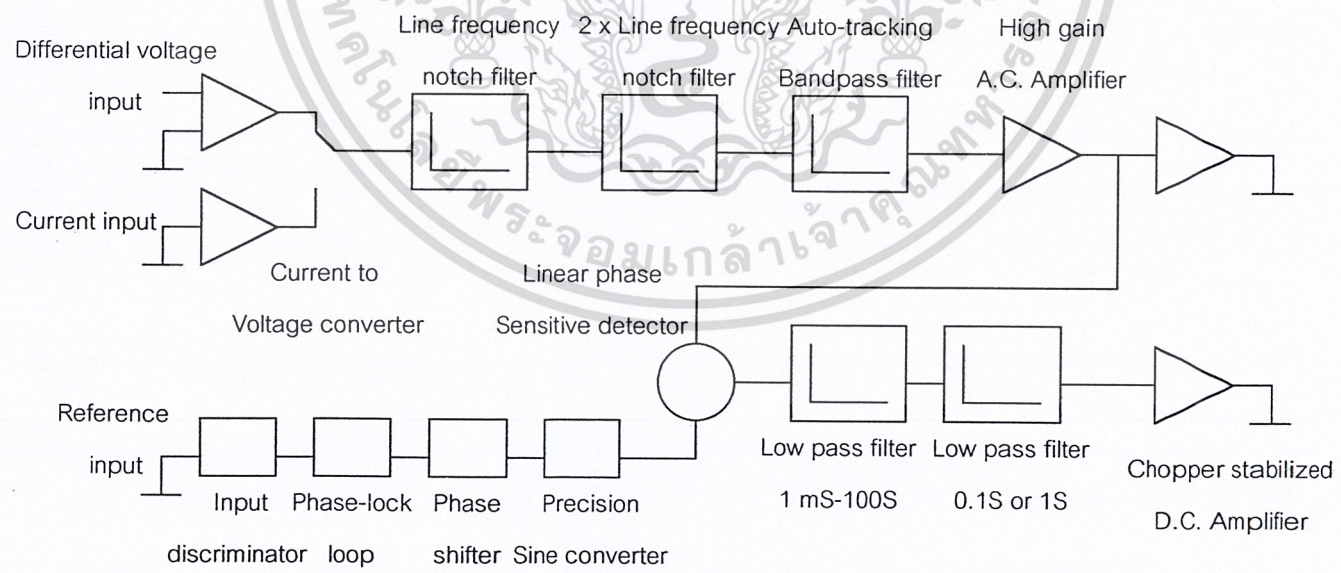
- ตัวกรองแสงโดยให้แสงที่ความยาวคลื่นสูงกว่า 750 นาโนเมตร ผ่านได้
- ตัวกรองแสงโดยให้แสงที่ความยาวคลื่นสูงกว่า 650 นาโนเมตร ผ่านได้

8. แทนียึดสาร

ทำหน้าที่ยึดสารกึ่งตัวนำและปรับมุมของการสะท้อนไปยังตัวตรวจจับสัญญาณ

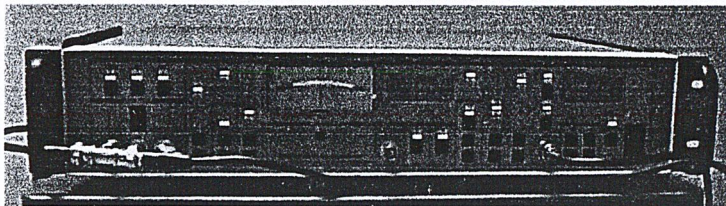
9. เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน (Lock in Amplifier)

ทำหน้าที่ขยายสัญญาณโดยสัญญาณที่ป้อนเข้า (signal input) จะถูกเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิง (reference input) ในรูปของสัญญาณ  $\cos\phi$  ซึ่งไดอะแกรมของเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินดังแสดงตามรูปที่ 3.5 และภาพของเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินตามรูปที่ 3.6 ซึ่งเป็นรุ่น Stanford research system model Model SR 510



รูปที่ 3.5 ไดอะแกรมของเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินรุ่น SR510

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 เครื่องขยายสัญญาณแบบล็คอินในระบบวัด

#### 10. สเตปปีงมอเตอร์ (stepping motor)

ทำหน้าที่ควบคุมการหมุนของเกaredติงภายในโมโนโครเมเตอร์โดยการสั่งงาน ควบคุมสเตปปีงมอเตอร์แบบพัลสเตปนั้น เป็นการสั่งงานโดยจ่ายกระแสไฟฟ้าพร้อมกันที่เดียวสองเฟส (two-excitation) คือคู่เฟสระหว่างเฟส 1-2, 2-3, 3-4 และ 4-1 หมุนเวียนกันไปโดยค่าของแต่ละสเตปคือ

0 0 1 1 0 0 1 1 (เฟส 1-2)

0 1 1 0 0 1 1 0 (เฟส 2-3)

1 1 0 0 1 1 0 0 (เฟส 3-4)

1 0 0 1 1 0 0 1 (เฟส 4-1)

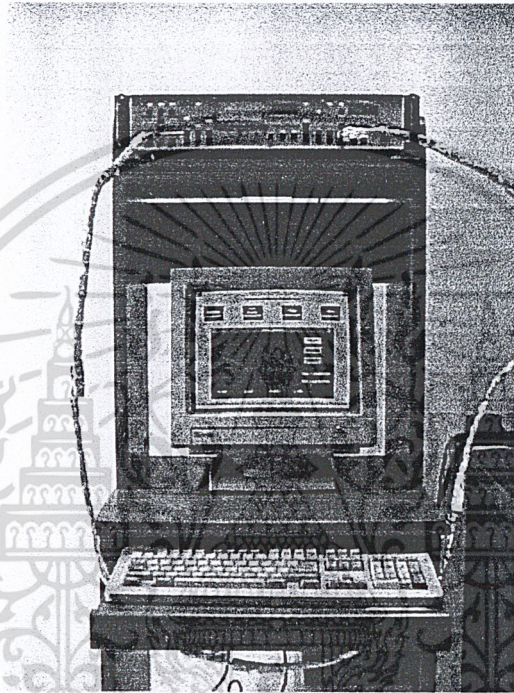


รูปที่ 3.7 สเตปปีงมอเตอร์ในระบบวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 11. ไมโครคอมพิวเตอร์ (microcomputer)

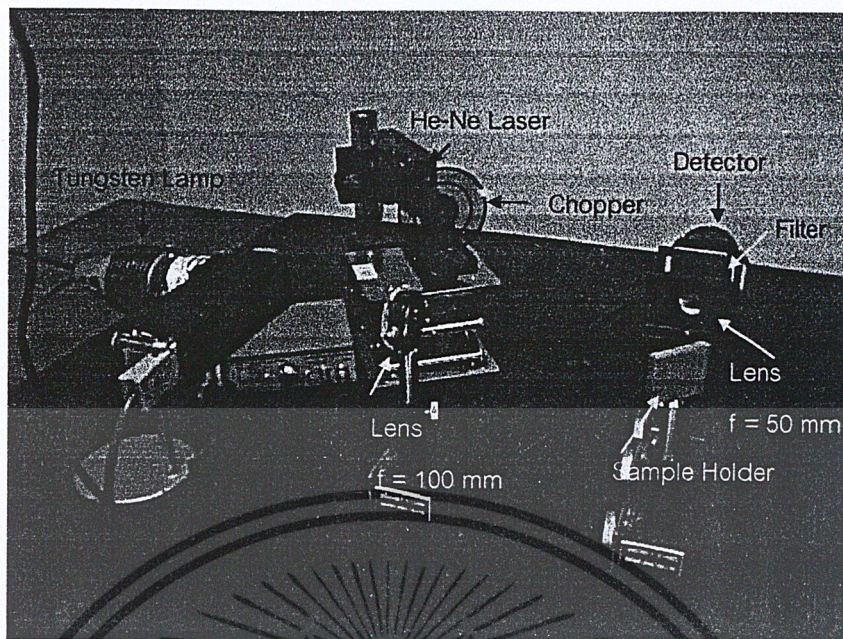
ทำหน้าที่ควบคุมสเตปปีงมอเตอร์ (stepping motor) โดยควบคุมการหมุน เกรตติงภายใน ไมโครเมตรทำให้ได้แสงความยาวคลื่นต่างๆ และรับข้อมูลจากเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินผ่านทาง RS-232 เพื่อทำการเก็บข้อมูลในรูปของค่ารีเฟลกติวิตีซึ่งชุดของไมโครคอมพิวเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.8



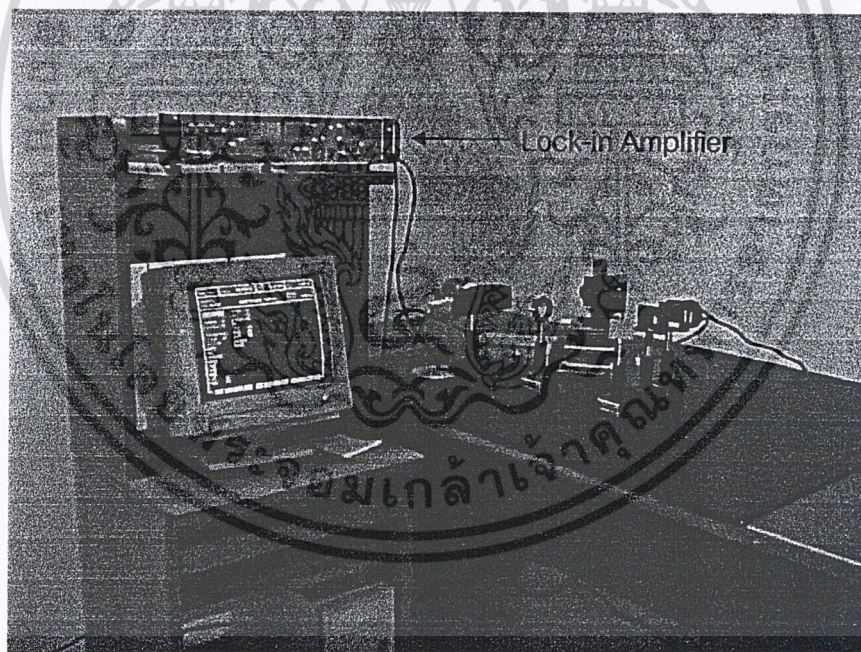
รูปที่ 3.8 ไมโครคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมการทำงานของระบบวัด

จากองค์ประกอบทั้งหมดนำมาติดตั้งระบบตามรูปที่ 3.9 ซึ่งในการติดตั้งระบบวัดนั้นทำการจัดตำแหน่งที่เหมาะสมตามรูป 3.9(ก) และรูป 3.9(ข) ในกรณีที่รวมไมโครคอมพิวเตอร์ในการควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) การจัดตำแหน่งที่เหมาะสมของระบบวัด



ข) ระบบวัดโดยมีไมโครคอมพิวเตอร์ควบคุม

รูปที่ 3.9 ระบบวัดฟลูออโรสเปกโทรสโกปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 สร้างโปรแกรมควบคุมระบบวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์สเปกโทรสโกปี

โปรแกรมระบบวัดถูกเขียนขึ้นโดยภาษาปาสคาลทำงานร่วมกับภาษาแอสเซมบลีโดยมีรายละเอียดของโปรแกรมน้อยดังต่อไปนี้

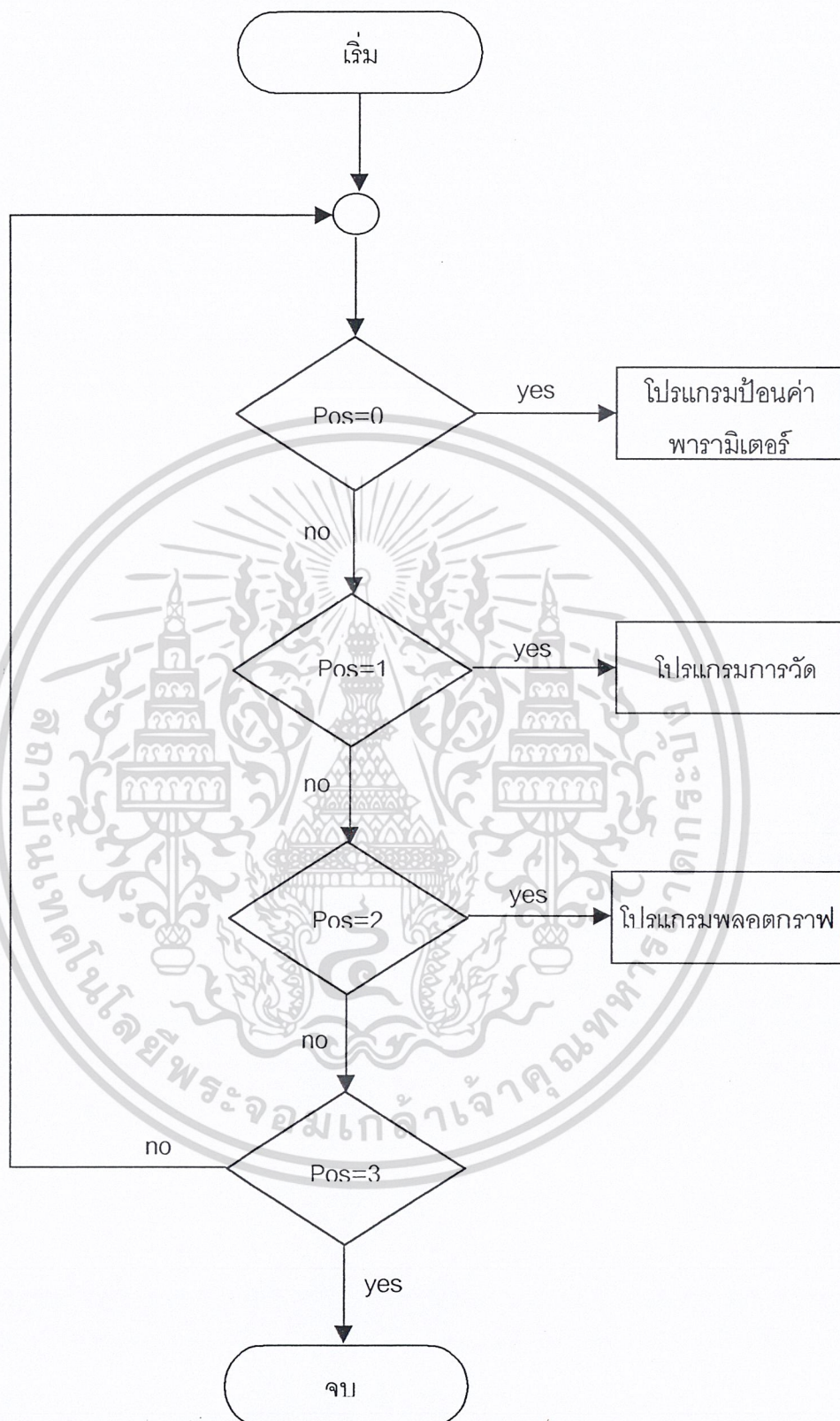
โปรแกรมหลักดังแสดงในผังการทำงาน (flow chart) รูปที่ 3.10 จะมีการเลือกการป้อนค่าพารามิเตอร์ การวัดค่า การพลอตกราฟ และออกจากโปรแกรมโดยจากผังงาน pos หมายถึงตำแหน่งของการเลือกตำแหน่ง (โดยการกด ENTER) โดยที่ pos(0) คือการป้อนค่าพารามิเตอร์ pos(1) คือการวัด pos(2) คือการพลอตกราฟ และ pos(3) คือการออกจากโปรแกรม

โปรแกรมการป้อนข้อมูลตามผังการทำงานรูปที่ 3.11 เริ่มต้นคือการอ่านค่าเริ่มต้น (initial) จากนั้นถ้าต้องการเปลี่ยนแปลงข้อมูลในค่าเริ่มต้นทำการคีย์ข้อมูลโดยในการคีย์ข้อมูลจะเป็นการบันทึกใหม่แทนที่ข้อมูลในค่าเดิม เมื่อเสร็จแล้วโปรแกรมจะรอการกดแป้น ESC เมื่อออกจากโปรแกรมจะกลับเข้าสู่โปรแกรมหลัก

โปรแกรมการวัดตามผังการทำงานรูปที่ 3.12 เริ่มต้นคือการเปิดค่าจากค่าเริ่มต้น จากนั้นทำการวัดโดยเริ่มบันทึกค่าจากเครื่องขยายสัญญาณแบบลือคอินโดยผ่านมาทาง RS-232 เข้าทางไมโครคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกเก็บไว้ในอาร์เรย์ (array) และจะทำการควบคุมสเตปมอเตอร์โดยกำหนดให้หมุนไปจนครบตามจำนวนโดยสิ้นสุดที่ความยาวคลื่นสุดท้าย เมื่อทำการวัดเสร็จแล้วจากนั้นจะบันทึกค่าที่อยู่ในอาร์เรย์ลงในไฟล์ข้อมูล

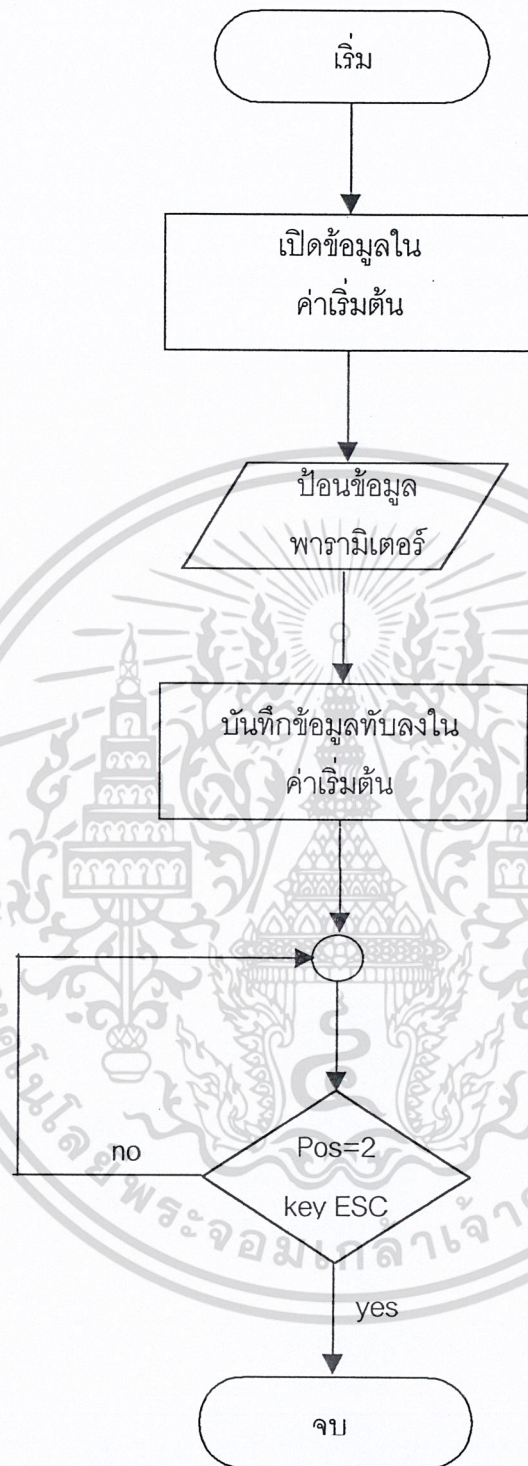
โปรแกรมการพลอตกราฟตามผังการทำงานรูปที่ 3.13 เริ่มต้นคือจะมีการเลือกจากการกดคีย์ โดย pos หมายถึงตำแหน่งของการเลือกเลือกตำแหน่ง (โดยการกด ENTER) โดยที่ pos(0) คือการอ่านจากอาร์เรย์เพื่อพลอตกราฟ pos(1) คือการเคลียร์หน้าจอการพลอตกราฟ และ pos(2) คือการออกจากโปรแกรมพลอตกราฟ

ซึ่งโปรแกรมถูกรวมเข้าด้วยกันซึ่งอยู่ในชื่อไฟล์ PR.EXE โดยมีหน้าหลักของโปรแกรมตามรูปที่ 3.14 ซึ่งในเมนูหลักของโปรแกรมจะประกอบไปด้วย ส่วนของการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการวัดดังแสดงในรูปที่ 3.15 ส่วนของการวัด และส่วนของการพลอตกราฟดังแสดงในรูปที่ 3.16



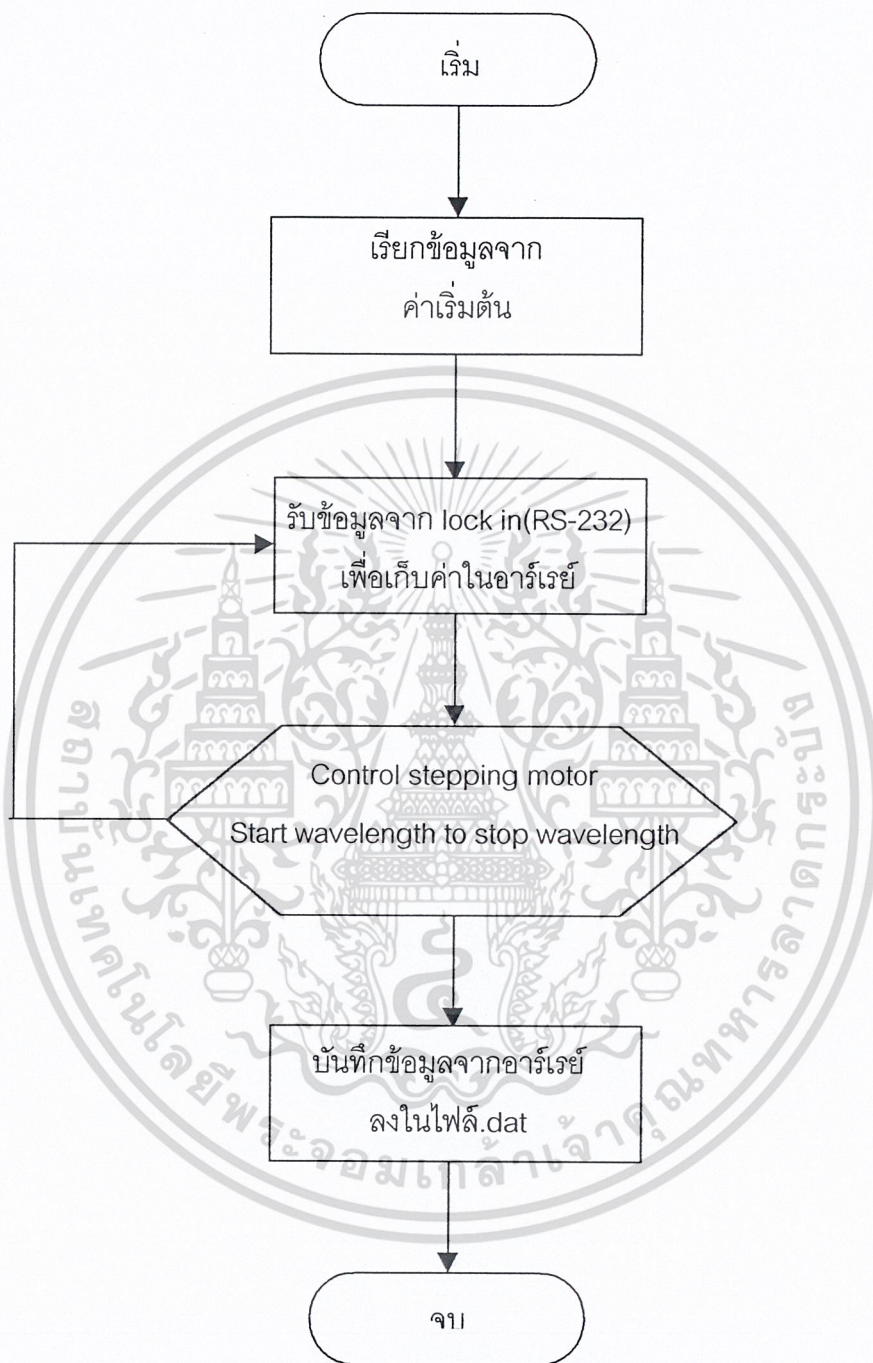
รูปที่ 3.10 ผังการทำงานของโปรแกรมหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



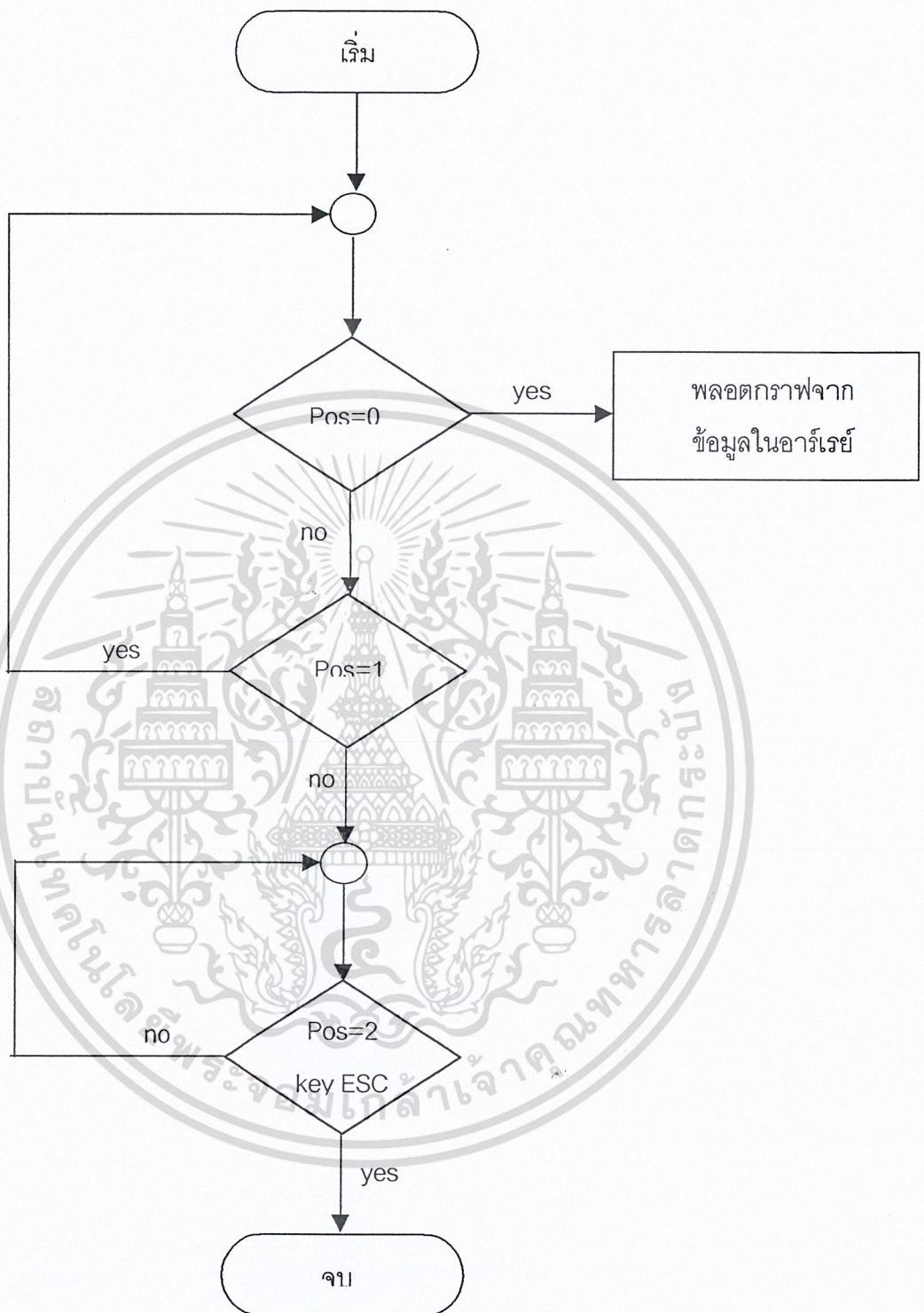
รูปที่ 3.11 ผังการทำงานของโปรแกรมป้อนค่าพารามิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



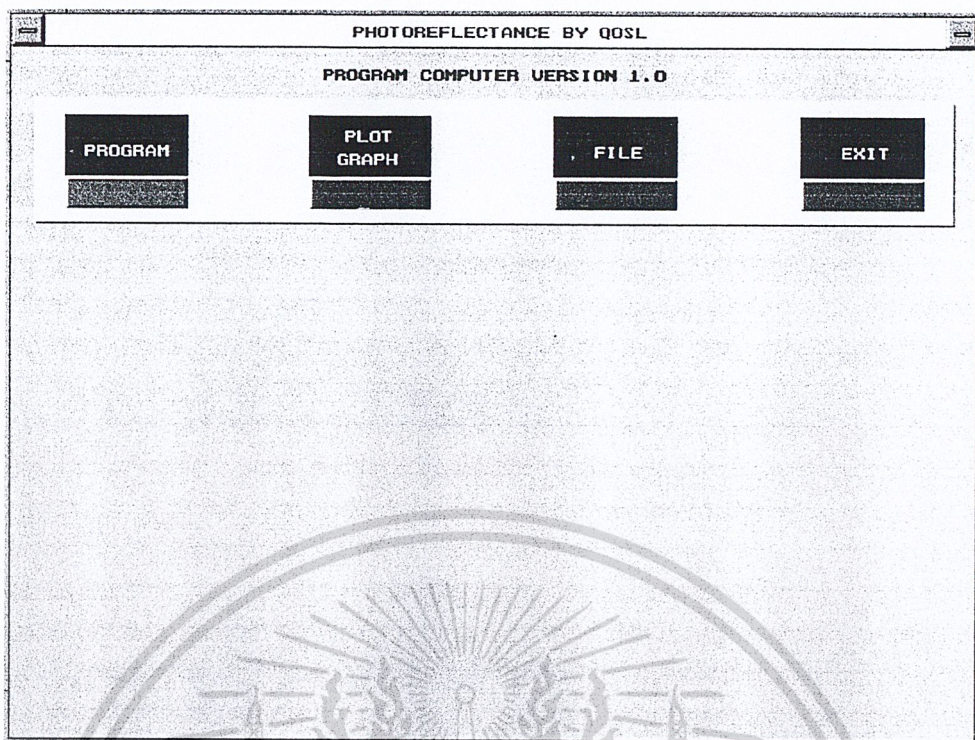
รูปที่ 3.12 ผังการทำงานของโปรแกรมการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

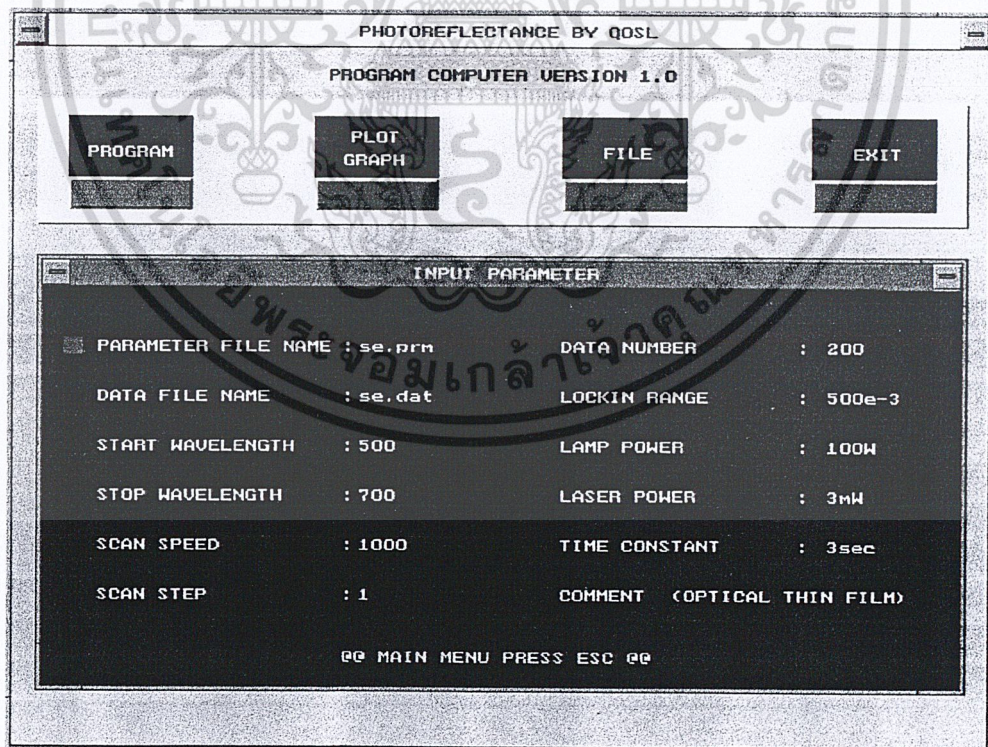


รูปที่ 3.13 ผังการทำงานของโปรแกรมการพลอตกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

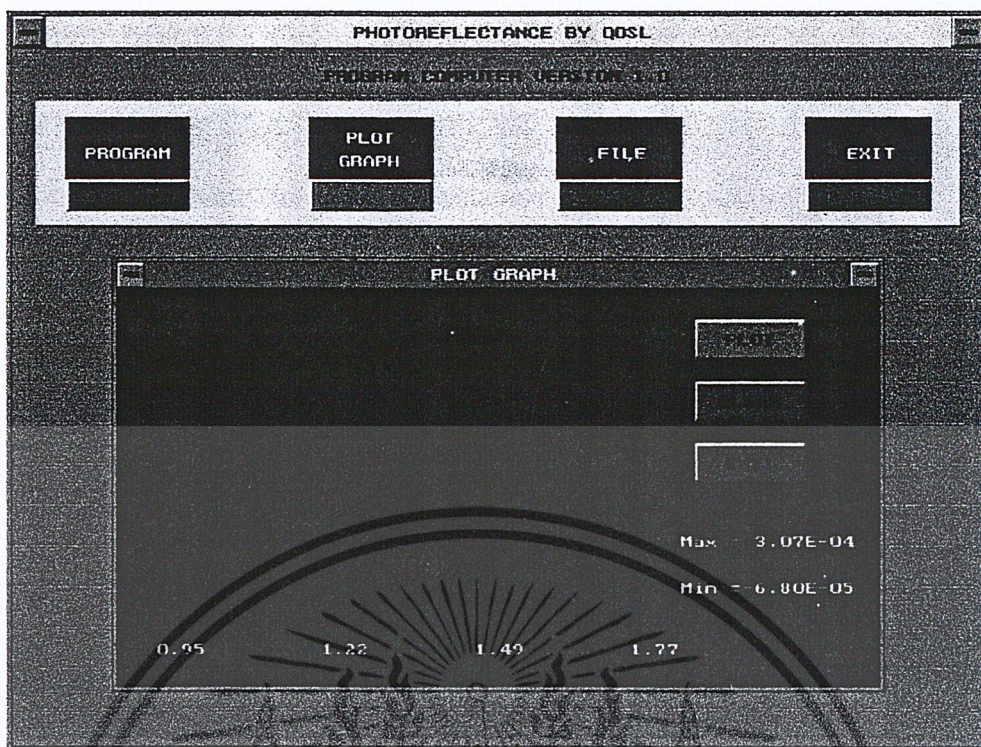


รูปที่ 3.14 เมนูหลักของโปรแกรม



รูปที่ 3.15 ส่วนของการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



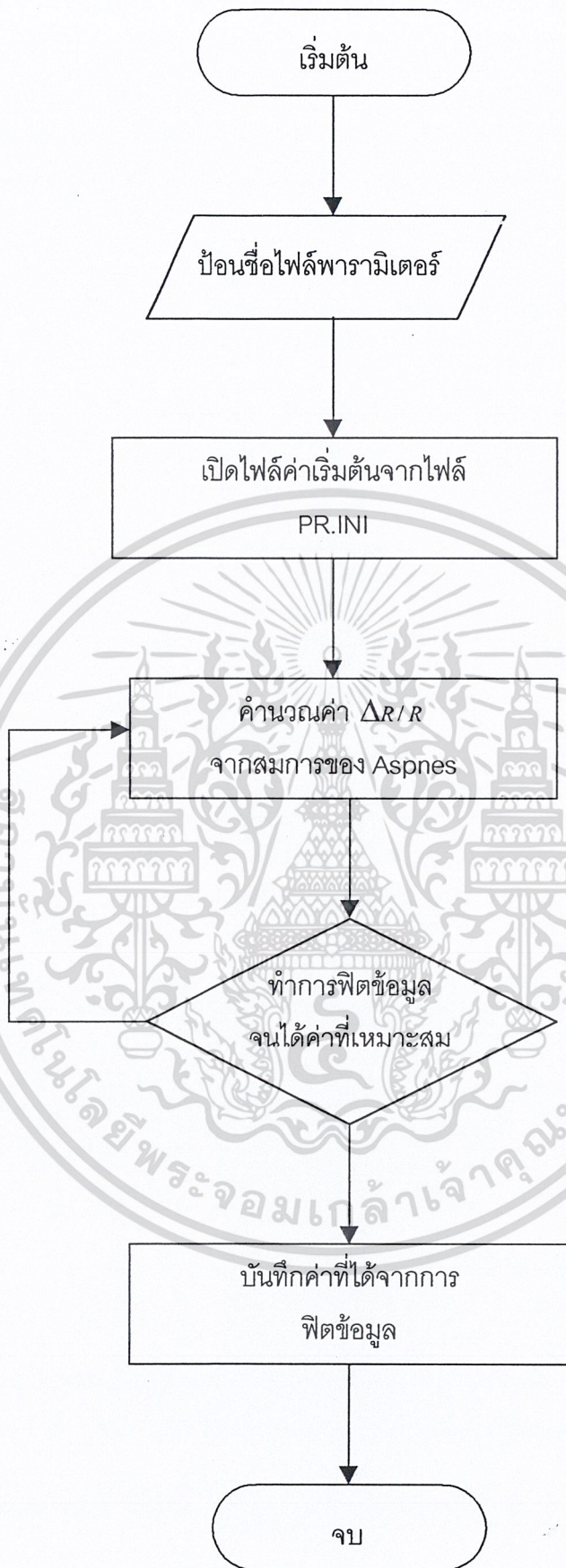
รูปที่ 3.16 ส่วนของการพลอตกราฟ

### 3.3 สร้างโปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมเพื่อหาค่าแถบพลังงานต้องห้าม

โปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูลเป็นโปรแกรมการพิตข้อมูล พารามิเตอร์ต่างๆ ถูกเขียนขึ้นด้วยภาษา ซี จากสมการที่ 2.37 ซึ่งเป็นสมการของ Aspnes ซึ่งขั้นตอนของโปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูลคือ กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใกล้เคียงกับค่าพารามิเตอร์ของสารกึ่งตัวนำทำการรันโปรแกรมโปรแกรม จะทำการพิตค่าที่เหมาะสมกับสเปกตรัมที่ได้จากการวัดเมื่อได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดโปรแกรมจะหยุดการทำงาน จากนั้นก็จะสามารถหาค่าของแถบพลังงานได้ ขั้นตอนทั้งหมดแสดงเป็นผังการทำงานตามรูปที่ 3.17

โปรแกรมการพิต ตามผังการทำงานรูปที่ 3.17 เริ่มต้นจากการรันโปรแกรม PRDATA.EXE บนไฟล์พารามิเตอร์ซึ่งในไฟล์พารามิเตอร์จะมีชื่อไฟล์ข้อมูลอยู่เพื่อเรียกต่อไปจากนั้นโปรแกรมจะทำการเปิดไฟล์ค่าเริ่มต้นจากไฟล์ PR.INI จากนั้นทำการพิตไฟล์ข้อมูลโดยอ้างอิงจากค่าที่เหมาะสมในไฟล์ค่าเริ่มต้น เมื่อโปรแกรมทำการพิตข้อมูลจนได้ค่าที่เหมาะสมแล้วจะออกจากการทำงานและไปบันทึกค่าที่ได้จากการพิตข้อมูล ในชื่อไฟล์ PR.FIT ซึ่งค่าที่ได้จากการพิตข้อมูลจะถูกบันทึกอยู่ในไฟล์ PR.FIT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

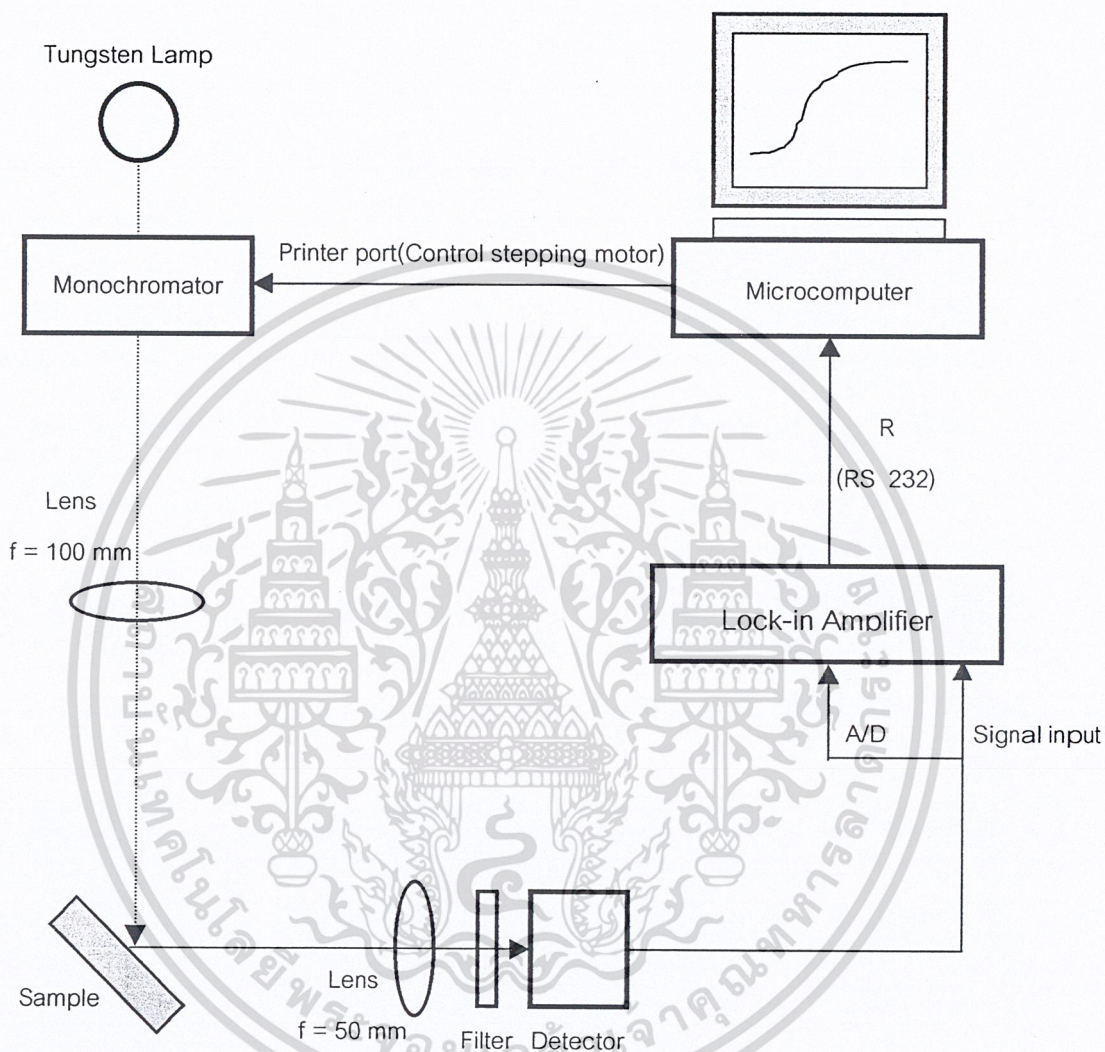


รูปที่ 3.17 ผังการทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การวัดสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์

#### 3.4.1 การวัดสเปกตรัมการสะท้อนของแสงของสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์ และซีลีเนียม



รูปที่ 3.18 แสดงระบบวัดการสะท้อนของแสง

การวัดสเปกตรัมการสะท้อนของแสงเพื่อเป็นการเปรียบเทียบสเปกตรัมการสะท้อนของแสงของสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์และซีลีเนียม โดยทำการวัดตั้งแต่ 700 นาโนเมตร ถึง 1300 นาโนเมตร ที่อุณหภูมิห้อง ความถี่ของตัววัดแสง 450 เฮิรตซ์ และมีการเก็บข้อมูลทุกๆ 1 นาโนเมตร ด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ โดยทำการจัดระบบวัดตามรูปที่ 3.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.2 การวัดสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์สารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์

ในการวัดสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ได้ทดลองกับสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์มาตรฐานซึ่งปลูกผลึกโดยวิธี OMVPE กับระบบวัดต้นแบบที่สร้างขึ้นตามรูปที่ 3.9 โดยทำการวัดสเปกตรัมตั้งแต่ความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร ถึง 1300 นาโนเมตร ที่อุณหภูมิห้อง ความถี่ของตัวตัดแสง 450 เฮิร์ตซ์ แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์มีความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร กำลังเอาต์พุต 5 มิลลิวัตต์ มีการเก็บข้อมูลทุกๆ 1 นาโนเมตรโดยไม่โครคอมพิวเตอร์

### 3.4.3 การวัดสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์สารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์

#### ในกรณีที่เปลี่ยนความถี่ของตัวตัดแสง

ในการวัดสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ได้ทดลองกับระบบวัดต้นแบบที่สร้างขึ้นตามรูปที่ 3.9 โดยทำการวัดสเปกตรัมตั้งแต่ความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร ถึง 1300 นาโนเมตร ที่อุณหภูมิห้อง แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร กำลังเอาต์พุต 5 มิลลิวัตต์ และทำการเปลี่ยนความถี่ของตัวตัดแสง ที่ 450 เฮิร์ตซ์ 750 เฮิร์ตซ์ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ 1.25 กิโลเฮิร์ตซ์ 1.5 กิโลเฮิร์ตซ์ 1.75 กิโลเฮิร์ตซ์ 2 กิโลเฮิร์ตซ์ 2.25 กิโลเฮิร์ตซ์ 2.5 กิโลเฮิร์ตซ์ 2.75 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 3 กิโลเฮิร์ตซ์ ตามลำดับ มีการเก็บข้อมูลทุกๆ 1 นาโนเมตรโดยไม่โครคอมพิวเตอร์ การเปลี่ยนความถี่ของตัวตัดแสงเพื่อเป็นการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของความถี่ที่เกิดขึ้นจากตัวตัดแสงที่มีต่อสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์

### 3.4.4 การวัดสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์สารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์

#### ในกรณีที่เปลี่ยนความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์

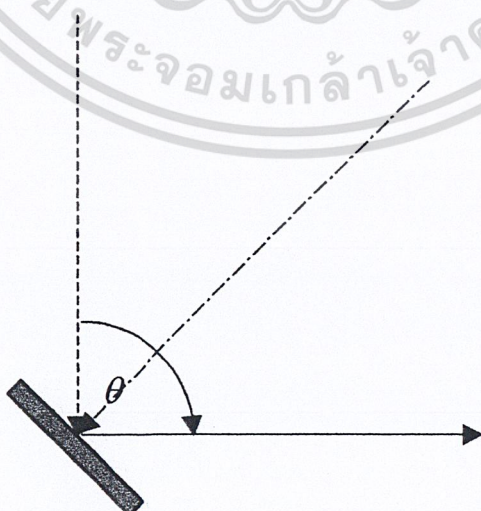
ในการวัดสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ได้ทดลองกับระบบวัดต้นแบบที่สร้างขึ้นตามรูปที่ 3.9 โดยทำการวัดสเปกตรัมตั้งแต่ความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร ถึง 1300 นาโนเมตร ที่อุณหภูมิห้อง ความถี่ของตัวตัดแสง 450 เฮิร์ตซ์ และทำการเปลี่ยนความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ ที่ 632.8 นาโนเมตร และ 650 นาโนเมตร มีการเก็บข้อมูลทุกๆ 1 นาโนเมตรโดยไม่โครคอมพิวเตอร์ เพื่อเป็นการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่มีต่อสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์

### 3.4.5 การวัดสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์สารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนต์ ในกรณีที่เปลี่ยนความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์

ในการวัดสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ได้ทดลองกับระบบวัดต้นแบบที่สร้างขึ้นตามรูปที่ 3.9 โดยทำการวัดสเปกตรัมตั้งแต่ความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร ถึง 1300 นาโนเมตร ที่อุณหภูมิห้อง ความถี่ของตัวตัดแสง 450 เฮิรตซ์ และทำการเปลี่ยนความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่มีกำลังเอาต์พุต 1 มิลลิวัตต์ และ 15 มิลลิวัตต์ โดยแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ทั้งสองมีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร มีการเก็บข้อมูลทุกๆ 1 นาโนเมตรโดยไมโครคอมพิวเตอร์ เพื่อเป็นการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่มีต่อสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์

### 3.4.6 การวัดสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์สารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนต์ ที่มุมระหว่างแนวแสงตกกระทบกับแนวแสงสะท้อนต่างๆ

ในการวัดสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ได้ทดลองกับระบบวัดต้นแบบที่สร้างขึ้นตามรูปที่ 3.9 โดยทำการวัดสเปกตรัมตั้งแต่ความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร ถึง 1300 นาโนเมตร ที่อุณหภูมิห้อง ความถี่ของตัวตัดแสง 450 เฮิรตซ์ แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์มีความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร กำลังเอาต์พุต 5 มิลลิวัตต์ และทำการทดลองเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างแนวแสงตกกระทบกับแนวแสงสะท้อนที่ 90 องศา 120 องศา และ 150 องศา โดยมุมระหว่างแนวแสงตกกระทบกับแนวแสงสะท้อนกำหนดตามรูปที่ 3.19 มีการเก็บข้อมูลทุกๆ 1 นาโนเมตรโดยไมโครคอมพิวเตอร์ เพื่อเป็นการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างแนวแสงตกกระทบกับแนวแสงสะท้อนที่มีต่อสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์

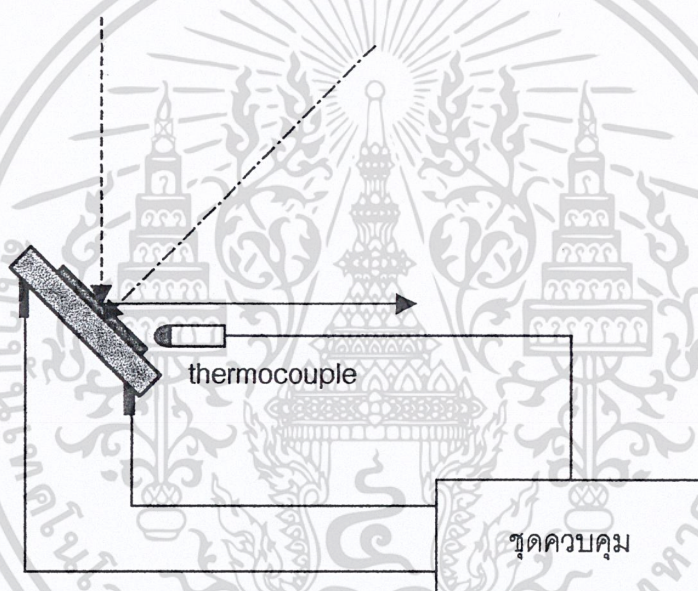


รูปที่ 3.19 แสดงการกำหนดมุมระหว่างแนวแสงตกกระทบกับแนวแสงสะท้อนในระบบวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.7 การวัดสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์สารกึ่งตัวนำแกเลียมอาร์เซไนด์ ที่อุณหภูมิต่างๆ

ในการวัดสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ได้ทดลองกับระบบวัดต้นแบบที่สร้างขึ้นตามรูปที่ 3.9 โดยทำการวัดสเปกตรัมตั้งแต่ความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร ถึง 1300 นาโนเมตร ความถี่ของตัวตัดแสง 450 เฮิรตซ์ แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์มีความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร กำลังเอาต์พุต 5 มิลลิวัตต์ และทำการทดลองเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน 310 เคลวิน 320 เคลวิน 330 เคลวิน 340 เคลวิน 350 เคลวิน และ 360 เคลวิน ตามลำดับ โดยการให้อุณหภูมิกับ sample ตามรูปที่ 3.20 มีการเก็บข้อมูลทุกๆ 1 นาโนเมตรโดยไมโครคอมพิวเตอร์เพื่อเป็นการศึกษาถึงการอุณหภูมิที่มีต่อสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์



รูปที่ 3.20 แสดงการควบคุมอุณหภูมิที่ให้แก่สารกึ่งตัวนำแกเลียมอาร์เซไนด์

การวัดสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์เป็นการวัดเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าของแถบพลังงาน ต้องห้ามกับค่าของอุณหภูมิจากสมการของ Varshni Empirical Equation [14-15] ดังสมการ

$$E(T) = E_0 - \frac{\alpha T^2}{\beta + T} \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย  $E(T)$  คือ ค่าของแถบพลังงานต้องห้ามที่อุณหภูมิ  $T$  ใดๆ  
 $E_0$  คือ ค่าของแถบพลังงานต้องห้ามที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน  
 $\alpha, \beta$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิของ Vashni  
 $T$  คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

โดยที่  $\alpha$  และ  $\beta$  มีค่าคงที่ จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิห้องสูงขึ้นค่าของแถบพลังงานต้องห้ามจะมีค่าลดลง



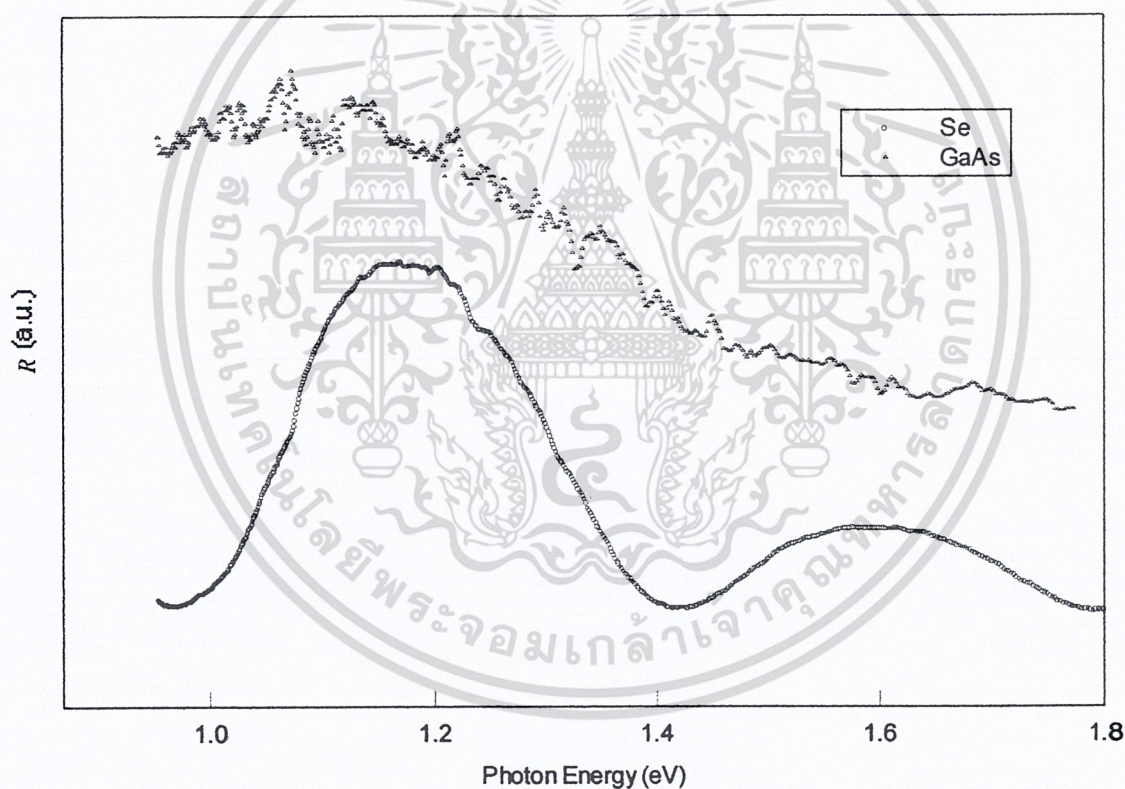
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการทดลองการวัดสเปกตรัมการสะท้อนของแสงของสารกึ่งตัวนำ แกลเลียมอาร์เซไนด์และซีลีเนียม

จากการทดลองวัดการสะท้อนของแสงของสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) และซีลีเนียม(Se) พบว่าสเปกตรัมของสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์มีสมบัติของการสะท้อนของแสงแบบเป็นเชิงเส้น(linear) และสเปกตรัมการสะท้อนของแสงของซีลีเนียมมีสมบัติการสะท้อนของแสงแบบไม่เป็นเชิงเส้น(nonlinear) สเปกตรัมการสะท้อนของแสงแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 สเปกตรัมการสะท้อนของแสงของสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์และซีลีเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลการทดลองการวิเคราะห์ข้อมูลจากสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ของสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์

การฉายแสงเลเซอร์เข้าไปยังสารกึ่งตัวนำจะทำให้เกิดการมอดูเลตขึ้นในสเปกตรัมของแสงที่สะท้อนออกมาจากสารเนื่องจากสนามไฟฟ้าในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าอนุพันธ์อันดับสามของฟังก์ชันไดอิเล็กตริกของสารกึ่งตัวนำ สเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์เป็นฟังก์ชันของพลังงานโฟตอน  $E = \hbar\omega$  ดังสมการ

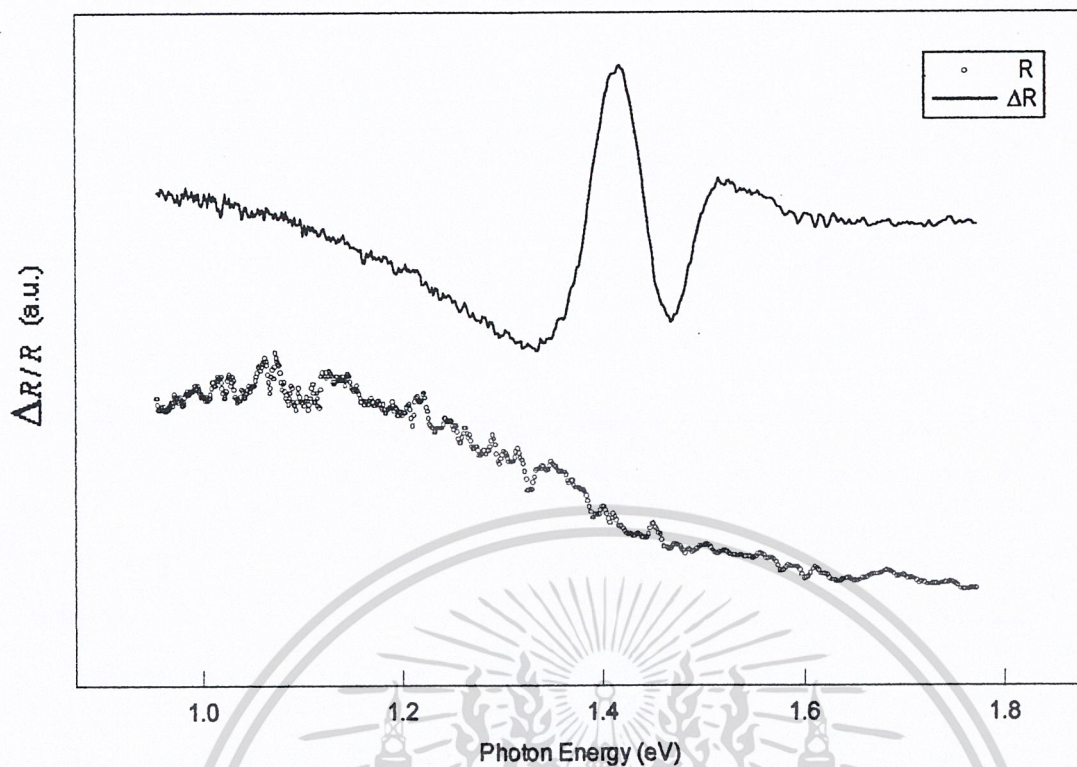
$$\frac{\Delta R}{R} = \text{Re} \left[ C e^{i\phi} (E - E_g + i\Gamma)^{-n} \right] \quad (4.1)$$

ในกรณี 3 มิติ  $n = 5/2$

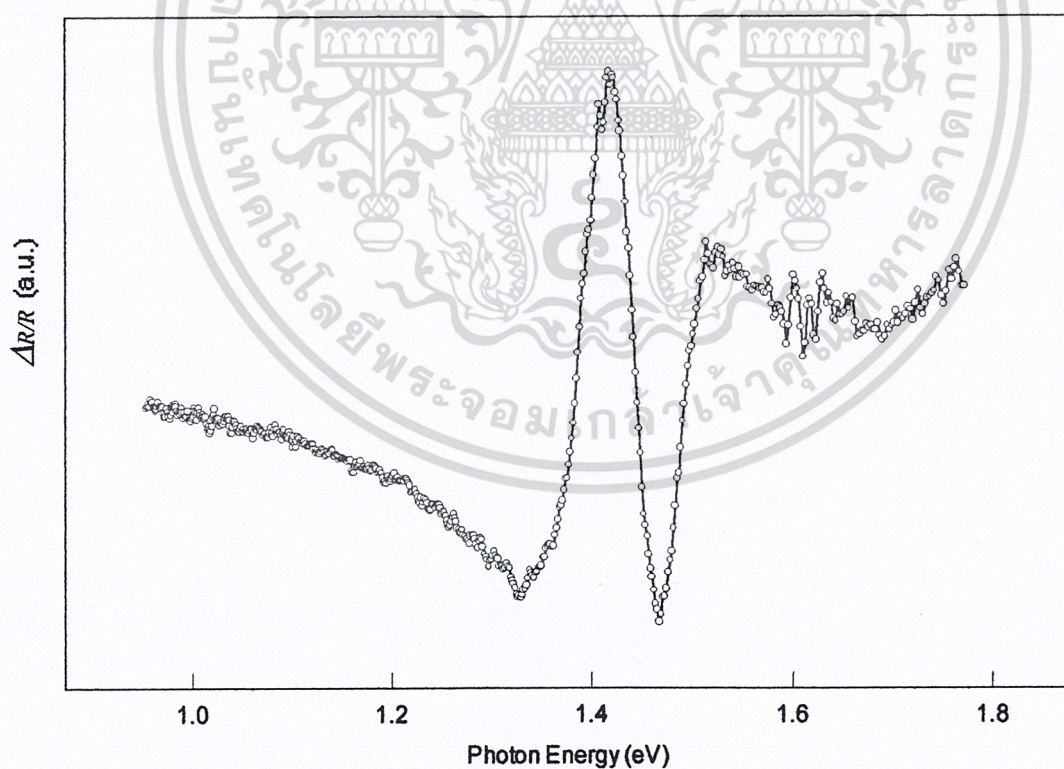
$C$	คือ แอมพลิจูด (amplitude)
$\phi$	คือ แฟกเตอร์เฟส (phase factor)
$E_g$	คือ แถบพลังงานต้องห้าม (energy gap)
$\Gamma$	คือ พารามิเตอร์ความกว้าง (broadening parameter)

จากการวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์จะได้สัญญาณ 2 ส่วนคือ  $R$  เป็นส่วนที่เกิดจากการสะท้อนของแสง (สัญญาณที่ไม่ถูกรบกวน) และสัญญาณ  $\Delta R$  เป็นส่วนของการสะท้อนของแสงเนื่องจากการมอดูเลต (สัญญาณที่ถูกรบกวน) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 จากนั้นสัญญาณทั้งสองจะถูกนำมาหารกัน ซึ่งจะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{\Delta R}{R}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าสเปกตรัมของโฟโต

รีเฟลกแทนซ์ที่ได้มีส่วนสูงปรากฏขึ้นมาเป็นยอดแหลม (peak) และจากสเปกตรัมของ  $\frac{\Delta R}{R}$  สามารถนำมาวิเคราะห์ข้อมูลจากสมการ (4.1) ซึ่งเป็นสมการของ Aspnes เพื่อหาค่าของแถบพลังงานต้องห้าม และพารามิเตอร์ต่างๆจากสมการของ Aspnes ได้



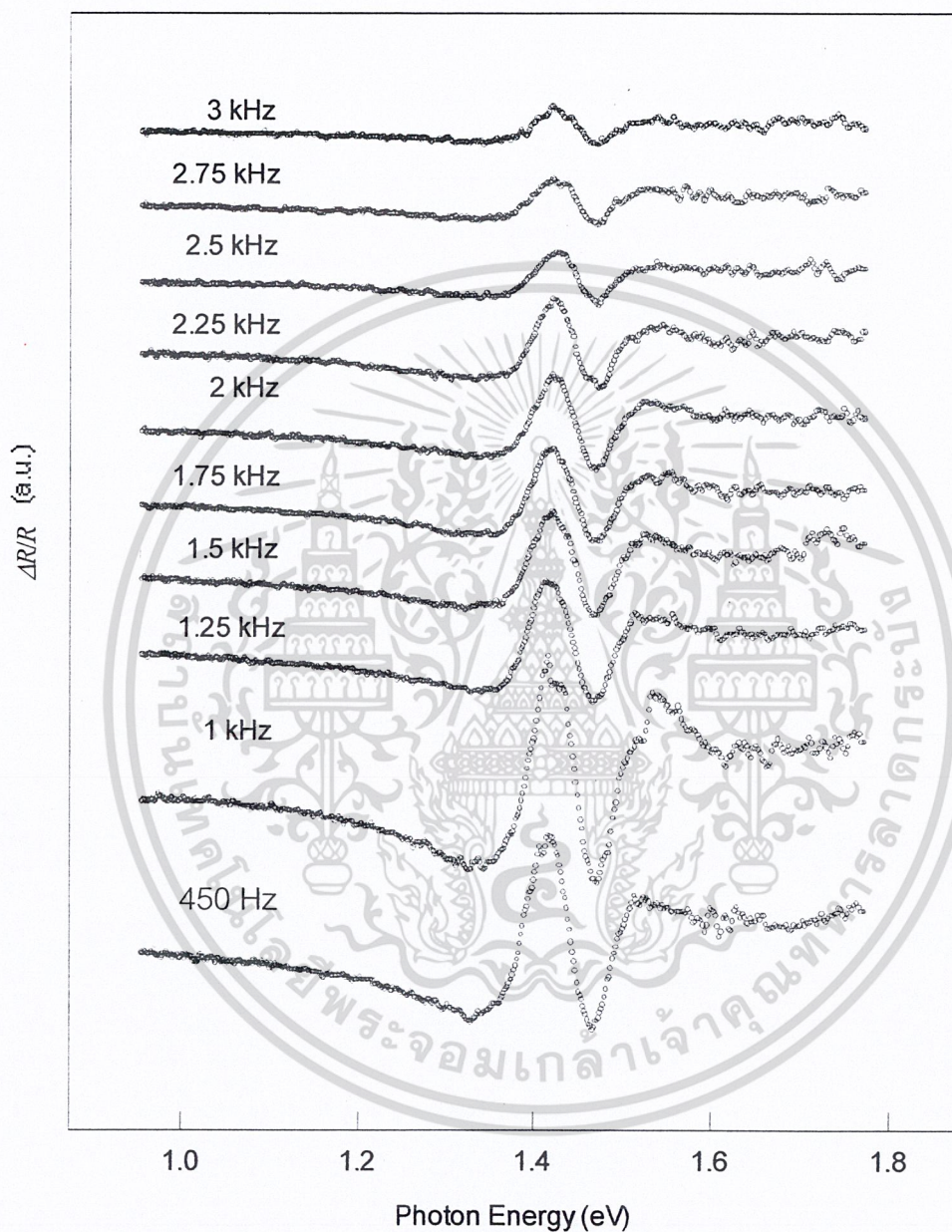
รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $R$  และ  $\Delta R$  กับค่าพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำ แกลเลียมอาร์เซไนด์



รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{\Delta R}{R}$  กับค่าพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำ แกลเลียมอาร์เซไนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

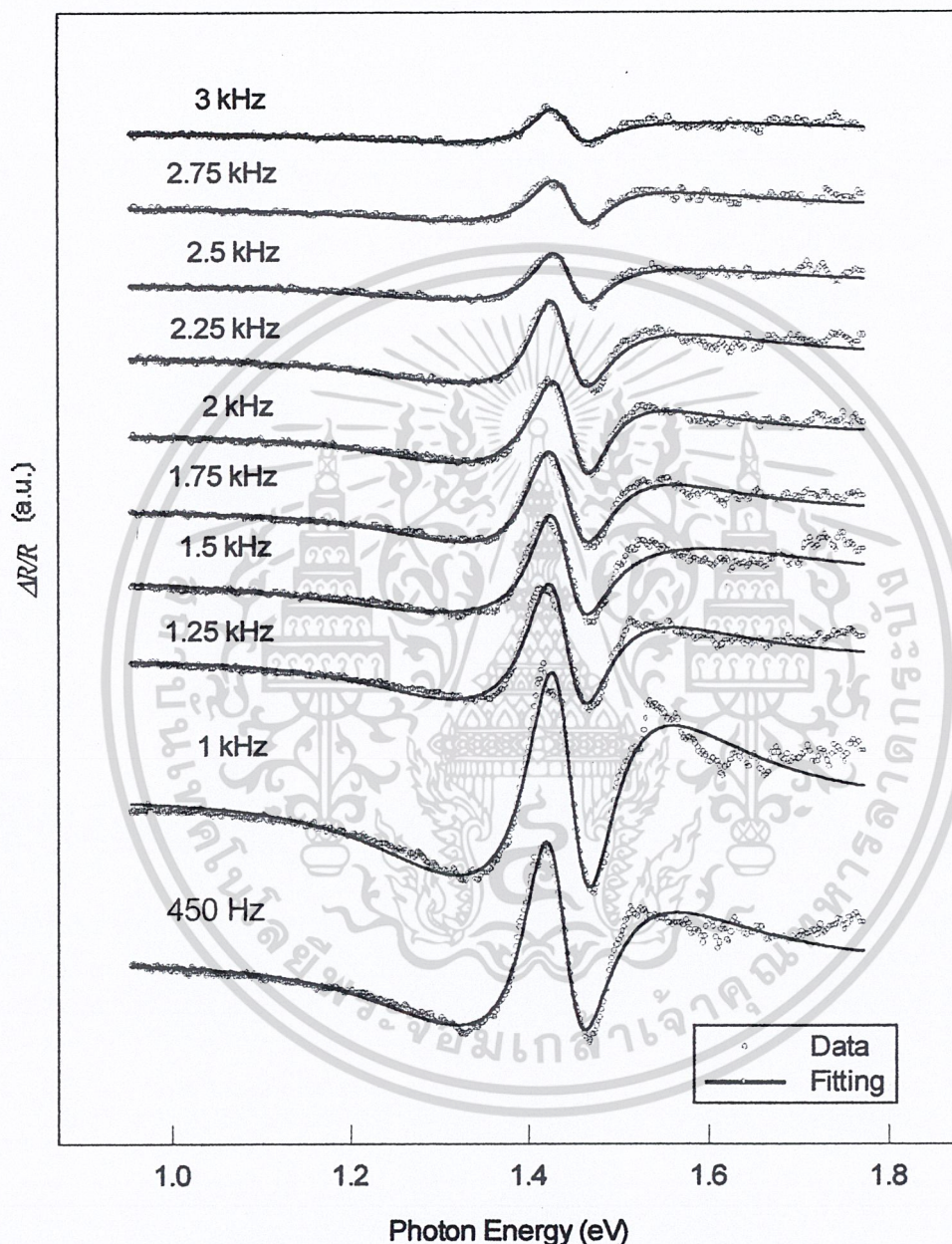
4.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลการวัดสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์สารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์ในกรณีที่เปลี่ยนความถี่ของตัวตัดแสง



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{\Delta R}{R}$  กับค่าพลังงานโฟตอนในกรณีที่เปลี่ยนความถี่ตัวตัดแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ในกรณีที่เปลี่ยนความถี่ของตัวตัดแสง ดังแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของยอดสเปกตรัม จากนั้นนำมาฟิตข้อมูลด้วยสมการของ Aspnes (สมการที่ (4.1)) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 เพื่อหาค่าของแถบพลังงานต้องห้ามและพารามิเตอร์ต่างๆจากสมการ



รูปที่ 4.5 แสดงการฟิตข้อมูลจากสเปกตรัมในกรณีที่เปลี่ยนความถี่ตัวตัดแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

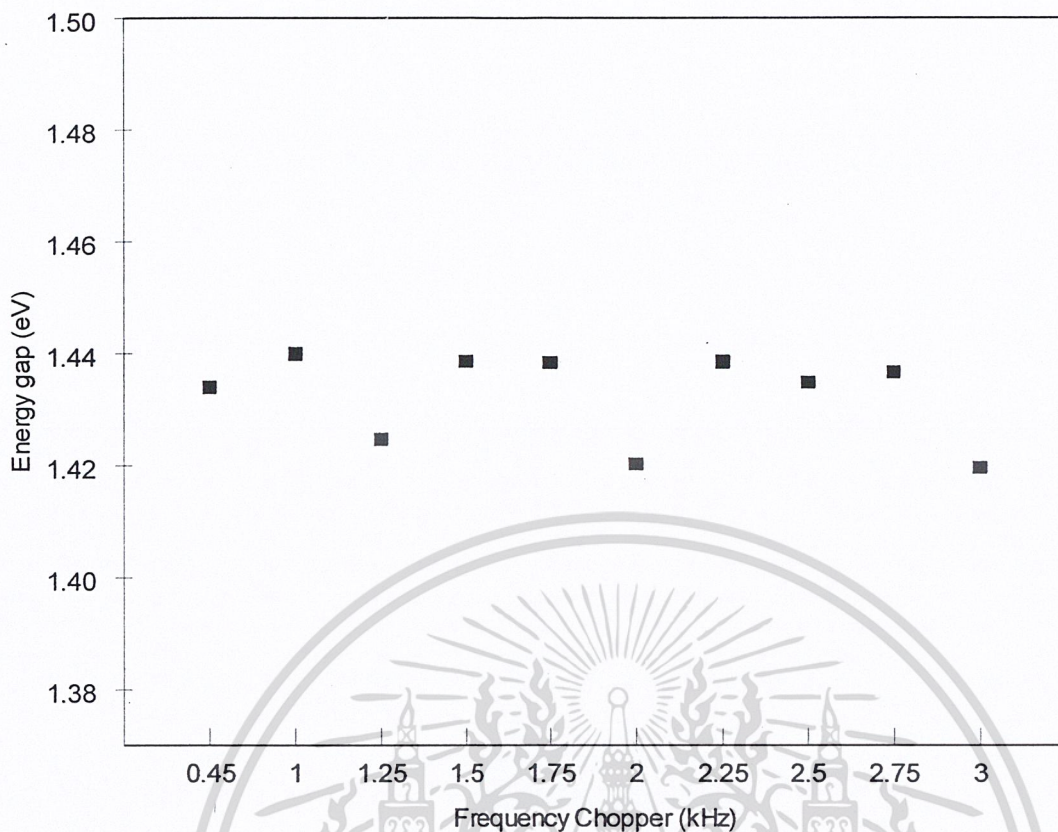
จากการฟิตข้อมูลทำให้ทราบถึงค่าของแถบพลังงานต้องห้าม พารามิเตอร์ความกว้าง แพกเตอร์เฟส และแอมพลิจูด ของสารกึ่งตัวนำแถบเลียมอาร์เซไนต์ในกรณีที่เปลี่ยนความถี่ตัวตัดแสงค่าต่างๆ โดยมีค่าตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการฟิตข้อมูลจากสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ในกรณีที่เปลี่ยนความถี่ของตัวตัดแสง

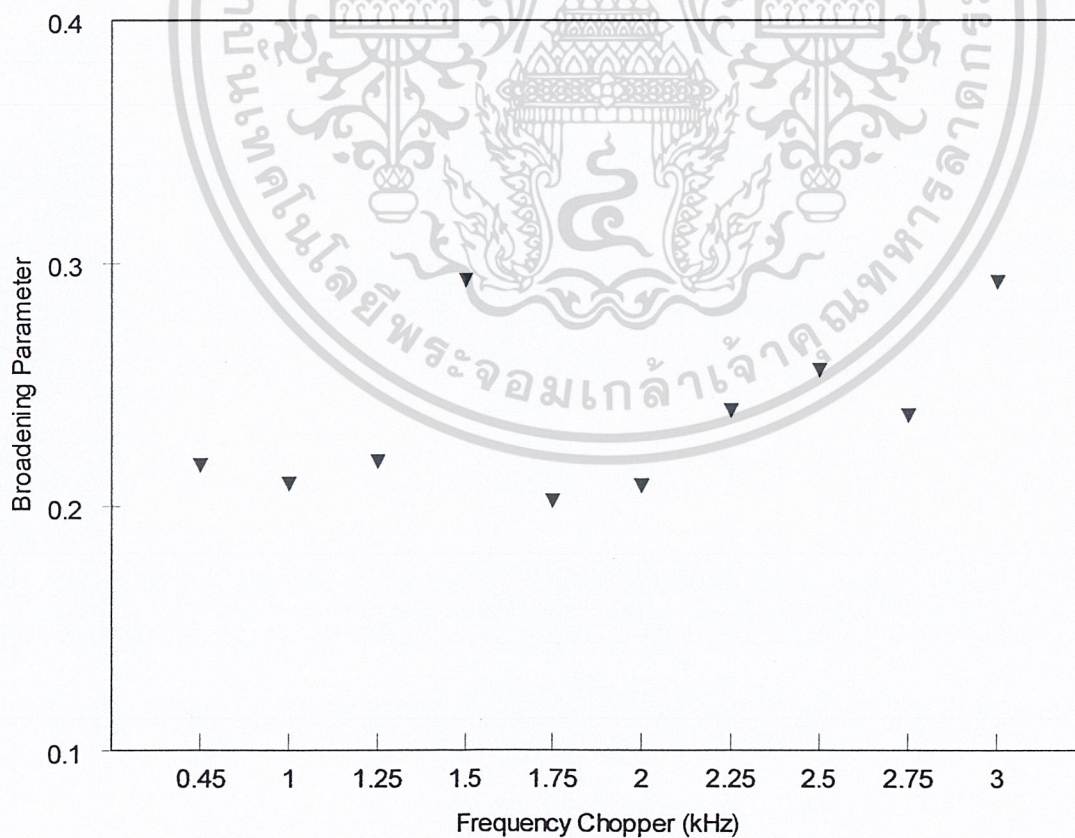
ความถี่	ค่าของพารามิเตอร์			
	$E_g$ (eV)	$\Gamma$ (eV)	$\phi$ (degrees)	แอมพลิจูด(a.u.)
450 Hz	1.43	0.22	42.59	1.21e-05
1 kHz	1.43	0.21	44.07	1.51e-05
1.25 kHz	1.42	0.22	41.98	7.83e-06
1.5 kHz	1.43	0.29	42.77	1.35e-05
1.75 kHz	1.43	0.20	43.50	5.26e-06
2 kHz	1.42	0.21	41.55	4.98e-06
2.25 kHz	1.43	0.24	42.52	6.24e-06
2.5 kHz	1.43	0.26	42.30	4.51e-06
2.75 kHz	1.43	0.24	44.47	3.58e-06
3 kHz	1.42	0.29	39.80	3.95e-06

นำค่าของแถบพลังงานต้องห้าม พารามิเตอร์ความกว้าง แพกเตอร์เฟส และแอมพลิจูด ที่ฟิตได้ดังแสดงในตารางที่ 4.1 มาพลอตเป็นกราฟให้เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับความถี่ ดังรูปที่ 4.6 4.7 4.8 และ 4.9

ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการฟิตข้อมูล ค่าของแถบพลังงานต้องห้าม พารามิเตอร์ความกว้าง และ แพกเตอร์เฟส นั้น พบว่าแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงคงที่ ในขณะที่แอมพลิจูดมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงมีค่าลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ ทั้งนี้เนื่องมาจากการกระตุ้นโดยพลังงานโฟตอนในกระบวนการเกิด และในขั้นตอนของกระบวนการรวมตัวใหม่นั้นในช่วงของการตกกลับเพื่อเข้าสู่กระบวนการรวมตัวใหม่ค่าของช่วงเวลาการตกกลับมีค่าสั้นลง (ความถี่สูง) ทำให้แอมพลิจูดของสเปกตรัมมีค่าลดลง

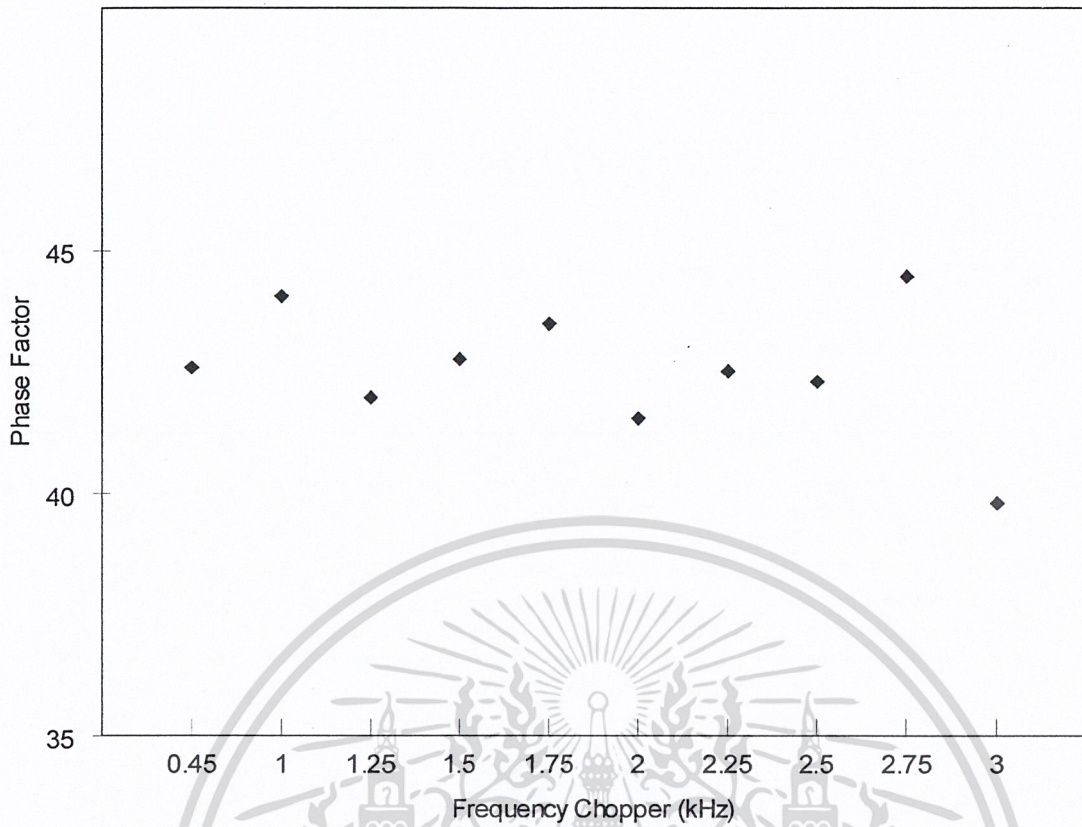


รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของแถบพลังงานต้องห้ามกับความถี่ของตัวตัดแสง

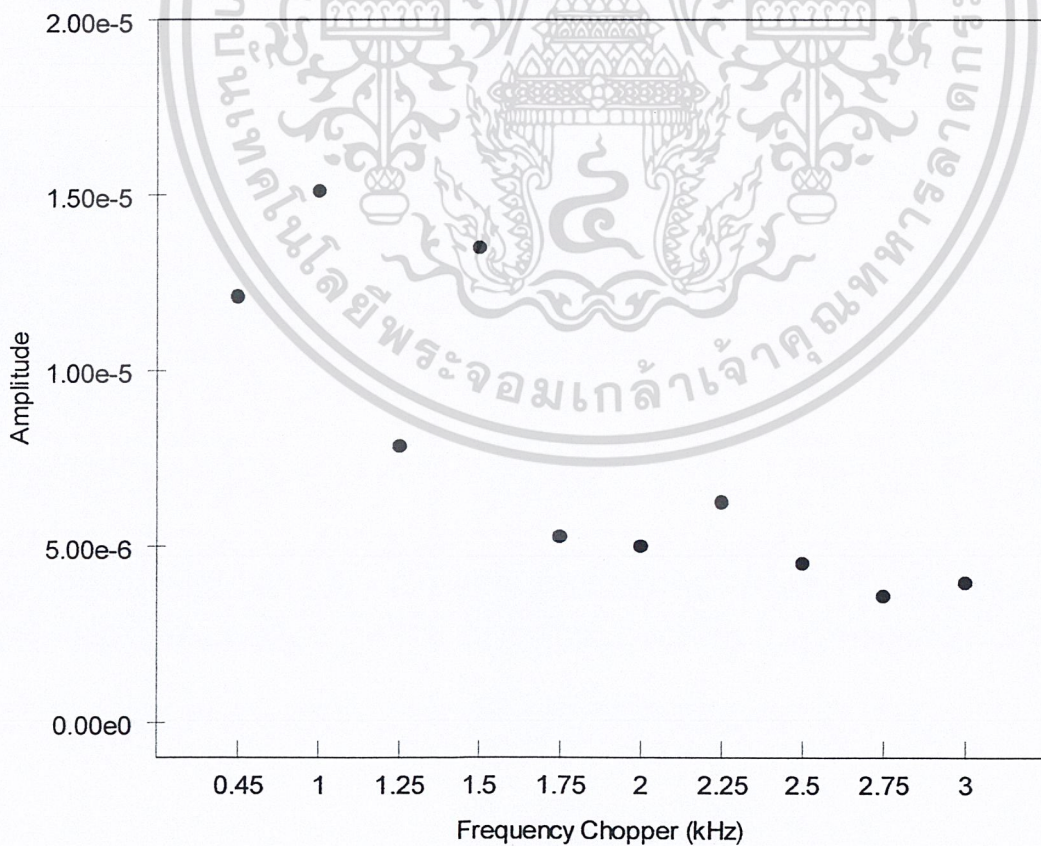


รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ความกว้างกับความถี่ของตัวตัดแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฟสเดอริเฟสกับค่าความถี่ของตัวตัดแสง

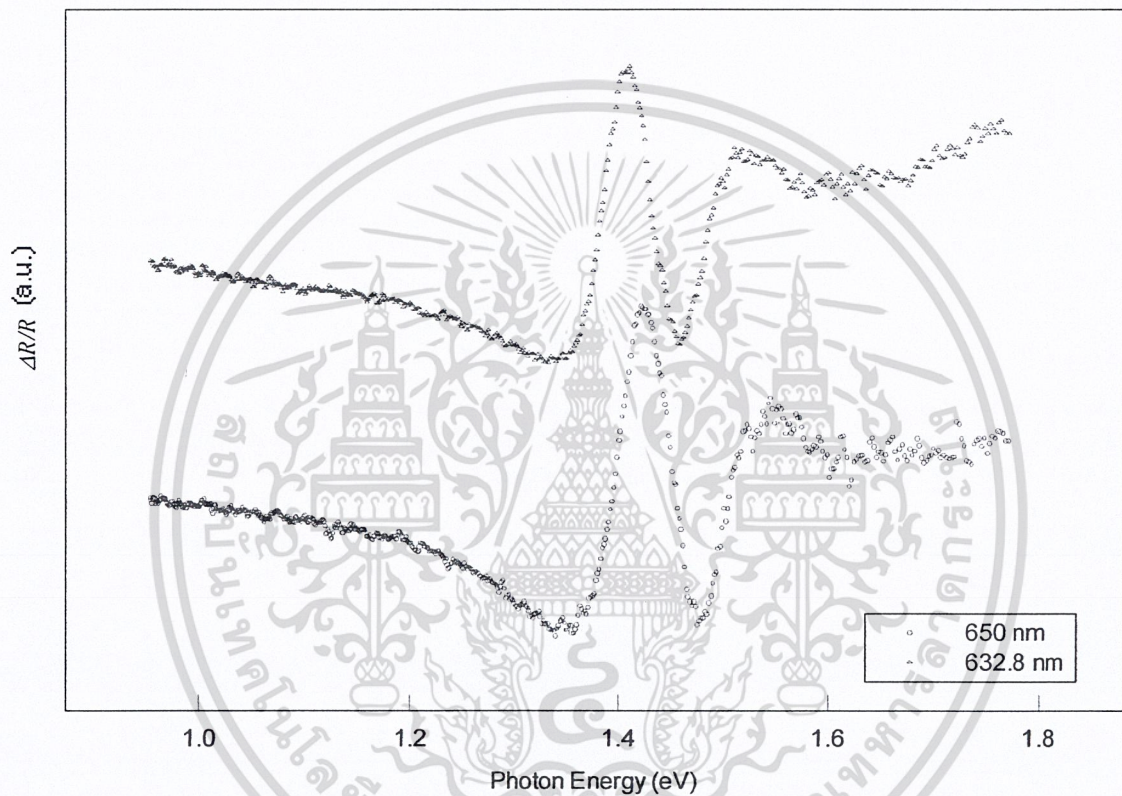


รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดกับค่าความถี่ของตัวตัดแสง

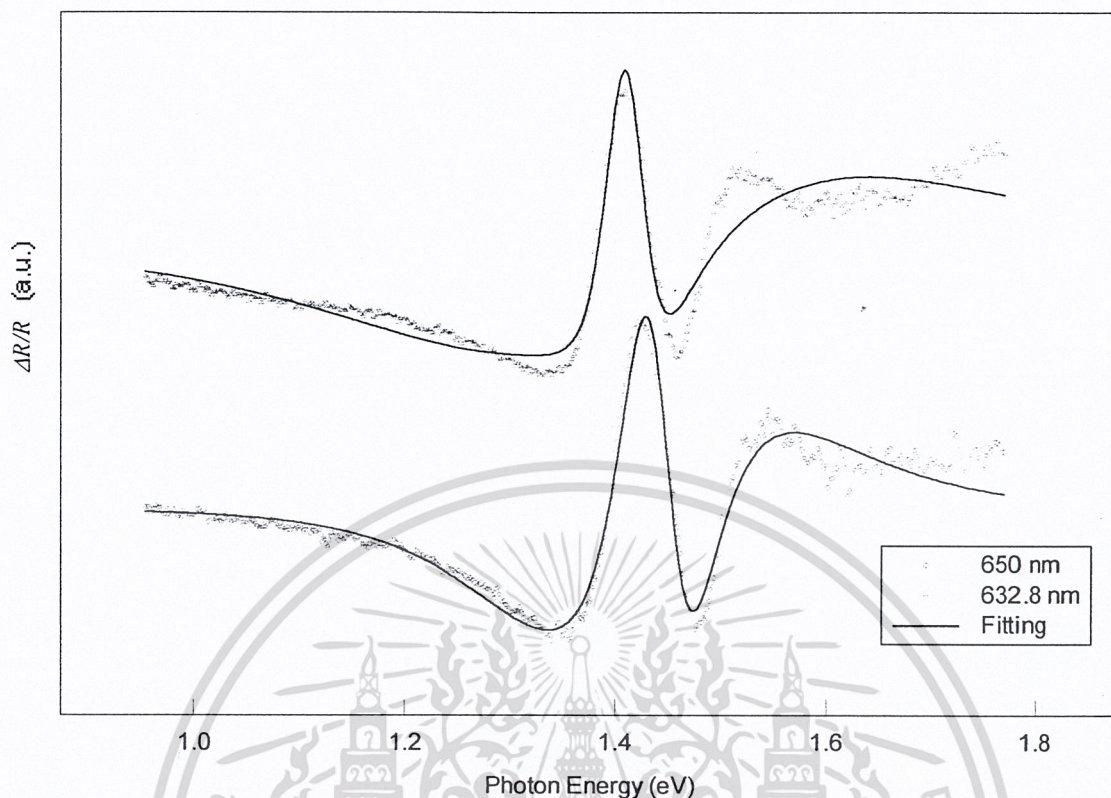
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลการวัดสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์สารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนต์ในกรณีที่เปลี่ยนความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์

สเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ในกรณีที่เปลี่ยนความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 จากนั้นนำมาฟิตข้อมูลด้วยสมการของ Aspnes (สมการที่ (4.1)) ดังรูปที่ 4.11 เพื่อหาค่าของแถบพลังงานต้องห้ามและพารามิเตอร์ต่างๆจากสมการ



รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{\Delta R}{R}$  กับค่าพลังงานโฟตอนในกรณีที่เปลี่ยนความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์



รูปที่ 4.11 แสดงการฟิตข้อมูลจากสเปกตรัมในกรณีที่เปลี่ยนความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์

จากการฟิตข้อมูลทำให้ทราบถึงค่าของแถบพลังงานต้องห้าม พารามิเตอร์ความกว้าง แพกเตอร์เฟส และแอมพลิจูด ของสารกึ่งตัวนำแกเลียมอาร์เซไนด์ในกรณีที่เปลี่ยนความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ โดยมีค่าดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการฟิตข้อมูลจากสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ในกรณีที่เปลี่ยนความถี่ยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์

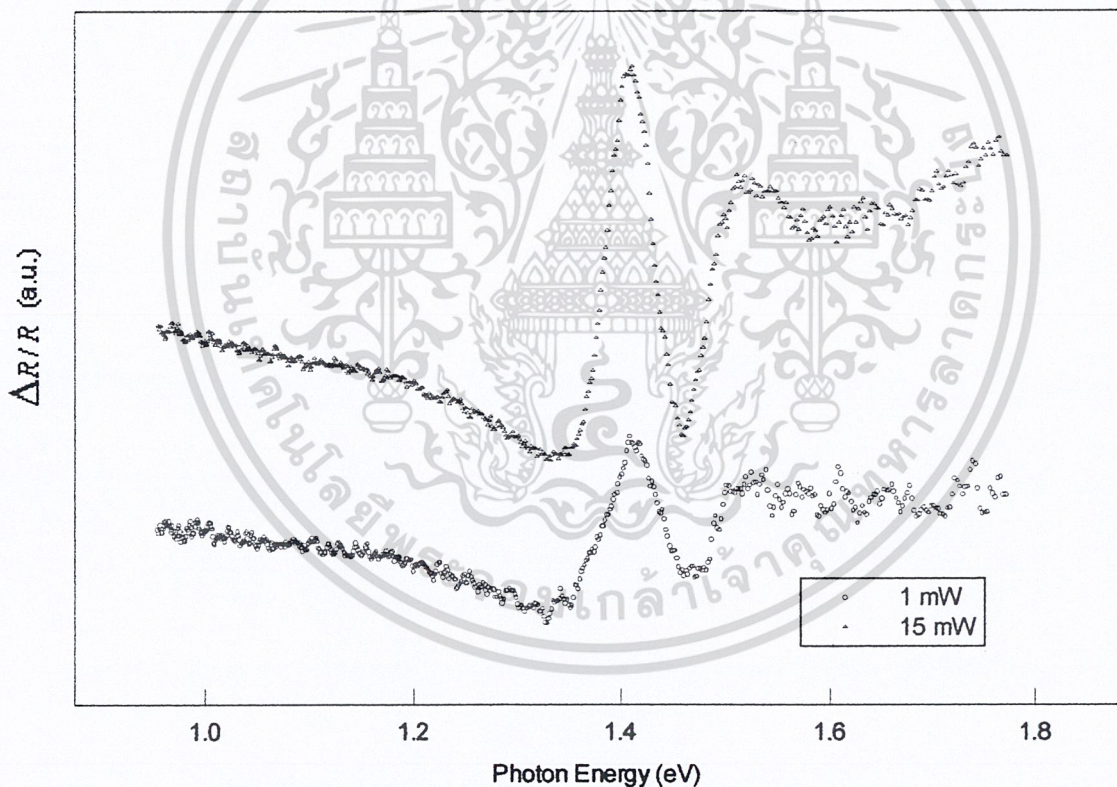
ความยาวคลื่น	ค่าของพารามิเตอร์			
	$E_g$ (eV)	$\Gamma$ (eV)	$\phi$ (degrees)	แอมพลิจูด(a.u.)
632.8 nm	1.42	0.37	38.82	9.69e-06
650 nm	1.43	0.19	40.01	2.47e-06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการฟิตข้อมูลสเปกตรัมตามตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์แอมพลิจูดของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่ความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร มีค่าสูงกว่าแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร เนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร มีค่าของพลังงานโฟตอนสูงกว่า

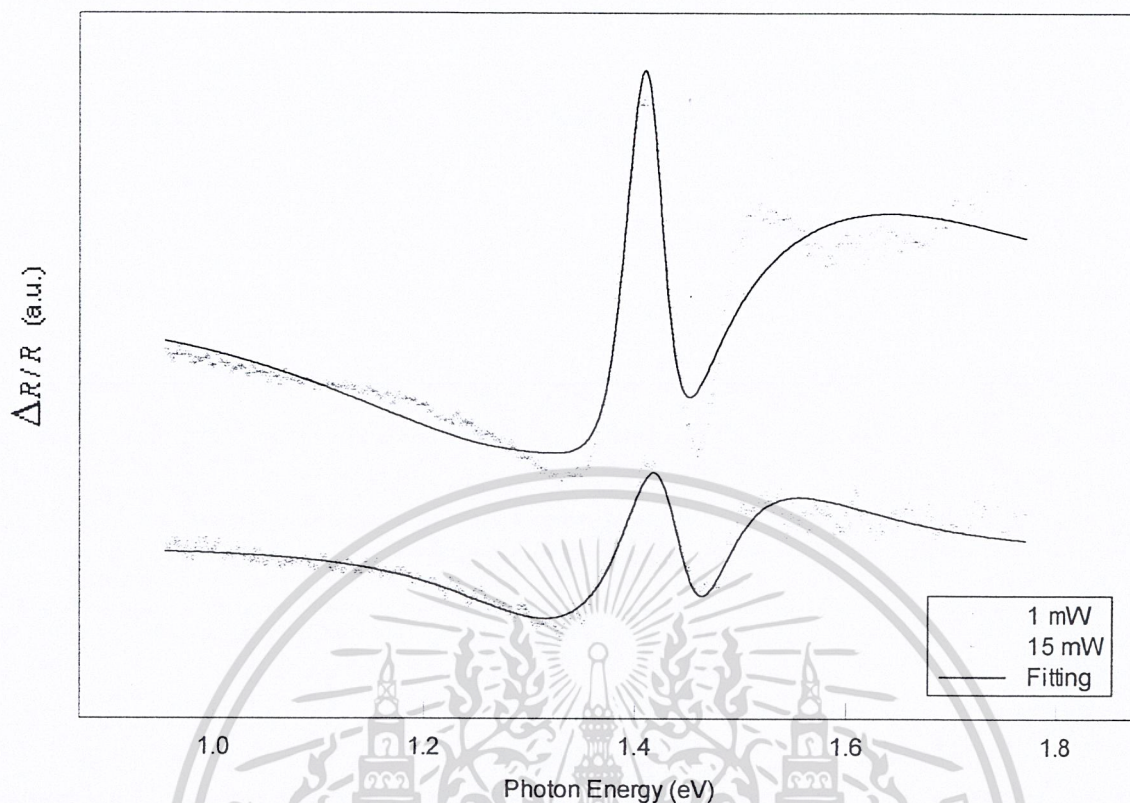
#### 4.5 ผลการทดลองวัดและการวิเคราะห์ข้อมูลการวัดสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์สารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนต์ในกรณีที่เปลี่ยนความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์

สเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ในกรณีที่เปลี่ยนความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 จากนั้นนำมาฟิตข้อมูลด้วยสมการของ Aspnes (สมการที่ (4.1)) ดังรูปที่ 4.13 เพื่อหาค่าของแถบพลังงานต้องห้ามและพารามิเตอร์ต่างๆจากสมการ



รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{\Delta R}{R}$  กับค่าพลังงานโฟตอนในกรณีที่เปลี่ยนความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 แสดงการฟิตข้อมูลจากสเปกตรัมในกรณีที่เปลี่ยนความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์

จากการฟิตข้อมูลทำให้ทราบถึงค่าของแถบพลังงานต้องห้าม พารามิเตอร์ความกว้าง แพลกเตอร์เฟส และแอมพลิจูด ของสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนต์ในกรณีที่เปลี่ยนความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ โดยมีค่าดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการฟิตข้อมูลจากสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ในกรณีที่เปลี่ยนความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์

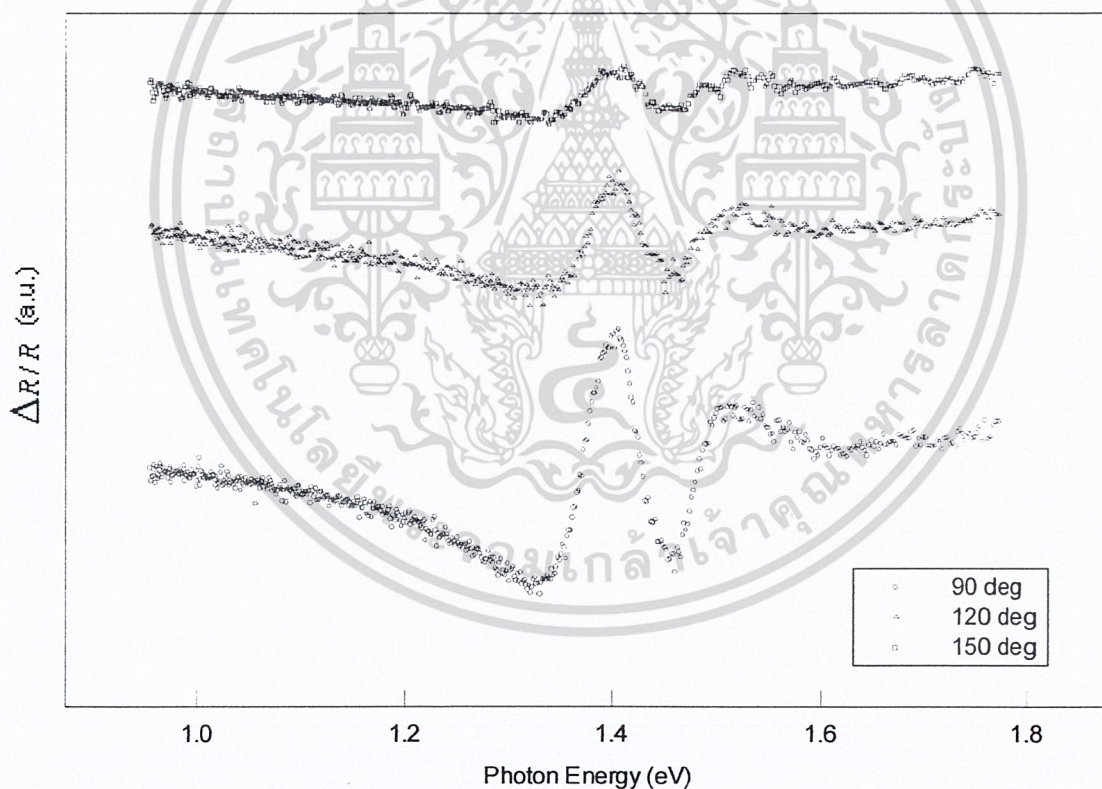
ความเข้มแสง	ค่าของพารามิเตอร์			
	$E_g$ (eV)	$\Gamma$ (eV)	$\phi$ (degrees)	แอมพลิจูด(a.u.)
1 mW	1.42	0.20	40.90	1.26e-06
15 mW	1.42	0.37	38.82	9.69e-06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการฟิตข้อมูลสเปกตรัมตามตารางที่ 4.3 พบว่าแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่มีกำลังเอาต์พุต 15 มิลลิวัตต์มีค่าของแอมพลิจูดสูงกว่าแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์กำลังเอาต์พุต 1 มิลลิวัตต์ เนื่องมาจากจำนวนของโฟตอนในการกระตุ้นเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนสถานะ (Photoexcitation) ของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์กำลังเอาต์พุต 15 มิลลิวัตต์ มีค่าสูงกว่า

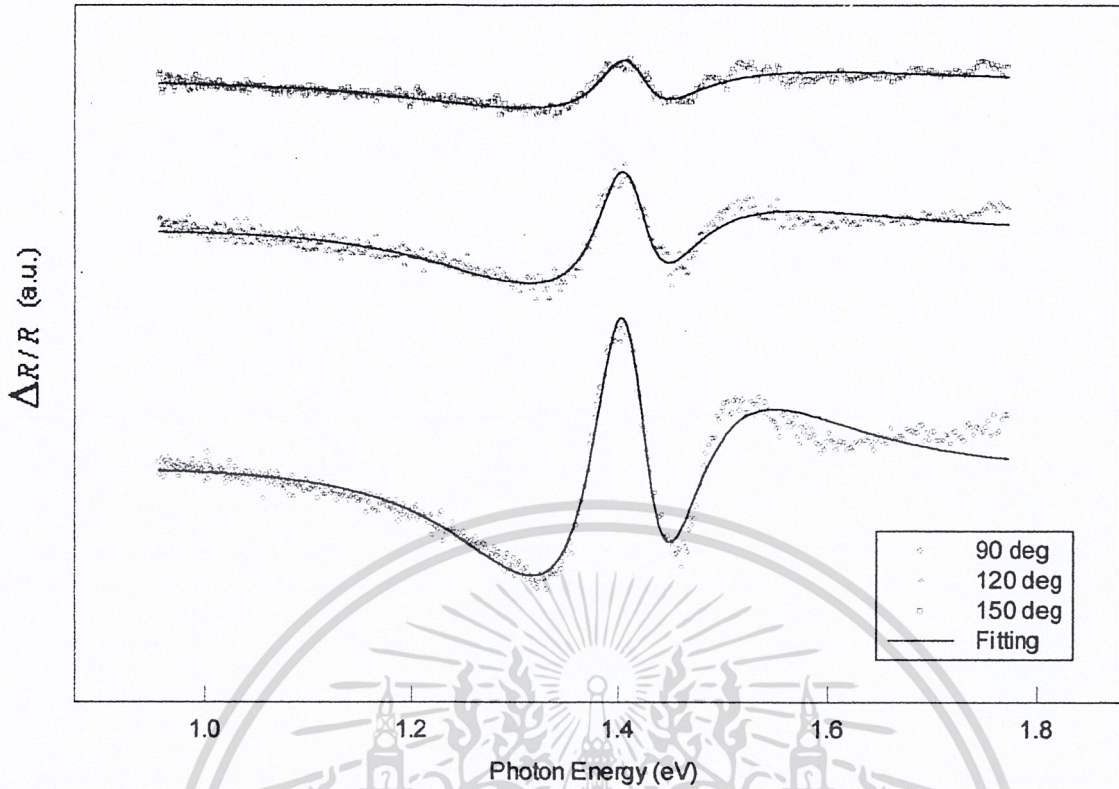
#### 4.6 ผลการทดลองวัดและการวิเคราะห์ข้อมูลการวัดสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์สารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่มุมระหว่างแนวแสงตกกระทบกับแนวแสงสะท้อนต่างๆ

สเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ที่มุมระหว่างแนวแสงตกกระทบกับแนวแสงสะท้อนต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 จากนั้นนำมาฟิตข้อมูลด้วยสมการของ Aspnes (สมการที่ (4.1)) ดังรูปที่ 4.15 เพื่อหาค่าของแถบพลังงานต้องห้ามและพารามิเตอร์ต่างๆจากสมการ



รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{\Delta R}{R}$  กับค่าพลังงานโฟตอนที่มุมระหว่างแนวแสงตกกระทบกับแนวแสงสะท้อนต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 แสดงการฟิตข้อมูลจากสเปกตรัมที่มุมระหว่างแนวแสงตกกระทบกับแนวแสงสะท้อนต่างๆ

จากการฟิตข้อมูลทำให้ทราบถึงค่าของแถบพลังงานต้องห้าม พารามิเตอร์ความกว้าง แพกเตอร์เฟส และแอมพลิจูด ของสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่มุมระหว่างแนวแสงตกกระทบกับแนวแสงสะท้อนต่างๆ โดยมีค่าดังตาราง ที่ 4.3

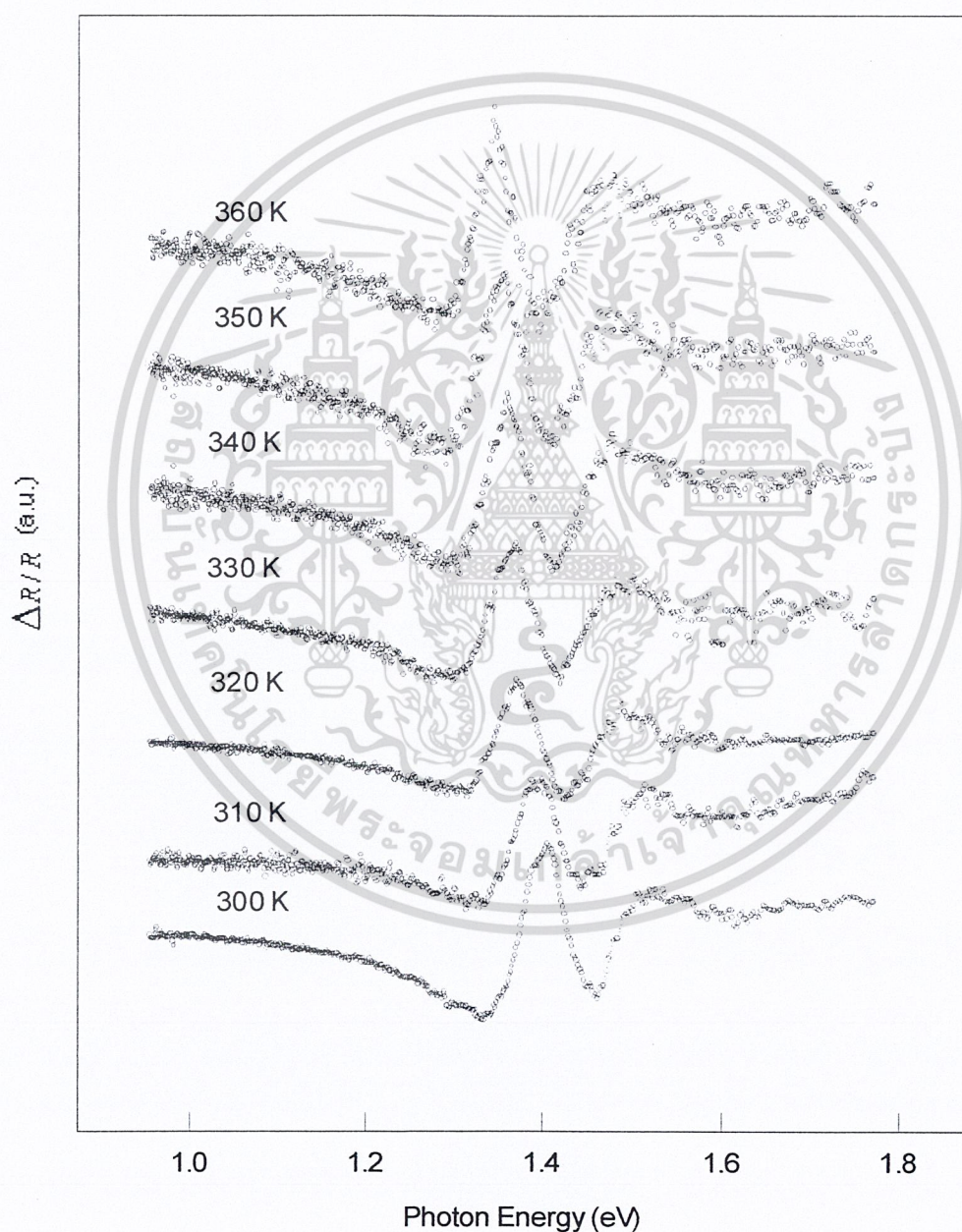
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการฟิตข้อมูลจากสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ที่มุมระหว่างแนวแสงตกกระทบกับแนวแสงสะท้อนต่างๆ

มุมระหว่าง	ค่าของพารามิเตอร์			
	$E_g$ (eV)	$\Gamma$ (eV)	$\phi$ (degrees)	แอมพลิจูด(a.u.)
90	1.41	0.05	88.57	3.82E-07
120	1.41	0.05	85.53	1.15E-07
150	1.41	0.05	84.87	4.63E-08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการฟิตข้อมูลสเปกตรัมตามตารางที่ 4.4 พบว่า แอมพลิจูดที่มุมระหว่างแนวแสงตกกระทบกับแนวแสงสะท้อน 90 องศา มีค่าสูงสุด และจะลดลงเมื่อมุมระหว่างแนวแสงตกกระทบกับแนวแสงสะท้อนมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากลำแสงสะท้อนที่ตกกระทบบนตัวตรวจวัดสัญญาณมีความเข้มแสงในการตกกระทบลดลง

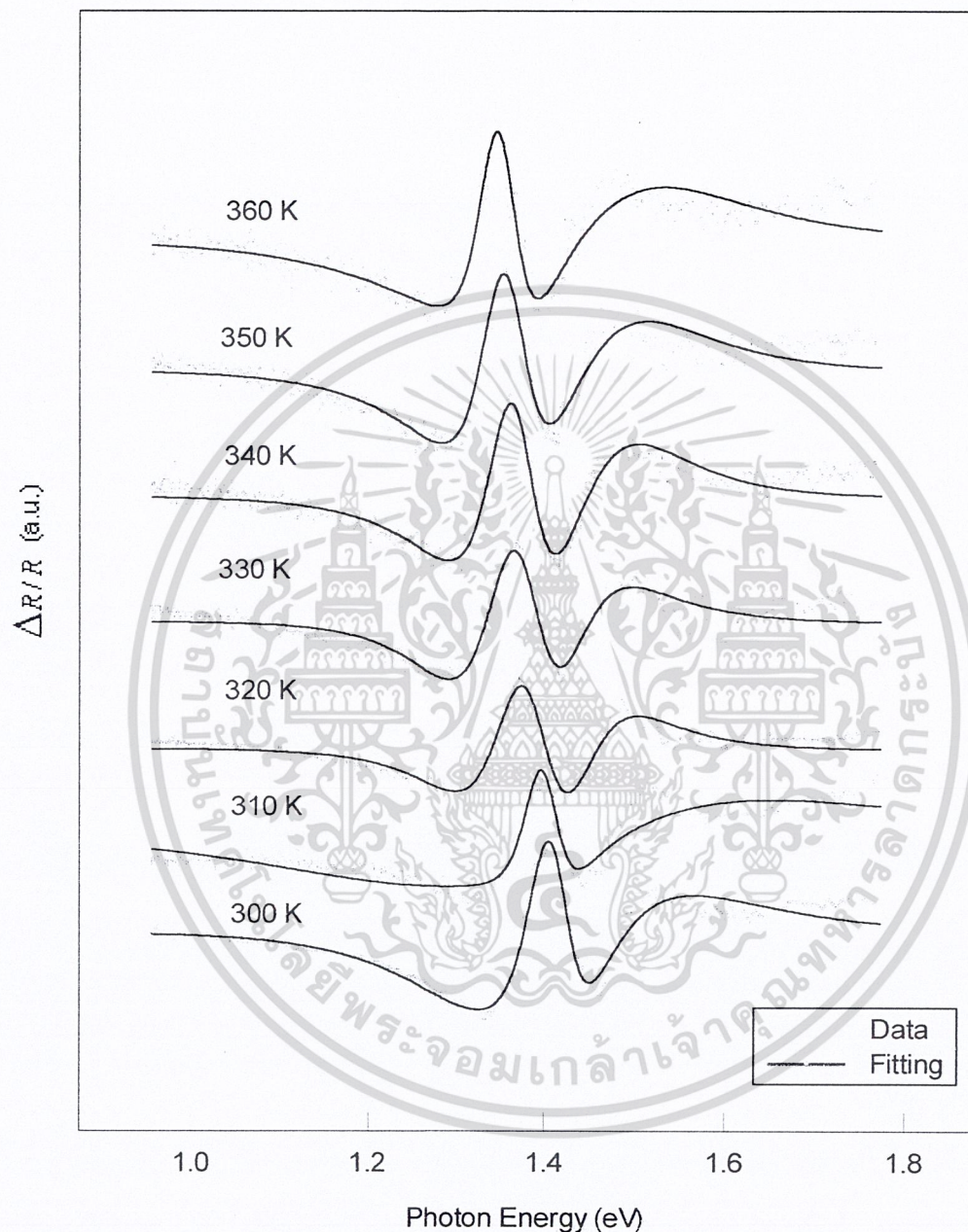
#### 4.7 ผลการทดลองวัดและการวิเคราะห์ข้อมูลการวัดสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์สารกึ่งตัวนำแกเลียมอาร์เซไนด์ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{\Delta R}{R}$  กับค่าพลังงานโฟตอนที่อุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 จากนั้นนำมาฟิตข้อมูลด้วยสมการของ Aspnes (สมการที่ (4.1)) ดังรูปที่ 4.17 เพื่อหาค่าของแถบพลังงานต้องห้ามและพารามิเตอร์ต่างๆจากสมการ



รูปที่ 4.17 แสดงการฟิตข้อมูลจากสเปกตรัมที่อุณหภูมิต่างๆ

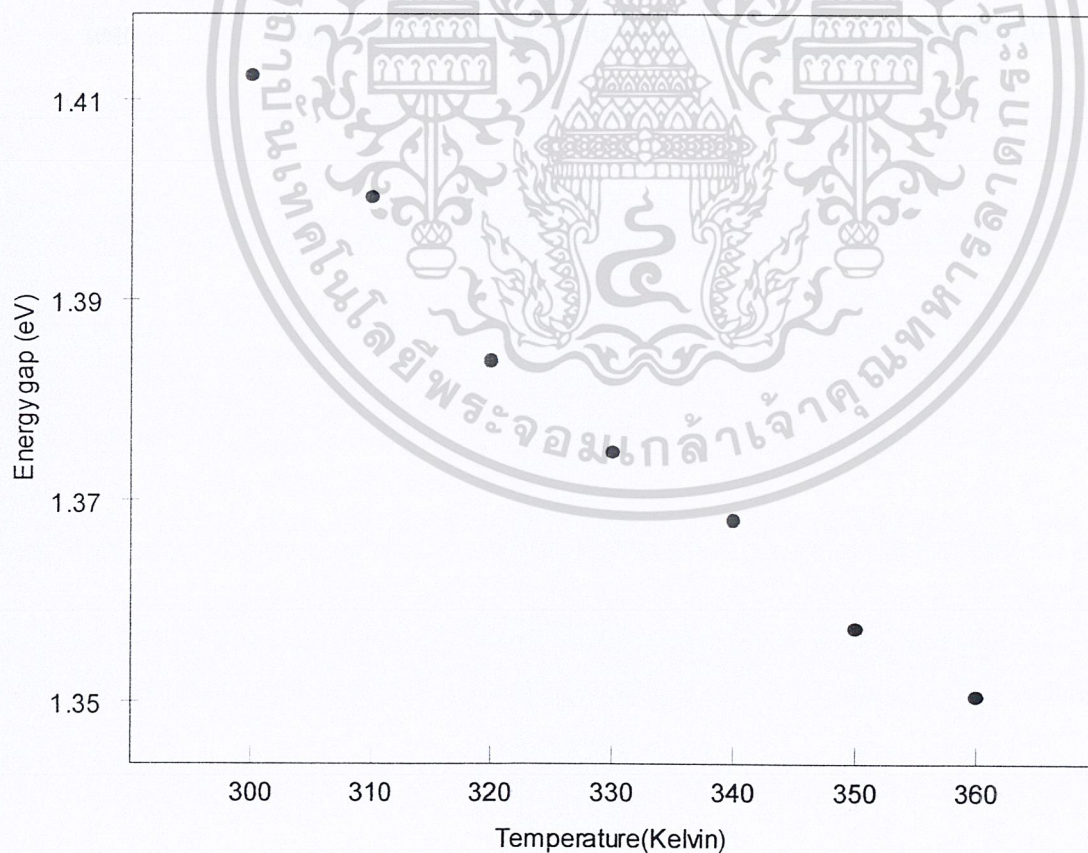
จากการฟิตข้อมูลทำให้ทราบถึงค่าของแถบพลังงานต้องห้าม พารามิเตอร์ความกว้าง แพลกเตอร์เฟส และแอมพลิจูด ของสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยมีค่าดังตารางที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการฟิตข้อมูลจากสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ที่ อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ	ค่าของพารามิเตอร์			
	$E_g$ (eV)	$\Gamma$ (eV)	$\phi$ (degrees)	แอมพลิจูด(a.u.)
300 K	1.41	0.05	198.62	4.21e-07
310 K	1.40	0.04	194.16	8.45e-08
320 K	1.38	0.08	192.28	1.58e-06
330 K	1.37	0.08	193.31	1.22e-06
340 K	1.37	0.06	194.02	4.03e-07
350 K	1.36	0.06	191.86	3.43e-07
360 K	1.35	0.05	193.71	1.88e-07

นำค่าของแถบพลังงานต้องห้ามที่ฟิตได้ดังแสดงในตารางที่ 4.1 มาพลอตเป็นกราฟให้เป็น ฟังก์ชันที่ขึ้นกับอุณหภูมิ ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของแถบพลังงานต้องห้ามกับอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

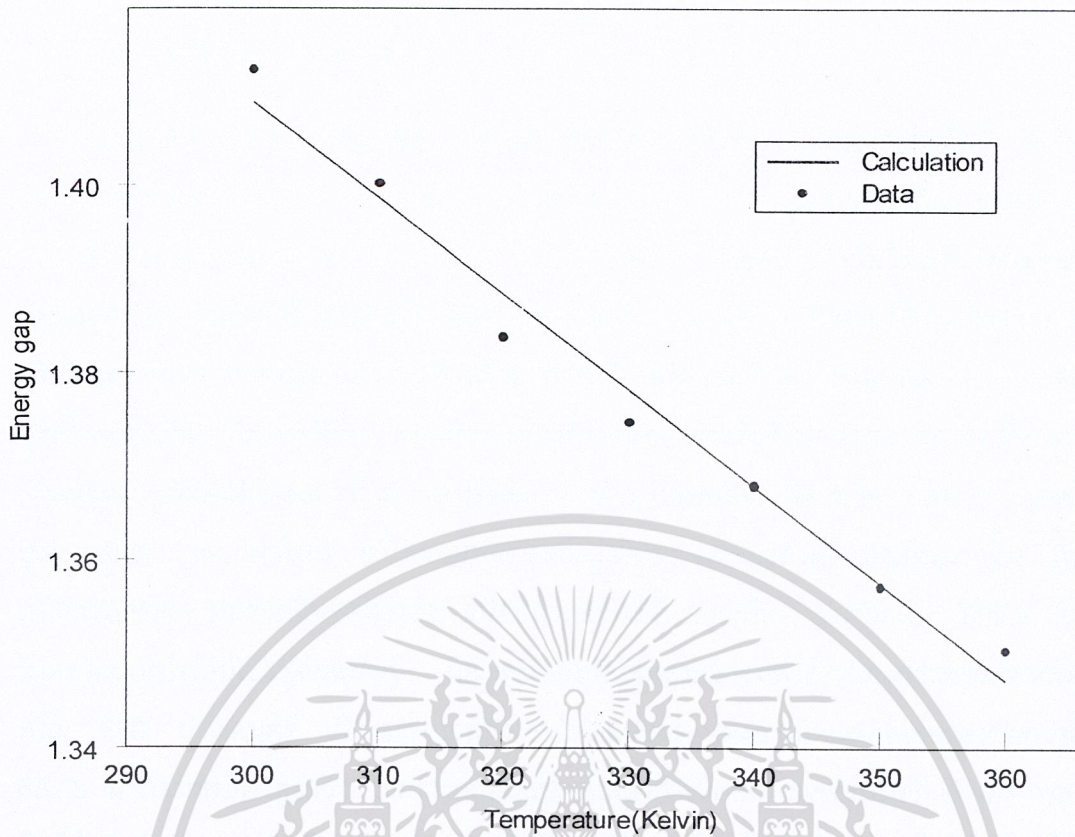
พบว่าที่อุณหภูมิห้อง สารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์ มีค่าแถบพลังงานต้องห้าม 1.41 อิเล็กตรอนโวลต์ และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าของแถบพลังงานต้องห้ามของสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์มีค่าลดลงเนื่องมาจากอุณหภูมิ มีผลทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของโครงผลึก ค่าคงที่แลตติซของสารกึ่งตัวนำเกิดการเปลี่ยนแปลง เป็นผลให้ potential ระหว่างอะตอมเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของบลอคและทฤษฎีของโครนิคเพนนี่ ที่หาความสัมพันธ์ระหว่าง  $E$  กับ  $k$  ในโซนแรกของบริลลันโซน ในการคำนวณหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามของสารกึ่งตัวนำ

จากรูป 4.18 แนวโน้มของแถบพลังงานต้องห้ามลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทำการฟิตข้อมูลด้วยสมการ Varshni Empirical Equation ( สมการที่ (3.1) ) จากการฟิตข้อมูล ทำให้ทราบถึงค่าคงที่จากสมการ และสามารถสรุปเป็นสมการของแถบพลังงานต้องห้ามของสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่แปรผันตามอุณหภูมิ ได้ดังสมการ

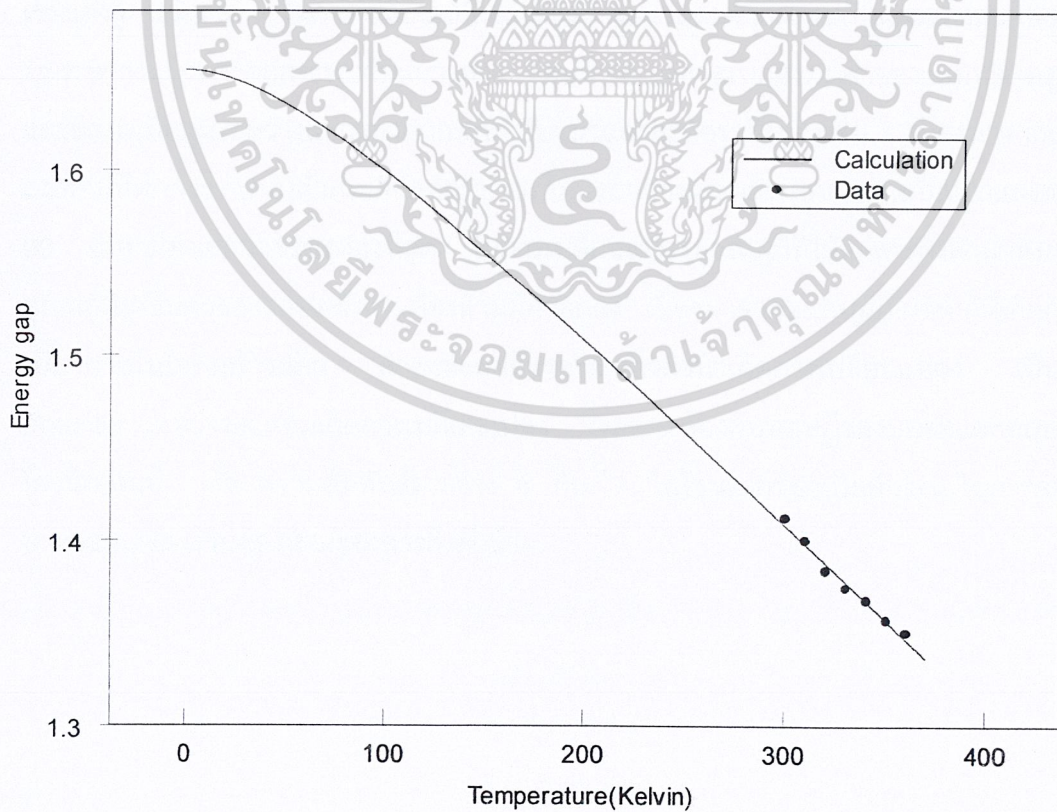
$$E(T) = 1.654 - 10.79e^{-4} \frac{T^2}{(95.3 + T)} \quad (4.2)$$

โดย

$$E_0 = 1.6545191 \quad \alpha = 10.793944 \times 10^{-4} \quad \text{และ} \quad \beta = 95.302309$$



รูปที่ 4.19 แสดงการฟิตข้อมูลจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าของแถบพลังงานต้องห้ามกับอุณหภูมิ



รูปที่ 4.20 แสดงค่าจากสมการ Varshni Empirical Equation และจากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.8 วิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการทดลองวัดสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ของสารกึ่งตัวนำแกเลียมอาร์เซไนด์ ได้ทำการวัดสเปกตรัมโดยทำการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในระบบวัด จากการวัดพบว่ามียอดแหลมของสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์  $\Delta R/R$  ปรากฏขึ้นอย่างชัดเจน ข้อมูลสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ทุกข้อมูลถูกนำมาฟิตโดยใช้โปรแกรมฟิตติงด้วยสมการของ Aspnes ที่เป็นส่วนจริงของสมการ (4.1) เพื่อวิเคราะห์หาค่าของแถบพลังงานต้องห้าม พารามิเตอร์ความกว้าง แพกเตอร์เฟส และแอมพลิจูด ซึ่งจะเป็นข้อมูลในการศึกษาโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ โดยจากการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขความถี่ของตัวตัดแสงนั้นมีการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดเนื่องมาจาก อัตราการเกิดมีค่าสูงกว่าอัตราการรวมตัวใหม่ ทำให้แอมพลิจูดลดลงเมื่อความถี่ของตัวตัดแสงเพิ่มมากขึ้น ในการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์นั้นพบว่าที่ความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร สเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ มีค่าของแอมพลิจูดสูงกว่าแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร เนื่องจากพลังงานโฟตอนของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตรมีค่าสูงกว่า ในการเปลี่ยนแปลงแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์นั้นที่กำลังเอาท์พุท 15 มิลลิวัตต์ มีค่าของแอมพลิจูดสูงกว่าแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์กำลังเอาท์พุท 1 มิลลิวัตต์ เนื่องจากจำนวนของโฟตอนในการกระตุ้นเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนสถานะ (Photoexcitation) ของความเข้มแสงสูงจะมีมาก ในการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างแนวแสงตกกระทบกับแนวแสงสะท้อนพบว่ามุมระหว่างแนวแสงตกกระทบกับแนวแสงสะท้อนที่ 90 องศา สเปกตรัมมีค่าของแอมพลิจูดสูงสุดและลดลงเมื่อมุมระหว่างแนวแสงตกกระทบกับแนวแสงสะท้อนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากลำแสงสะท้อนที่ตกกระทบบนตัวตรวจวัดสัญญาณที่มุมระหว่างแนวแสงตกกระทบกับแนวแสงสะท้อน 90 องศา มีค่าความเข้มแสงสูงสุด ในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ให้แก่สารกึ่งตัวนำพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าของแถบพลังงานต้องห้ามมีค่าลดลง เนื่องจากอุณหภูมิมีผลทำให้เกิดการบิดเบี้ยวภายในโครงสร้างผลึก ค่าคงที่แลตติซของสารกึ่งตัวนำเกิดการเปลี่ยนแปลง เป็นผลให้ potential ระหว่างอะตอมเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของบลอคและทฤษฎีของโครนิคเพนนี่ ที่หาความสัมพันธ์ระหว่าง  $E$  กับ  $k$  ในโซนแรกของบริลลันโซน ในการคำนวณหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามของสารกึ่งตัวนำ

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอนแนะ

กระบวนการวัดโดยวิธีโฟโตรีเฟลกแทนซ์สเปกโทรสโกปี เป็นขั้นตอนที่สำคัญในกระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ เนื่องจากโฟโตรีเฟลกแทนซ์สเปกโทรสโกปี สามารถศึกษาโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำได้ ทั้งยังเป็นวิธีที่มีความสะดวกและรวดเร็วในการวัด ในปัจจุบันได้รับการยอมรับว่าสามารถศึกษาโครงสร้างแถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำและสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในงานวิจัยเพื่อสร้างต้นแบบของระบบวัดแบ่งออกได้เป็น การสร้างระบบวัด และการทดสอบระบบวัด ในการสร้างระบบวัดนั้นต้องคำนึงถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระบบวัด การศึกษาผลกระทบได้มาจากการทดสอบระบบวัดโดยการวัดสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ของสารกึ่งตัวนำมาตรฐานแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่ปลูกผลึกโดยวิธี OMVPE โดยการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขที่มีในระบบวัดซึ่งประกอบไปด้วย เงื่อนไขของการเลือกใช้ความถี่ที่เหมาะสมของตัวตัดแสง การเลือกใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ การจัดวางอุปกรณ์เพื่อความเหมาะสมในระบบวัด ซึ่งในการทดลองการวัดสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ของสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่เงื่อนไขต่างๆแล้วนั้น ระบบวัดนี้มีการเลือกใช้ความถี่ตัวตัดแสงที่ความถี่ 450 เฮิร์ตซ์ แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร กำลังเอาต์พุต 5 มิลลิวัตต์

จากการทดลองวัดสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ของสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์ในกรณีที่ทำให้อุณหภูมิแก่สารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์นั้นเพื่อศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงค่าของแถบพลังงานต้องห้าม โดยสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าของแถบพลังงานต้องห้ามและอุณหภูมิได้โดยอาศัยสมการของ Varshni empirical equation ได้เป็น

$$E(T) = 1.654 - 10.79e^{-4} \frac{T^2}{(95.3 + T)}$$

ซึ่งเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าของแถบพลังงานต้องห้ามและอุณหภูมิ (เคลวิน) ของสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์ ที่อุณหภูมิห้อง สารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์มีค่าของแถบพลังงานต้องห้าม 1.41 อิเล็กตรอนโวลต์ และจากสมการพบว่าค่าของแถบพลังงานต้องห้ามลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งการศึกษามลกระทบเนื่องมาจากอุณหภูมินี้เป็นประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำของแกลเลียมอาร์เซไนด์ในกรณีที่มีการใช้สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีปัจจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของอุณหภูมิจำกัดเข้ามาเกี่ยวข้อง และจะเป็นประโยชน์ในการวิจัยและพัฒนาในการสร้างสิ่งประดิษฐ์ สารกึ่งตัวนำต่อไป

### ข้อเสนอแนะ

การสร้างระบบวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์นี้สามารถใช้ศึกษาโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำอื่นๆ และโครงสร้างแถบพลังงานสารกึ่งตัวนำที่แตกต่างกันได้ โดยการเลือกใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่มีความเหมาะสมต่อสารกึ่งตัวนำที่ต้องการศึกษาโครงสร้างแถบพลังงาน และจากการศึกษาเทคนิคของมอดูเลชันสเปกโทรสโกปี พบว่าสามารถนำเทคนิคนี้ไปประยุกต์ใช้เพื่อสร้างเป็นระบบวัดที่ใช้ศึกษาโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำได้ เช่น ระบบวัดอเล็กโทรรีเฟลกแทนซ์สเปกโทรสโกปี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

1. N. Bottka, D.K. Gaskill, R.S. Sillmon, R. Henry, and R. Glosser. "Modulation Spectroscopy as a Tool for Electronic Material Characterization." *Journal of Electronic Materials.*, Vol. 17, No. 2, 1988. pp.161-170.
2. Donald A. Neamen, Richard D. *Semiconductor Physics and Devices*. Irwin, Inc. 1992.
3. David Jiles. *Introduction to the Electronic Properties of Materials*. London : Chapman & Hall. 1992.
4. Karl W. Böer. *Survey of Semiconductor Physics*. New York : A Van Nostrand Reinhold book. 1990.
5. Jasprit Singh. *Physics of Semiconductors and their Heterostructures*. International editions. New York : McGraw-Hill, Inc. 1994.
6. Kwok K. Ng. *Complete Guide to Semiconductors Devices*. McGraw-Hill, Inc. 1995.
7. ดุสิต เครื่องาม. *สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งาน*. เล่มที่ 1 กรุงเทพฯ. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2542.
8. Fred H. Pollak. *Modulation Spectroscopy of Semiconductors and Semiconductor Microstructures*. *Handbook on Semiconductors.*, Vol. 2. New York : Elsevier Science B.V. 1980.
9. H.Shen, M. Dutta. "Franz-Keldysh Oscillation Spectroscopy." *APPLIED PHYSICS REVIEWS.*, Vol. 78, No. 4, 1995. pp 2151-2174.
10. D.E. Aspnes. *Modulation Spectroscopy/electric Field Effects on the Dielectric Function of Semiconductors*. *Handbook on Semiconductors.*, Vol. 2. New York : North-Holland Publishing Company. 1994.
11. N. Bottka, D.K. Gaskill, R.S. Silmon, R. Henry, R. Glosser. "Modulation Spectroscopy as a Tool for Electronic Material Characterization." *Journal of Electronic Materials.*, Vol. 17, No. 2, 1988. pp 161-170.
12. D.E. Aspnes. "Direct Verification of the Third-Derivative Nature of Electoreflectance Spestra." *Physical Review Letters.*, Vol. 28, No. 3, 1972. pp 168-171.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. R.G. Rodrigues, I. Bhat, J.M. Borrego. "Photoreflectance Characterization of InP and GaAs Solar cells." IEEE.,1993. pp 681-685.
14. D.E. Aspnes. "GaAs lower conduction-band minima: Ordering and properties." Physical Review B., Vol. 14, No. 12, 1976. pp 5331-5343.
15. W. Shan, J.J. Song, H. Luo and J.K. Furdyna. "Determination of the fundamental and split-off band gap in zinc-blende CdSe by photomodulation spectroscopy." Physical Review B., Vol. 50, No. 11, 1994. pp 8012-8015.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

นางสาวทุติยาภรณ์ ทิววงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 12 มกราคม พ.ศ.2520 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์อุตสาหกรรมและอุปกรณ์การแพทย์ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2541



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้