

การกระเจิงแบบรามานและการเปล่งแสงของแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่ถูกเจือด้วยเบริลเลียมในปริมาณสูง



นาย อธิคม มาน้อย

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์

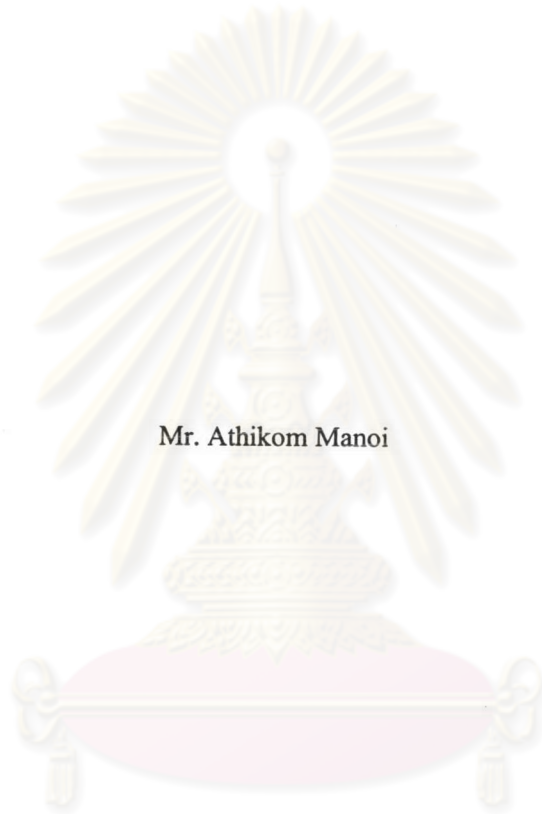
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-6600-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

RAMAN SCATTERING AND PHOTOLUMINESCENCE OF HEAVILY DOPED GaAs:Be



Mr. Athikom Manoi

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science in Physics

Department of Physics

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-17-6600-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การกระเจิงแบบรามานและการเปล่งแสงของแกดเลียมอาร์เซไนด์ที่ถูก  
เจือด้วยเบริลเลียมในปริมาณสูง

โดย

นายอริคม มาน้อย

สาขาวิชา

ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ดร. สธน วิจารณ์วรรณลักษณ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิเศษฐ์ รัตนวรารักษ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร. สธน วิจารณ์วรรณลักษณ์)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุคนธ์ ตุงคะสมิต)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. สมฤทธิ์ วงศ์ฉวีโรจน์)

นายอติคม มาน้อย : การกระเจิงแบบรามานและการเปล่งแสงของแกเลียมอาร์เซไนด์ที่ถูกเจือด้วยเบริลเลียมในปริมาณสูง. (RAMAN SCATTERING AND PHOTOLUMINESCENCE OF HEAVILY DOPED GaAs:Be) อ. ที่ปรึกษา : อ.ดร.สรน วิจารย์วรรณลักษณ์ 82หน้า. ISBN 974-17-6600-9.

การศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการปรับแก้สมการการกระเจิงแบบรามานที่เสนอโดย Irmer และคณะ (1997) ให้เข้ากับสเปกตรัมการกระเจิงแบบรามานของแกเลียมอาร์เซไนด์ที่ถูกเจือด้วยเบริลเลียมในปริมาณสูงที่อุณหภูมิห้อง ผลการปรับแก้สมการให้ข้อมูลของความถี่พลาสมาซึ่งสามารถนำมาคำนวณความเข้มข้นพาหะได้ ความเข้มข้นพาหะที่คำนวณได้ให้ค่าที่สอดคล้องกับความเข้มข้นพาหะที่วัดจากปรากฏการณ์ฮอลล์โดยมีความสัมพันธ์เป็น  $p_{\text{Raman}} = (1.03 \pm 0.05)p_{\text{Hall}}$  จึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้การกระเจิงแบบรามานในการวัดความเข้มข้นพาหะในสารกึ่งตัวนำที่มีการเจือในปริมาณสูง

นอกจากนี้ยังได้ทำการปรับแก้สมการความเข้มแสงที่เปล่งจากการเปลี่ยนสถานะแบบอ้อมในสารกึ่งตัวนำที่ถูกเจือโดยปริมาณสูงให้เข้ากับสเปกตรัมการเปล่งแสงของแกเลียมอาร์เซไนด์ที่ถูกเจือด้วยคาร์บอนในปริมาณสูงที่อุณหภูมิห้อง ผลการปรับแก้สมการพบว่าช่องว่างแถบพลังงานลดลงเมื่อความเข้มข้นพาหะเพิ่มขึ้นโดยมีความสัมพันธ์เป็น  $\Delta E_g = (1.76 \pm 0.04 \text{ eV} \cdot \text{cm}) \times 10^{-8} p^{1/3}$  และระดับพลังงานเฟอร์มิลดลงเมื่อความเข้มข้นพาหะเพิ่มขึ้นโดยมีความสัมพันธ์เป็น  $E_f = (7.80 \pm 0.38 \text{ eV} \cdot \text{cm}^2) \times 10^{-15} p^{2/3}$  การทราบค่าระดับพลังงานเฟอร์มิทำให้สามารถคำนวณความเข้มข้นพาหะได้ โดยความเข้มข้นพาหะที่คำนวณได้มีค่าที่สอดคล้องกับความเข้มข้นพาหะที่วัดจากปรากฏการณ์ฮอลล์มีความสัมพันธ์เป็น  $p_{\text{pl}} = (1.00 \pm 0.06)p_{\text{Hall}}$  จึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้การเปล่งแสงในการวัดความเข้มข้นพาหะในสารกึ่งตัวนำที่มีการเจือในปริมาณสูง

สเปกตรัมการเปล่งแสงของแกเลียมอาร์เซไนด์ที่ถูกเจือด้วยเบริลเลียมในปริมาณสูงที่อุณหภูมิห้องไม่สามารถแปลความได้ในขั้นต้นเนื่องจากผลการแทรกสอดอันเกิดขึ้นที่แผ่นกรองแสงของเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองจึงต้องทำการปรับสเปกตรัมให้เรียบด้วยวิธีฟูเรียร์ สเปกตรัมที่ได้ถูกปรับแก้กับสมการที่สมมติให้อิเล็กตรอนเกิดการเปลี่ยนสถานะทางอ้อม พบว่าให้ความสัมพันธ์ที่แตกต่างจากสารกึ่งตัวนำแกเลียมอาร์เซไนด์ที่ถูกเจือด้วยสารชนิดอื่น โดยผลที่แตกต่างนี้ปัจจุบันไม่สามารถระบุสาเหตุแน่ชัดได้

ภาควิชา ฟิสิกส์  
สาขาวิชา ฟิสิกส์  
ปีการศึกษา 2547

ลายมือชื่อนิสิต..... *อติคม มาน้อย* .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... *ดร.สรน วิจารย์วรรณลักษณ์* .....

# # 4572566323 : MAJOR Physics

KEY WORD: GaAs:Be / CARRIER CONCENTRATION / RAMAN SCATTERING /  
PHOTOLUMINESCENCE

ATHIKOM MANOI: RAMAN SCATTERING AND PHOTOLUMINESCENCE OF HEAVILY  
DOPED GaAs:Be. THESIS ADVISOR: SATHON VIJARNWANNALUK, Ph. D., 82 pp.  
ISBN 974-17-6600-9.

In this work, Raman scattering equation, presented by Irmer et. al. (1997), was fitted to Raman scattering spectra of heavily doped GaAs:Be at room temperature. The data of plasma frequency were obtained, and the carrier concentration can be calculated. It is correspondent with the carrier concentration determined by Hall measurement as  $p_{\text{Raman}} = (1.03 \pm 0.05)p_{\text{Hall}}$ . Thus, it is possible to measure the carrier concentration of heavily doped semiconductor by Raman scattering.

Indirect electron transition equation of heavily doped semiconductor is also fitted to the photoluminescence spectra of heavily doped GaAs:C at room temperature. The results show that energy band gap and Fermi energy decrease with increasing carrier concentration as  $\Delta E_g = (1.76 \pm 0.04 \text{ eV} \cdot \text{cm}) \times 10^{-8} p^{1/3}$  and  $E_f = (7.80 \pm 0.38 \text{ eV} \cdot \text{cm}^2) \times 10^{-15} p^{2/3}$ . The carrier concentration can be calculated and correspond with the Hall-measurements carrier concentration as  $p_{\text{pl}} = (1.00 \pm 0.06)p_{\text{Hall}}$ . Thus, it is possible to measure the carrier concentration of heavily doped semiconductor by photoluminescence.

Photoluminescence spectra of heavily doped GaAs:Be at room temperature can not interpret at first because of diffraction at the filter of the instrument. Therefore, the Fourier smooth spectrum is used. By this way, the output spectra are fitted with indirect electron transition equation. The results are significantly different from GaAs, which are doped with another atom. At this moment, the possible explanation is not yet obtained.

Department Physics  
Field of study Physics  
Academic year 2004

Student's signature..... *Athikom Manoi*

Advisor's signature..... *Sathon Vijarnwannaluk*

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ อ.ดร. สธน วิจารณ์วรรณลักษณ์ สำหรับคำแนะนำในเรื่องต่างๆในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ทั้งในเรื่องวิชาการและเรื่องทั่วไป

ขอขอบคุณ คุณทอง ลีลาวัฒน์สุข นักวิชาการอัญมณี สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ สำหรับการทดลองการกระเจิงแบบรามานและการเปล่งแสงของ GaAs:Be

ขอขอบคุณ Dr. W. K. Liu บริษัท ไอควีอี คอร์ปอเรชั่น ประเทศสหรัฐอเมริกา ที่ได้อนุเคราะห์สารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณโครงการพัฒนาและส่งเสริมผู้มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (พสวท.) สำหรับการสนับสนุนทุนการศึกษาตลอดการศึกษา และขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย สำหรับทุนอุดหนุนวิจัย

และสุดท้ายขอขอบคุณครอบครัวตระกูล มาน้อย และ ปาละวงศ์ ที่เป็นกำลังใจและทำให้ประสบความสำเร็จในวันนี้



คุนยวิทย์ทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
2 สมบัติของแกเลียมอาร์เซไนด์ สมบัติทางแสงและฟังก์ชันค่าคงที่ไดโพลีตริก.....	3
2.1 สมบัติของแกเลียมอาร์เซไนด์.....	3
2.1.1 โครงสร้างผลึก.....	3
2.1.2 โฟนอนและสมบัติการสั่นในโครงผลึก.....	5
2.1.3 โครงสร้างแถบพลังงาน.....	7
2.2 สมบัติทางแสงและฟังก์ชันค่าคงที่ไดโพลีตริกไดโพลีตริก.....	10
2.2.1 สมบัติทางแสง.....	10
2.2.2 ฟังก์ชันค่าคงที่ไดโพลีตริกในสารแกเลียมอาร์เซไนด์.....	11
3 สารตัวอย่างและเครื่องมือ.....	13
3.1 สารตัวอย่าง GaAs:Be และ GaAs:C.....	13
3.2 เครื่องมือในการทดลอง.....	14
3.3 การวัดฮอลล์.....	15
4 การกระเจิงแบบรามานของแกเลียมอาร์เซไนด์ที่ถูกเจือด้วยเบริลเลียมในปริมาณสูง.....	19
4.1 บทนำ.....	19
4.1.1 หลักการการกระเจิงแบบรามาน.....	19
4.1.2 ฟังก์ชันค่าคงที่ไดโพลีตริกในสารกึ่งตัวนำที่มีการเติมอะตอมเจือปน.....	22
4.1.3 รูปแบบการสั่นควบคู่ของโฟนอนทรานส์ตามยาวและพลาสมอน.....	23
4.2 การทดลอง.....	25
4.3 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	25

## สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
4.3.1 ผลการทดลอง.....	25
4.3.2 รูปแบบการสั่นโฟนอนทฤษฎี.....	28
4.3.3 รูปแบบการสั่นการควบคู่ระหว่างโฟนอนทฤษฎีตามยาวและ พลาสมอน.....	30
4.4 สรุปผลการทดลอง.....	37
5 การเปล่งแสงของแกเลียมอาร์เซไนด์ที่ถูกเจือด้วยเบริลเลียมและคาร์บอนในปริมาณสูง.....	38
5.1 บทนำ.....	38
5.1.1 หลักการการเปล่งแสง.....	38
5.1.2 การแคบลงของช่องว่างแถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำแกเลียมอาร์เซไนด์ ชนิดพีที่ถูกเจือในปริมาณสูง.....	38
5.1.3 สมการความเข้มแสงของการเปล่งแสง.....	42
5.1.4 การคำนวณความเข้มชั้นพาหะ.....	43
5.2 การทดลอง.....	45
5.3 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	45
5.3.1 GaAs:C.....	45
5.3.2 GaAs:Be.....	55
5.4 สรุปผลการทดลอง.....	65
6 ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ.....	66
6.1 ข้อสรุป.....	66
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	67
รายการอ้างอิง.....	68
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	71



สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆของ GaAs ที่อุณหภูมิ 300 K ซึ่งรายงานโดย Blakemore.....	4
2.2 แสดงความถี่โฟนอนซึ่งวัดจากการกระเจิงของนิวตรอนจากจุด $\Gamma$ , $X$ และ $L$ .....	7
2.3 สรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆของ GaAs.....	12
3.1 แสดงสมบัติของ GaAs:Be ที่ใช้ในการทดลอง.....	13
3.2 แสดงสมบัติของ GaAs:C ที่ใช้ในการทดลอง.....	14
4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของ GaAs ชนิดพี ที่อุณหภูมิ 300 K .....	29
4.2 แสดงผลการคำนวณ depletion layer ( $d_L$ ) จากความเข้มข้นของรูปแบบการสั่น LO.....	30
4.3 แสดงผลการปรับแก้สมการที่ (4.14) กับผลการทดลองการกระเจิงแบบรามานของ GaAs:Be....	32
4.4 แสดงผลการคำนวณความถี่พลาสมาเป็นความเข้มข้นพาหะโดยสมการที่(4.18).....	32
5.1 แสดงผลการปรับแก้สมการที่ (5.15) กับสเปกตรัมการเปล่งแสงของ GaAs:Be และ GaAs:C....	49
5.2 แสดงผลการคำนวณหาความเข้มข้นพาหะจากสเปกตรัมการเปล่งแสง ( $p_p$ ).....	50


  
 ศูนย์วิทยพัทยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 แสดงเซลล์ปริภูมิของโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ของ GaAs.....	3
2.2 แสดงการกระจายของโฟนอนใน GaAs ที่อุณหภูมิห้อง.....	6
2.3 แสดงแถบพลังงานของ GaAs ที่คำนวณโดย Chelikowsky และ Cohen.....	8
3.1 แสดงทางเดินของแสงภายในเครื่อง Rm 1000 ของบริษัท Reinshaw.....	15
3.2 แสดงรูปแบบวัดความเข้มข้นพาหะด้วยวิธีการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์.....	16
4.1 แสดงหลักการเกิดการกระเจิงแบบรามาน.....	20
4.2 แสดงสเปกตรัมการกระเจิงแบบรามานของ GaAs:Be.....	27
4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นพาหะที่วัดจากปรากฏการณ์ฮอลล์ ( $p_{Hall}$ ) และความเข้มข้นพาหะที่วัดจากการทดลองการกระเจิงแบบรามาน ( $p_{Raman}$ ).....	33
4.4 แสดงความสัมพันธ์ ระหว่างความเข้มข้นพาหะ ( $p_{Hall}$ ) กับอัตราส่วนความเข้มแสงของรูปแบบการสั่น LO ต่อรูปแบบการสั่น LOPC ( $I_{LO}/I_{LOPC}$ ) โดยได้รวมงานของ Fukasawa และคณะ, Mlayah และคณะ, Wan และคณะ และ Songprakob.....	35
4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นพาหะ ( $p_{Hall}$ ) กับความกว้างสเปกตรัมของรูปแบบการสั่น LOPC โดยทำการวัดที่ครึ่งหนึ่งของความเข้มแสง (FWHM).....	36
5.1 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของแกลเลียมอาร์เซไนด์และโอกาสที่เป็นไปได้ในการที่อิเล็กตรอนในแถบการนำจะลดระดับมารวมกับโฮลในแถบวาเลนซ์แบบอ้อม.....	41
5.2 เส้นทึบแสดงผลการทดลองการเปล่งแสงของ GaAs:C ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งทำการทดลอง ณ Imperial College และบริษัท Renishaw โดยเส้นประแสดงผลการปรับแก้สมการที่ (5.12) กับสเปกตรัมการเปล่งแสงที่ได้จากการทดลอง.....	51
5.3 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของช่องว่างแถบพลังงานในสาร GaAs:C เทียบกับช่องว่างแถบพลังงานที่ไม่มีการเจือและเส้นประแสดงผลการปรับแก้สมการ $\Delta E_g = Ap^{\frac{1}{3}}$ .....	52
5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นพาหะและระดับพลังงานเฟอร์มิที่ต่ำกว่าแถบวาเลนซ์ของ GaAs:C เส้นประแสดงผลการปรับแก้ข้อมูลกับสมการที่ (5.26) .....	53
5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นพาหะที่วัดโดยปรากฏการณ์ฮอลล์ ( $p_{Hall}$ ) และความเข้มข้นพาหะที่วัดโดยปรากฏการณ์การเปล่งแสง ( $p_{pl}$ ) เส้นประแสดงผลการปรับแก้ข้อมูลกับสมการเชิงเส้น.....	54

## สารบัญภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
5.6 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของ GaAs:Be ที่มีความเข้มข้นพาหะ $2.81 \times 10^{18}$ , $1.04 \times 10^{19}$ , $2.83 \times 10^{19}$ และ $7.44 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ซึ่งทำการทดลองที่อุณหภูมิ 300 K โดยใช้แสงเลเซอร์ที่มีพลังงาน 2.541 eV เป็นตัวกระตุ้น.....	56
5.7 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของ GaAs:C ที่มีความเข้มข้นพาหะ $5.2 \times 10^{18}$ , $6.6 \times 10^{19}$ และ $1.05 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ซึ่งทำการทดลองที่อุณหภูมิ 300 K โดยใช้แสงเลเซอร์ที่มีพลังงาน 2.541 eV เป็นตัวกระตุ้น.....	57
5.8 เส้นทึบแสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของ GaAs:Be ที่ทำการปรับให้เรียบด้วยวิธีฟูเรียร์ที่ความเข้มข้นพาหะ $2.81 \times 10^{18}$ , $1.04 \times 10^{19}$ , $2.83 \times 10^{19}$ และ $7.44 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ซึ่งทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้แสงเลเซอร์ที่มีพลังงาน 2.54 eV เป็นตัวกระตุ้น เส้นประแสดงผลการปรับแก้สเปกตรัมที่ได้กับสมการที่ (5.15).....	58
5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของช่องว่างแถบพลังงาน ( $\Delta E_g$ ) และความเข้มข้นพาหะ ( $p_{Hall}$ ) ของ GaAs:Be ซึ่งได้จากการปรับสเปกตรัมการเปล่งแสงที่ทำให้เรียบกับสมการที่ (5.15).....	59
5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นพาหะ ( $p_{Hall}$ ) และระดับพลังงานเฟอร์มิ ( $E_F$ ) ที่ต่ำกว่าแถบวาเลนซ์ของ GaAs:Be ซึ่งได้จากการปรับแก้สเปกตรัมการเปล่งแสงที่ทำให้เรียบกับสมการที่ (5.15).....	60
5.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นพาหะที่ได้จากการทดลองทางแสง ( $p_{pl}$ ) และความเข้มข้นพาหะที่ได้จากการวัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ ( $p_{Hall}$ ) ของ GaAs:Be.....	62
5.12 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่าง $\Delta E_g$ กับ $p_{Hall}$ ซึ่งได้จากการทดลองการเปล่งแสงในครั้งนี้อย่างรวมข้อมูลของ Wang และคณะ ซึ่งใช้ GaAs:C และงานของ Olego และคณะซึ่งใช้ GaAs:Zn ในการทดลองอีกด้วย โดยเส้นประในแต่ละกรณี แสดงถึงผลการปรับแก้สมการที่ (5.24) กับผลการทดลองที่ได้.....	63
5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $E_F$ และ $p_{Hall}$ เปรียบเทียบกันระหว่างกรณีที่มีการเจือ Be, C และ Zn โดย $E_F$ ของ GaAs:C ได้จากการทดลองในครั้งนี้อย่างรวมข้อมูลที่ได้จาก Wang และคณะ และ $E_F$ ของ GaAs:Zn ได้จากการวิเคราะห์ของ Tikov และคณะ .....	64