

การเปลี่ยนแปลงตามอนุภูมิของการคูดกลืนแสงพื้นฐานของ  
คอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ และส่วนหางของเออภาค



นายธนา สุทธิโอกาส

ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชาฟิสิกส์  
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2531

ISBN 974-569-497-5

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

014391

11๗๓๖๔๕๘

Temperature Dependence of the Fundamental Absorption  
of Copper Indium Diselenide and the Urbach Tail



Mr. Thana Sutthiopad

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science

Department of Physics  
Graduate School

Chulalongkorn University

1988

ISBN 974-569-497-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของการดูดกลืนแสงพื้นฐานของ  
คอปเปอร์อินเดียม ไดซัลไฟด์ และส่วนหางของเอออบาค

โดย นายชนา สุทธิโอกาส

ภาควิชา ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงษ์ จิตราภรณ์  
อาจารย์ ดร. ชวรงค์ อุษุติ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้ เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....  
(ศาสตราจารย์ ดร. ถาวร วัชรวิชัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. วิจิตร เสงี่ยมพันธ์)

..... กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. วิรุทธิ์ สายคณิต)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิรณันต์ รัตนธรรมพันธ์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงษ์ จิตราภรณ์)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร. ชวรงค์ อุษุติ)



พิมพ์ต้นฉบับบทความวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

ธนา สุทธิโสภาส : การเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของการดูดกลืนแสงพื้นฐานของคอปเปอร์อินเดียมไดเซลิไนด์ และส่วนหางของเอออบาค (TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE FUNDAMENTAL ABSORPTION OF COPPER INDIUM DISELENIDE AND THE URBACH TAIL) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.สมพงษ์ ฉัตรารณณ์ และ อ.ดร.ขจรยศ อยู่ดี, 115 หน้า.

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงในช่วงพลังงานใกล้เคียงกับขอบเขตการดูดกลืนแสงพื้นฐานของผลึกเดี่ยวกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดเซลิไนด์ชนิดพี (p-type) ผลึกเดี่ยวคอปเปอร์อินเดียมไดเซลิไนด์นี้ได้เตรียมขึ้นโดยวิธีไดเรกชันัลฟริชซิง ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดเซลิไนด์มีขนาดช่องว่างแถบพลังงานเป็นแถบตรงอยู่ระหว่าง 0.978 และ 1.000 eV ที่อุณหภูมิระหว่าง 300 ถึง 11 K ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงขนาดช่องว่างแถบพลังงานนี้สามารถจะเปรียบเทียบได้กับสมการของมางูเกียนซึ่งให้ค่า  $E_g(0) = 1.000 \text{ eV}$   $\theta = 365 \text{ K}$  และ  $dE_g/dT = -1.12 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$

ในการดูดกลืนแสงพบว่ามีส่วนหางของเอออบาคใกล้ขอบเขตการดูดกลืนแสงพื้นฐาน ข้อมูลของผลการทดลองสามารถกำหนดให้อยู่ในเทอมของสมการเอ็กซ์โปเนนเชียลอย่างง่ายของเอออบาคได้ ซึ่งให้ค่า  $\alpha_1 = 3.6 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$   $E_1 = 1.03 \text{ eV}$  ส่วนหางของเอออบาคมีความกว้างเอ็กซ์โปเนนเชียลเท่ากับ 7.4 - 11.8 meV ในช่วงอุณหภูมิ 11 ถึง 300 K การเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของขนาดช่องว่างแถบพลังงานและความกว้างเอ็กซ์โปเนนเชียลมีความคล้ายคลึงกันและเกิดขึ้นจากโฟนอนแบบเดียวกัน ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างขนาดช่องว่างแถบพลังงานและความกว้างเอ็กซ์โปเนนเชียลนี้คือ  $E_g(T) = 1.039 - 4.95 E_0(T)$



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ..... ฟิสิกส์  
สาขาวิชา ..... ฟิสิกส์  
ปีการศึกษา ..... 2531

ลายมือชื่อนิสิต ..... ธนา สุทธิโสภาส  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... สมพงษ์ ฉัตรารณณ์

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

THANA SUTTHIOPAD : TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE FUNDAMENTAL ABSORPTION OF COPPER INDIUM DISELENIDE AND THE URBACH TAIL.

THESIS ADVISORS : ASSISTANT PROFESSOR SOMPHONG CHATRAPHORN AND Dr. KAJORNYOD YOODEE, Ph.D. 1115 FPP.

In this research, the properties of the optical absorption near the fundamental absorption edges of a single crystal p-type CuInSe<sub>2</sub> were studied. The single crystal was prepared by the directional-freezing method. The experimental results show that the CuInSe<sub>2</sub> semiconductor has direct energy gaps between 0.978 and 1.000 eV at temperatures from 300 K down to 11 K respectively. The temperature dependence of these energy gaps can be well fitted to the Manogian's equation which gives  $E_g(0) = 1.000$  eV,  $\theta = 365$  K, and  $dE_g/dT = -1.12 \times 10^{-4}$  eV/K.

Urbach tails in optical absorption near the band edges were also observed. These data can be expressed in terms of a simple exponential of Urbach's equation with  $\alpha_1 = 3.6 \times 10^4$  cm<sup>-1</sup>,  $E_1 = 1.03$  eV. The Urbach tail have exponentials widths of 7.4 - 11.8 meV in the temperature range 11 - 300 K. The temperature dependence of energy gap and Urbach tail are very similar with the same phonon energies. The linear relationship between the energy gap and the width of exponential is  $E_g(T) = 1.039 - 4.95 E_0(T)$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ..... ฟิสิกส์ .....  
สาขาวิชา ..... ฟิสิกส์ .....  
ปีการศึกษา ..... 2531 .....

ลายมือชื่อนิสิต ..... หนา ..... สุธาณี อภิบาล .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... สดพงษ์ อภิธรรมกรณ .....  
MCCN ๕๕๖

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความกรุณาของผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงษ์ จิตราภรณ์ และอาจารย์ ดร. ขจรยศ อัยดี ที่ได้ให้คำแนะนำ ตลอดจนช่วยแก้ปัญหาและควบคุมการวิจัยอย่างใกล้ชิดตลอดมา อีกทั้งได้รับการสนับสนุนอย่างยิ่ง จากท่าน ศาสตราจารย์ ดร. วิรุทธิ์ สายคณิต รองศาสตราจารย์ จงอร พิรานนท์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิรฉัตร รัตนธรรมพันธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิจิต ศรีตระกูล อาจารย์ ชนะ ผิวล่อง และคณะผู้วิจัยฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้คำปรึกษา และแนะนำเกี่ยวกับวิชาการทางด้านฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ และอำนวยความสะดวกในการวิจัย

ขอขอบคุณ คุณโอฬาร บัวม่วง และ คุณชญ์ แสงผัด เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ หน่วยวิจัยฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาฟิสิกส์ ที่ได้ช่วยอำนวยความสะดวกเกี่ยวกับเครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิจัย ตลอดจนนิสิต โปรแกรมปริญญาโทบัณฑิต คุณภพภูด สุทธิศิริ และนิสิต โปรแกรมมหาบัณฑิต อันได้แก่ คุณพงษ์ ทรงพงษ์ คุณกัลยา เอื้อประเสริฐศักดิ์ คุณชนากร โอสถจันทร์ คุณวิจิต ศิริโชติ และคุณงามนิตย์ วงศ์เจริญ ซึ่งทุกท่านมีส่วนช่วยให้เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ดร. วิโรจน์ ตันตราภรณ์ และบริษัท เซนเนอรัลอิเล็กทริก ที่ได้มอบอุปกรณ์การทดลองจำนวนหนึ่ง รวมทั้งเครื่องวัดต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของ โครงการวิจัยที่ได้รับการสนับสนุนจาก จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภายใต้โครงการพัฒนาหน่วยวิจัย (Unit Cell) จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญตาราง .....	ญ
สารบัญรูป .....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
บทที่ 2 สารกึ่งตัวนำ .....	5
2.1 ชนิดของสารกึ่งตัวนำ .....	7
2.1.1 ผลึกกึ่งตัวนำของธาตุเดี่ยว .....	7
2.1.2 ผลึกกึ่งตัวนำของสารประกอบเชิงคู่ .....	7
2.1.2.1 กลุ่ม II-VI .....	7
2.1.2.2 กลุ่ม III-V .....	7
2.1.3 ผลึกกึ่งตัวนำของสารประกอบเชิงสาม .....	8
2.1.3.1 กลุ่ม I-III-VI <sub>2</sub> .....	8
2.1.3.2 กลุ่ม II-IV-V <sub>2</sub> .....	8
2.1.4 โลหะผสมกึ่งตัวนำ .....	8
2.2 โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ .....	9
2.2.1 โครงสร้างแบบเพชร .....	9
2.2.2 โครงสร้างแบบสฟาเลอร์หรือแบบซิงค์เบลนด์ .....	10
2.2.3 โครงสร้างแบบซัลโคไฟไรต์ .....	11

ศูนย์วิทยุทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ .....	13
2.3.1 โครงสร้างแถบพลังงานของ โครงสร้างผลึกคล้ายเพชร .....	13
2.3.2 โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกแบบริงค์เบลนด์ ..	14
2.3.3 โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกแบบซาลโคไฟไรท์.	14
บทที่ 3 สมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ .....	16
3.1 ทฤษฎีการดูดกลืนแสง .....	16
3.2 การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง .....	21
บทที่ 4 การเปลี่ยนแปลงขนาดช่องว่างแถบพลังงานตามอุณหภูมิ .....	24
4.1 ผลจากการขยายตัวของ โครงสร้างผลึกเนื่องจากอุณหภูมิ ...	25
4.2 ผลจากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับ โฟนอน .....	26
4.3 แบบจำลองเชิงทฤษฎี .....	29
บทที่ 5 ส่วนหางของเอออบาค .....	33
5.1 ความไม่เป็นระเบียบและส่วนหางของเอออบาค .....	34
5.2 ความหนาแน่นของระดับพลังงาน .....	38
5.3 ขนาดช่องว่างแถบพลังงานและความกว้างเอ็กซ์โปเนนเชียล.	41
บทที่ 6 การทดลองและผลการทดลอง .....	43
6.1 การเตรียมชิ้นสาร .....	43
6.1.1 การตัดผลึกเดี่ยวด้วยเครื่องตัดรีงข้อ .....	43
6.1.2 การขัดชิ้นผลึกด้วยเครื่องขัด .....	44
6.1.3 การกัดผิวหน้าของชิ้นผลึกด้วยสารละลายเคมี ....	45
6.2 ระบบการทดลองและวิธีการวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ..	47
6.3 การวิเคราะห์หาค่าขนาดช่องว่างแถบพลังงาน .....	50



สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.4 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดช่องว่างแถบพลังงาน ตามอุณหภูมิกับแบบจำลองเชิงทฤษฎี .....	54
6.5 การวิเคราะห์หาความกว้างเอ็กซ์ไปเนนเชียลของส่วนหาง ของเออบาค .....	59
6.6 การพิจารณาการเกิดส่วนหางของเออบาค .....	63
6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดช่องว่างแถบพลังงานกับความ กว้างเอ็กซ์ไปเนนเชียล .....	64
บทที่ 7 สรุปและวิจารณ์ผล .....	68
เอกสารอ้างอิง .....	71
ภาคผนวก .....	75
ประวัติผู้เขียน .....	114



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
6.1	แสดงขนาดช่องว่างแถบพลังงานในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 11 ถึง 300 K ...	53
6.2	เปรียบเทียบพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ได้จากการเปรียบเทียบขนาดช่องว่างแถบพลังงานกับแบบจำลองแบบต่าง ๆ .....	55
6.3	แสดงความกว้างเอ็กซ์โปเนนเชียลในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 11 ถึง 300 K .	61
6.4	แสดงพารามิเตอร์ที่ได้จากการพิจารณาความกว้างเอ็กซ์โปเนนเชียลเปรียบเทียบกับแบบจำลองของ โคดี้ .....	64



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างผลึกคล้ายเพชรในกลุ่มต่าง ๆ .....	9
2.2	แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพชร ที่เกิดจากการนำโครงสร้างผลึกแบบกึ่งกลางผิวหน้ารูปลูกบาศก์มาวางเหลื่อมกันด้วยการจัด (1/4, 1/4, 1/4) .....	10
2.3	แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ของ ZnSe .....	11
2.4	เปรียบเทียบโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์กลุ่ม II-VI กับโครงสร้างผลึกแบบซัลโคไฟไรท์กลุ่ม I-III-VI <sub>2</sub> .....	12
2.5	แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของ ก. Ge ข. Si ค. GaAs ในรีดิวซ์โซน .....	13
2.6	แสดงการแยกของแถบวาเลนซ์ของผลึกแบบซัลโคไฟไรท์ .....	15
3.1	แสดงการย้ายสถานะพลังงานแบบตรง .....	20
3.2	แสดงการย้ายสถานะแบบเฉียงซึ่งจะต้องมีโฟนอนเข้ามาเกี่ยวข้อง ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงเวกเตอร์คลื่น .....	20
3.3	แสดงการทดลองวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง .....	21
3.4	ก. แสดงตัวอย่างแบบฉบับผลการทดลองวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ข. แสดงการย้ายสถานะพลังงานสอดคล้องกับการดูดกลืนแสงในช่วงต่าง ๆ .....	23
4.1	แสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดช่องว่างแถบพลังงานเปรียบเทียบกับแบบจำลองของวาร์ชันี ก. เพชร ข. Si และ 6H SiC .....	31
5.1	แสดงการดูดกลืนแสงพื้นฐานของ GaAs และการดูดกลืนส่วนหาง ..	33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.2 แสดงค่า $n$ ที่ขึ้นกับ $\nu$ โดยที่ $\nu = 2m^*L^2(E_1 - E)/\hbar^2$ สำหรับศักย์ที่กระจายแบบเกาส์เซียน ( — ) และฟังก์ชันสกรีนคูลอมบ์ ( - - - ) .....	40
6.1 แสดงระบบการวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืน .....	46
6.2 แสดงการหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่หลัง ( $\alpha_0$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับการย้ายสถานะพลังงานข้ามช่องว่างแถบพลังงาน ( $\alpha - \alpha_0$ ) ของผลึกเดี่ยวคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 300 K .....	49
6.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน ( $\alpha - \alpha_0$ ) ของผลึกเดี่ยวคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250, 275, 300 K .....	49
6.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน ( $\alpha - \alpha_0$ ) ของผลึกเดี่ยวคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 11, 20, 30, 40, 50, 75 K .....	50
6.5 กราฟระหว่าง $h\nu$ กับ $\{(\alpha - \alpha_0)h\nu\}^2$ ของผลึกเดี่ยวคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 300 K โดยมีขนาดช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 0.978 eV แสดงว่าคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์มีโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรง .....	51
6.6 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนบริเวณขอบเขตการดูดกลืนแสงพื้นฐานที่ได้จากการวัด (●) กับการคำนวณ ( — ) ตามสมการ (6.2) แสดงให้เห็นว่าคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์มีโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรง ที่อุณหภูมิ 11, 100, 150, 200, 250 และ 300 K .....	52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.7	56
เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดช่องว่างแถบพลังงานตามอุณหภูมิของคอปเปอร์อินเดียม ไดซัลไฟด์กับแบบจำลองวาร์ทนี โดยมี $E_g(0) = 1.002 \text{ eV}$ , $a = 1.08 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$ และ $b = 133 \text{ K}$ .....	
6.8	57
เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดช่องว่างแถบพลังงานตามอุณหภูมิของคอปเปอร์อินเดียม ไดซัลไฟด์กับแบบจำลองมานูเกียน โดยมี $E_g(0) = 1.000 \text{ eV}$ , $c = 2.39 \times 10^{-8} \text{ eV/K}^{-2.38}$ , $d = -1.32 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$ และ $s = 2.38$ .....	
6.9	58
เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดช่องว่างแถบพลังงานตามอุณหภูมิของคอปเปอร์อินเดียม ไดซัลไฟด์กับแบบจำลองบนรากฐานของแบบจำลองไฮน์สไตน์ จากข้อมูลในช่วงอุณหภูมิ 11 - 225 K ( — ) และจากข้อมูลในช่วงอุณหภูมิ 11 - 300 K ( - - - ) .....	
6.10	60
แสดงกราฟระหว่าง $\ln \alpha$ กับ $h\nu$ บริเวณส่วนหางของเอออบาคที่บางอุณหภูมิ โดยมีค่า $\alpha_1 = 3.6 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ และ $E_1 = 1.03 \text{ eV}$ .....	
6.11	62
กราฟระหว่างจุดตัดแกน $\ln \alpha$ ( $\ln \alpha_1 - E_1/E_0$ ) กับพาราเมเตอร์ความถี่ ( $1/E_0$ ) โดยมีค่า $\alpha_1 = 3.6 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ และ $E_1 = 1.03 \text{ eV}$ .....	
6.12	64
เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความกว้างเอ็กซ์โปเนนเชียลตามอุณหภูมิกับแบบจำลองของโคดีจากข้อมูลในช่วงอุณหภูมิ 11 - 225 K ( — ) และจากข้อมูลในช่วงอุณหภูมิ 11 - 300 K ( - - - ) .....	
6.13	66
เปรียบเทียบลักษณะการเปลี่ยนแปลงขนาดช่องว่างแถบพลังงานและความกว้างเอ็กซ์โปเนนเชียลตามอุณหภูมิ เห็นได้ว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงของทั้งสองมีลักษณะที่เหมือนกัน .....	

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.14	
กราฟระหว่างขนาดช่องว่างแถบพลังงานกับความกว้างเอิร์ช	
โบนเนเซียล แสดงให้เห็นว่าทั้งสองส่วนมีความสัมพันธ์กันเป็น	
แบบเชิงเส้น .....	67



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย