

การศึกษาโครงสร้างแถบพลังงาน ของคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์  
โดยสภานำไฟฟ้าเชิงแสง

นาย พงษ์ ทรงพงษ์



ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2531

ISBN 974-569-496-7

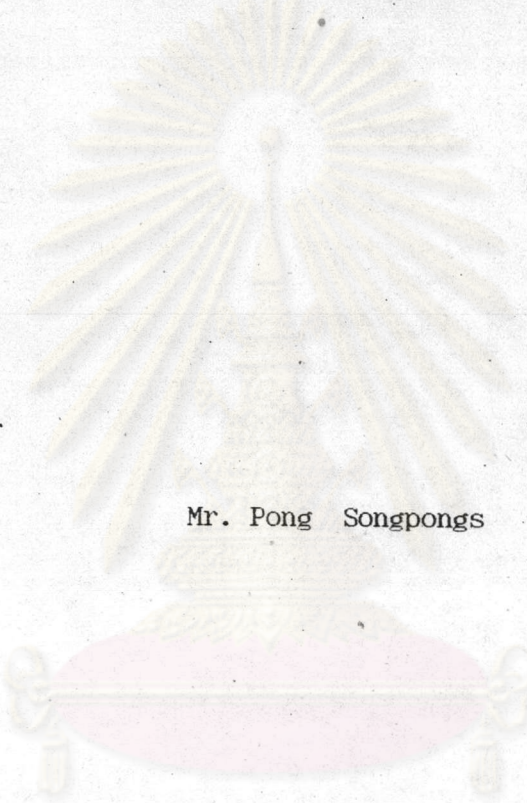
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

014447

117071100



Energy Band Structure Study of  
Copper Indium Diselenide  
by Photoconductivity



Mr. Pong Songpongs

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 974-567-496-7







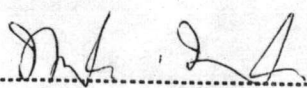


พงษ์ ทรงพงษ์ : การศึกษาโครงสร้างแถบพลังงานของคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์ โดย  
สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง (ENERGY BAND STRUCTURE STUDY OF COPPER INDIUM  
DISELENIDE BY PHOTOCONDUCTIVITY) อ.ที่ปรึกษา : ผศ. สมพงษ์ จิตราภรณ์ และ  
อ.ดร. ขจรยศ อยู่ดี

ในการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ชนิดพีซึ่งได้รับการเตรียมรอยต่อพี-เอ็นไว้แล้ว โดยการแพร่อินเดียมเข้าทางผิว การศึกษาได้วัดความต้านทานของชิ้นสารเมื่อต่อวงจรผ่านรอยต่อแบบ เอ็น-พี-เอ็น และได้กระทำการวัดที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตั้งแต่ 11 ถึง 300 เคลวิน จากการศึกษาพบว่าผลตอบสนองเชิงแสงที่ได้มียอดแหลม 2 ยอดอย่างชัดเจน และมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ โดยยอดแรกมีค่าตั้งแต่ 0.983 eV ที่ 11 เคลวิน ถึง 0.931 eV ที่ 300 เคลวิน และยอดที่สองมีค่าตั้งแต่ 1.022 eV ที่ 11 เคลวิน ถึง 1.002 eV ที่ 300 เคลวิน ตามลำดับ ทั้งนี้ถือว่ายอดแหลมยอดแรกแสดงผลของช่องว่างแถบพลังงานของสาร เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งกับอุณหภูมิอย่างเหมาะสมสอดคล้องกับแบบจำลองของวาซนี และแบบจำลองของมานูเกียน ตำแหน่งและการเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิของยอดที่สอง ได้รับการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองสามแบบ ได้แก่ แบบจำลองของการแยกออกของแถบวาเลนซ์เนื่องจากอันตรกิริยาจากสนามศักย์ของผลึกซึ่งไม่เป็นลูกบาศก์ ผลจากรอยต่อพี-เอ็นที่สร้างขึ้น และผลจากการย้ายสถานะแบบเฉียงเนื่องจากลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน จึงควรทำการวิจัยในด้านอื่น ๆ ต่อไป เพื่อให้สามารถอธิบายสาเหตุที่ทำให้ปรากฏยอด 2 ยอดได้อย่างแจ่มชัด

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

ลายมือชื่อนิสิต .....  .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... สมพงษ์ จิตราภรณ์ .....  
อ.ดร. ขจรยศ อยู่ดี



PONG SONGPONGS : ENERGY BAND STRUCTURE STUDY OF COPPER INDIUM  
DISELENIDE BY PHOTOCONDUCTIVITY. THESIS ADVISOR : ASST. PROF.  
SOMPONG CHATRAPORN, M.Sc., AND Dr. KAJORN YOD YOODEE, Ph.D. 107 PP.

The photoconductivity spectra of single-crystalline p-type  $\text{CuInSe}_2$  were measured with n-p-n configuration at various temperatures from 11 to 300 K. The p-n homojunctions were fabricated on one surface by In-diffusion. The experimental results show two pronounced peaks. The first peak position lies at photon energy of 0.931 eV to 0.983 eV at temperatures of 300 down to 11 K respectively while the second one lies at photon energy of 1.002 eV to 1.022 eV. The first peak is mentioned to indicate the energy gap of the sample because the temperature dependence of the peak position can be well fitted with both Varshni's model and Manoogian's model. The relative energy position and temperature dependence of the second peak can be interpreted with three possible models. These include valence band splitting by non-cubic crystalline field, the p-n junction effect, and the indirect optical transition. Further investigation is needed in order that the second peak can be clearly explained.

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ฟิสิกส์  
สาขาวิชา ฟิสิกส์  
ปีการศึกษา ..... 25.3.1 .....

ลายมือชื่อนิสิต ..... *พ.ก. 24* .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา *ส.พ.พงศ์ ฉัตรพราน*  
*ชว.ศ.ว. ๑๕/๖*



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความกรุณาของผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงษ์ จิตราภรณ์ และอาจารย์ ดร. ชวรงค์ อยู่ดี ที่ได้ให้คำแนะนำ ตลอดจนช่วยแก้ปัญหาและควบคุมการวิจัยอย่างใกล้ชิดตลอดมา อีกทั้งได้รับการสนับสนุนอย่างยิ่ง จากท่าน ศาสตราจารย์ ดร. วิรุฬห์ สายคณิต รองศาสตราจารย์ จงอร พิรานนท์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิรวัฒน์ รัตนธรรมพันธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิชิต ศรีตระกูล อาจารย์ ชนะ ผิวล่อง และคณะผู้วิจัยฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้คำปรึกษา และแนะนำเกี่ยวกับวิชาการทางด้านฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ และอำนวยความสะดวกในการวิจัย

ขอขอบคุณ คุณโอฬาร บัวม่วง และ คุณคชฎี แสงผัด เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ หน่วยวิจัยฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาฟิสิกส์ ที่ได้ช่วยอำนวยความสะดวกเกี่ยวกับเครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิจัย ตลอดจนนิสิตโปรแกรมปริญญาตรีบัณฑิต คุณพงษ์พล สุทธิศิริ และนิสิตโปรแกรมปริญญาโทบัณฑิต อันได้แก่ คุณชานา สุทธิโอกาส คุณกัลยา เอี่ยมประเสริฐศักดิ์ คุณชานกร โอสธจันทร์ คุณวิชิต ศิริโชค และคุณงามนิตย์ วงศ์เจริญ ซึ่งทุกท่านมีส่วนช่วยให้เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ดร. วิโรจน์ ตันตราภรณ์ และบริษัท เซนเนอรัลอิเลกทรอนิกส์ ที่ได้มอบอุปกรณ์การทดลองจำนวนหนึ่ง รวมทั้งเครื่องวัดต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยที่ได้รับการสนับสนุนจาก จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภายใต้โครงการพัฒนาหน่วยวิจัย (Unit Cell) จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

ท้ายสุดขอขอบคุณต่อฝ่ายวิจัย คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งได้พิจารณาให้ทุนผู้ช่วยวิจัยแก่ผู้เขียนในช่วง 2 ปีแรกของการศึกษาในระดับปริญญาโทบัณฑิตครั้งนี้



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ญ
สารบัญภาพและแผนภูมิ .....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ .....	1
2 โครงสร้างผลึก และ โครงสร้างแถบพลังงาน	
ของสารกึ่งตัวนำ .....	4
โครงสร้างผลึกที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำ .....	4
1. โครงสร้างผลึกแบบเพชร .....	5
2. โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ .....	6
3. โครงสร้างผลึกแบบซาลโคไฟไรท์ .....	7
ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในสนามศักย์ที่เป็นคาบ .....	9
เวกเตอร์โมเมนตัมกลับ .....	12
บริลลันโซน และรีดิวซ์โซน .....	13



สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
1 (ต่อ)	การศึกษาโครงสร้างแถบพลังงานเบื้องต้น .....	17
	โครงสร้างแถบพลังงานของสารประกอบ	
	กึ่งตัวนำ I-III-VI <sub>2</sub> .....	19
3	สมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ .....	28
	สมบัติการดูดกลืนแสง .....	28
	1. การดูดกลืนแสงเนื่องจากอิเล็กตรอน	
	ย้ายสถานะในแถบพลังงานเดียวกัน .....	30
	2. การดูดกลืนแสงเนื่องจากอิเล็กตรอน	
	ย้ายสถานะไปยังแถบพลังงานอื่น .....	31
	การย้ายสถานะแบบตรง .....	31
	การย้ายสถานะแบบเฉียง .....	32
	การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง .....	33
4	รอยต่อพี-เอ็นเบื้องต้น .....	35
	อิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำ .....	35
	ความหนาแน่นพาหะในสภาวะสมดุลความร้อน .....	37
	สมบัติการขนส่งของอิเล็กตรอนและโฮล .....	41
	รอยต่อพี-เอ็น .....	43
	ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก .....	45



สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
5	สภาพหน้าไฟฟ้าเชิงแสง .....	47
	กระบวนการนำไฟฟ้าเชิงแสง .....	48
	1. กระบวนการย้ายสถานะของอิเล็กตรอน ที่ทำให้เกิดสภาพหน้าไฟฟ้าเชิงแสง .....	50
	2. กระบวนการขนส่ง .....	51
	3. กระบวนการแทรกปิง และรีคอมบิเนชัน .....	52
6	การทดลองวัดสภาพหน้าไฟฟ้าเชิงแสง .....	55
	การเตรียมสารตัวอย่าง .....	55
	อุปกรณ์สำหรับวัดสภาพหน้าไฟฟ้าเชิงแสง .....	58
	การทดลองวัดสภาพหน้าไฟฟ้าเชิงแสง และผลการทดลอง .....	62
7	สรุป และวิจารณ์ผลการทดลอง .....	70
	วิเคราะห์ผลการทดลอง .....	70
	ประโยชน์ที่ได้รับจากผลการวิจัย .....	77
	ข้อเสนอแนะ .....	78
	เอกสารอ้างอิง .....	79
	ภาคผนวก .....	84
	ประวัติผู้เขียน .....	107



สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

2.1	แสดงความสัมพันธ์ของจุดสมมาตรต่าง ๆ ของโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ และแบบ ซาลโคไฟไรท์ เพื่อการพิจารณาโครงสร้าง- แถบพลังงานของซาลโคไฟไรท์ .....	22
6.1	แสดงตำแหน่งของยอดแหลมทั้งสอง ของผลตอบสนองเชิงแสง ที่อุณหภูมิต่าง ๆ .....	64
ก.1	แสดงอัตราขยายของเครื่องขยายสัญญาณขึ้นต้น ที่ตำแหน่งสวิตช์ต่าง ๆ ที่ความถี่ของสัญญาณ 20 และ 90 เฮิรตซ์ .....	86

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สารบัญภาพและแผนภูมิ

ภาพที่		หน้า
2.1	แสดง โครงสร้างผลึกแบบเพชร .....	5
2.2	แสดง โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ .....	6
2.3	แสดง โครงสร้างผลึกแบบซาลโคไฟไรท์ .....	8
2.4	แสดง บ่อศักย์ที่เป็นคาบ .....	9
2.5	ก. แสดงกราฟของสมการ 2.4 สำหรับค่า $P = 3\pi/2$ .....	11
	ข. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $k$ และพลังงานของอิเล็กตรอน .....	11
2.6	แสดง ลักษณะของแลททิซตรงและแลททิซกลับ ของ โครงผลึกแบบเพชร เซนต์ออร์คิวบิก ซึ่งมีแลททิซกลับเป็นแบบบอดี เซนต์ออร์คิวบิก .....	13
2.7	แสดง บริลลัน ไลท์แรก ของ โครงสร้างผลึก แบบเพชร เซนต์ออร์คิวบิก .....	15
2.8	แสดง การพับขอบที่เกินบริลลัน ไลท์แรก เข้ามาใน ไลท์แรก เพื่อนำเสนอแบบรีดิวิซี ไลท์ .....	16



สารบัญภาพและแผนภูมิ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
2.9	แสดงผลการประมาณแบบ NFE และ LCAO .....	17
2.10	ก. แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของเยอรมาเนียม .....	19
	ข. แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของซิลิกอน .....	19
	ค. แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของแกลเลียมอาร์เซไนด์ .....	19
2.11	แสดง Brillouin Zone ของ โครงสร้างผลึกแบบซาลโคไฟไรท์ เทียบกับของ โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ เมื่อกำหนดค่า $c/a = 2$ .....	21
2.12	แสดงการสร้างโครงสร้างแถบพลังงานของ $AgInTe_2$ โดยใช้หลักการทับ .....	23
2.13	แสดงการแยกออกของระดับพลังงานของซาลโคไฟไรท์ เทียบกับของซิงค์เบลนด์ .....	24
2.14	แสดงผลของการเกิดสถานะหลุมสมระหว่างสถานะพี และดี ในสารประกอบกลุ่ม I-III-VI <sub>2</sub> .....	26
3.1	แสดงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับพลังงานแสง ก. สำหรับการย้ายสถานะแบบตรง ข. แบบเฉียง .....	33
3.2	แสดงการทดลองวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง .....	34



## สารบัญภาพและแผนภูมิ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.1 ก. แสดงแผนภาพพันธะของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ ไม่มีสารเจือ .....	36
ข. แสดงแผนภาพพันธะของสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น .....	36
ค. แสดงแผนภาพพันธะของสารกึ่งตัวนำชนิดพี .....	36
4.2 ก. แสดงแผนภาพแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำอินทรีนสิก .....	40
ข. แสดงแผนภาพแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น .....	40
ค. แสดงแผนภาพแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพี .....	40
4.3 แสดงค่าสภาพเคลื่อนที่ได้ของพาหะในซิลิกอน กับอุณหภูมิ .....	42
4.4 แสดงความสัมพันธ์กระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อพี-เอ็น ที่แสดงสมบัติการกรองกระแส .....	43
4.5 แสดงเงื่อนไขต่าง ๆ บริเวณรอยต่อ ขณะไม่มีความต่างศักย์ตกคร่อม .....	44
5.1 แสดงกระบวนการนำไฟฟ้าเชิงแสง .....	49
5.2 แสดงการผ่อนคลายของอิเล็กตรอน .....	51
5.3 แสดงระดับอิเล็กตรอนตีมาเคชัน และ โฮลตีมาเคชัน .....	54



## สารบัญภาพและแผนภูมิ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
6.1	แสดงรอยต่อพี-เอ็นที่เตรียมได้บนชั้นสาร .....	57
6.2	แสดงภาพที่ยึดชั้นสาร, ขั้วต่อสาย, และการติดชั้นสารตัวอย่าง เพื่อการทดลองวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง .....	58
6.3	แสดงระบบที่ใช้วัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง .....	59
6.4	แสดงวงจรที่ใช้วัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง .....	61
6.5	แสดงตำแหน่งที่แสงตกกระทบชั้นสารด้านหลัง .....	63
6.6	แสดงสเปกตรัมของผลตอบสนองเชิงแสงของสาร $\text{CuInSe}_2$	
	ก. ที่ 11 เคลวิน .....	65
	ข. ที่ 100 เคลวิน .....	66
	ค. ที่ 200 เคลวิน .....	67
	ง. ที่ 300 เคลวิน .....	68
6.7	สรุปภาพผลตอบสนองเชิงแสงที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตั้งแต่ 11 ถึง 300 เคลวิน .....	69
7.1	แสดงค่าควอนตัมยิลด์ยังผล สำหรับรอยต่อของ $\text{CuInSe}_2$ ที่ 300 เคลวิน .....	71



## สารบัญคำพิงและแผนภูมิ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
7.2	แสดงตำแหน่งของยอดแหลมทั้งสองของผลตอบสนองเชิงแสงสัมพันธ์กับอนุกรมิ .....	72
7.3	แสดงการเปรียบเทียบตำแหน่งของยอดแรก เทียบกับทฤษฎี	
	ก. กับแบบจำลองของวาซนี .....	73
	ข. กับแบบจำลองของมานูเกียน .....	74
7.5	แสดงการย้ายสถานะเชิงแสงของอิเลกตรอน ทั้งแบบตรง และแบบเฉียง .....	76
ก.1	แสดงวงจรเครื่องขยายสัญญาณขั้นต้น .....	87
ข.1	แสดงวงจรเครื่องแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล .....	90

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย