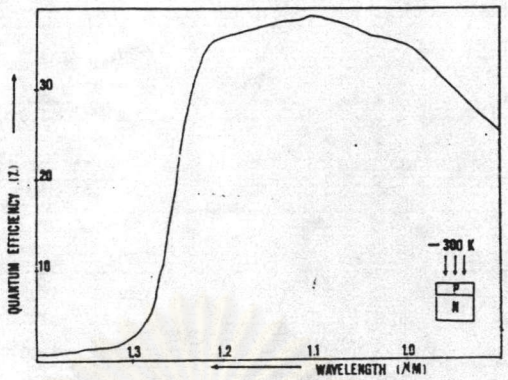
บทที่ 7

สรุป และวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดลองวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ พบว่าผลตอบสนองเชิงแสงที่พลังงานของแสงใกล้เคียงกับขนาดช่องว่างแถบพลังงาน มีลักษณะเป็นยอดแหลม (peak) สองยอดอย่างชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง จากการวัดที่อุณหภูมิต่าง ๆ จาก 11 ถึง 300 เคลวิน พบว่ายอดแหลมทั้งคู่มีการเปลี่ยนทั้งตำแหน่งพลังงาน และความเข้ม-สัมพัทธ์ ลักษณะเช่นนี้ยังไม่เคยมีรายงานมาก่อน ในบทนี้จะได้วิเคราะห์ผลการทดลอง โดยอาศัยแบบจำลองที่มีพื้นฐานทางทฤษฎีโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ และทฤษฎีการเปลี่ยนขนาดช่องว่างแถบพลังงานต่ออุณหภูมิ รวมทั้งผลจากรอยต่อพี-เอ็น ที่มีผลต่อสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงด้วย

วิเคราะห์ผลการทดลอง

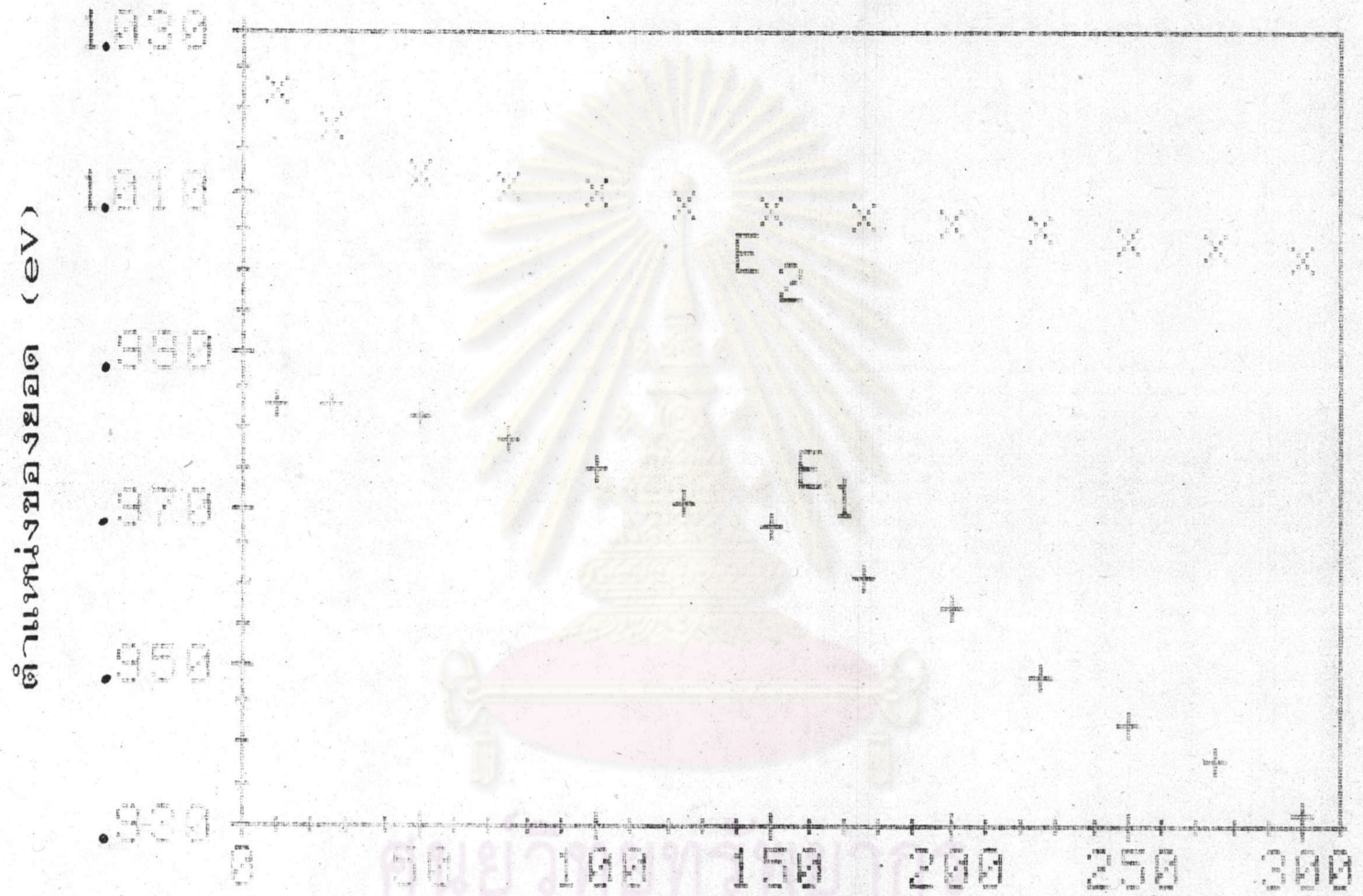
จากผลการทดลองที่ได้ พบว่ามียอดแหลมของผลตอบสนองเชิงแสง จำนวน 2 ยอด อย่างชัดเจน ทั้งสองยอดมีการเปลี่ยนแปลงไปกับอุณหภูมิ กอนซาเลซ และพวก [28] ได้รายงานค่าควอนตัมยิลยังผล (effective quantum yield) ของ $CuInSe_2$ ที่ได้รับการสร้างรอยต่อโดยวิธีคล้ายกัน ที่ 300 เคลวิน ดังภาพที่ 7.1 ซึ่งพบว่า เมื่อพลังงานของแสงต่ำกว่าประมาณ 0.97 eV จะมีค่าควอนตัมยิลน้อยมาก ดังนั้นผลตอบสนองต่อแสงที่พลังงานของแสงต่ำจึงสังเกตได้ยากมาก



ภาพที่ 7.1 แสดงค่าควอนตัมยิลยังผลสำหรับรอยต่อของ $CuInSe_2$ ที่ 300 เคลวิน

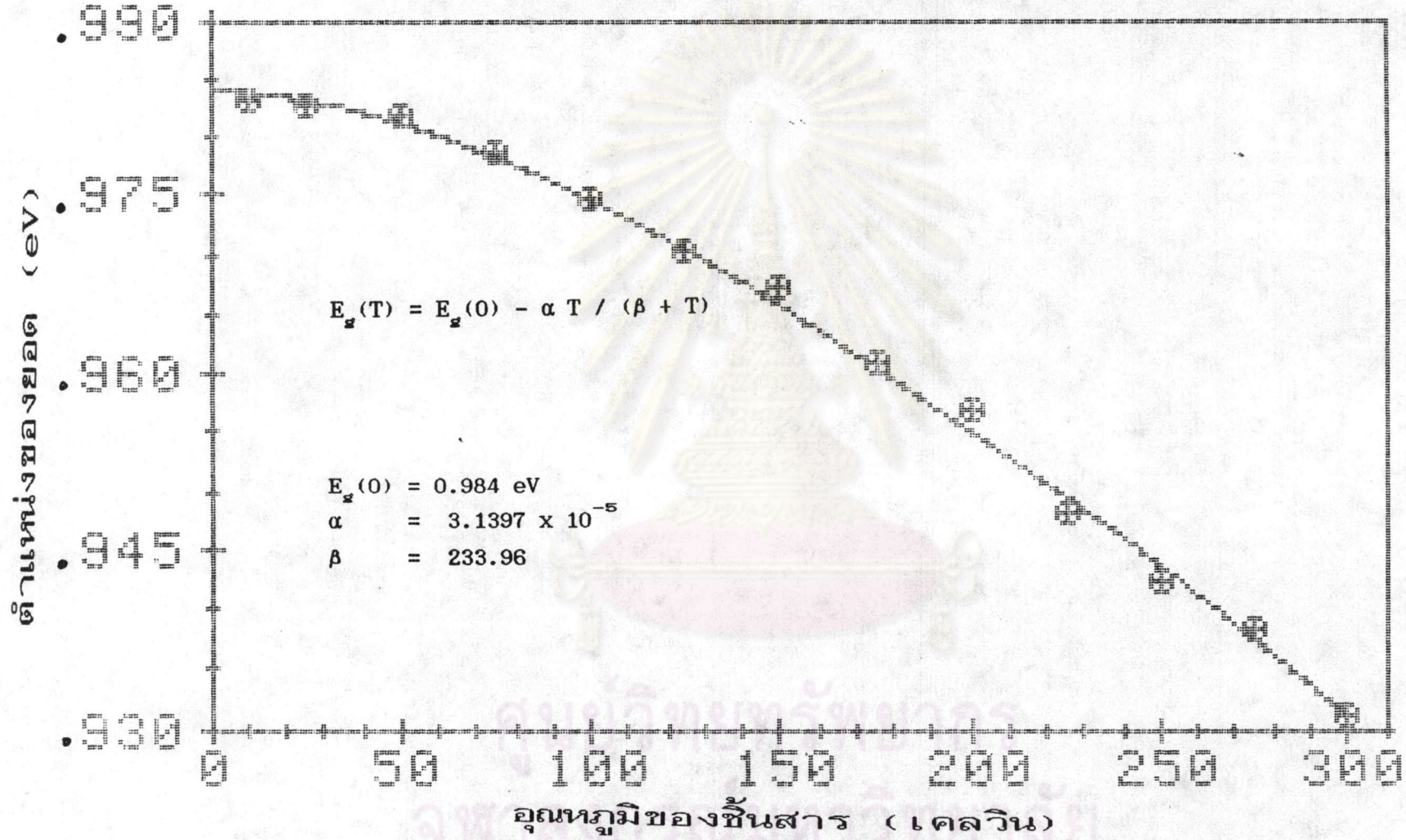
เนื่องจากยอดทั้งสองของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง มีการเลื่อนไปกับอุณหภูมิอย่างเห็นได้ชัด ดังภาพที่ 7.2 แสดงว่าเป็นผลมาจากโครงสร้างแถบพลังงานของสารที่เปลี่ยนไปกับอุณหภูมิ จึงได้ทดสอบการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของยอดแรก โดยใช้แบบจำลองของวาชนี [29] และของมานูเกียน [30] ได้ผลดังภาพที่ 7.3 ก. และภาพที่ 7.3 ข. ตามลำดับ พบว่าสามารถทดสอบได้ผลดี เชื่อว่ายอดนี้เป็นผลจากแถบวาเลนซ์แถบบนสุด เนื่องจากมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเหมาะสมกับการทดสอบทั้งสอง นอกจากนั้น เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของช่องว่างแถบพลังงานที่วัดได้จากการทดลองวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง โดยธนา [31] พบว่าผลที่ได้สอดคล้องกันดี

สำหรับยอดที่สอง ซึ่งมีระดับพลังงานสูงกว่า และมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิแตกต่างออกไป อาจเป็นผลจากแถบวาเลนซ์ที่แยกออกมาเนื่องจากสนามศักย์ของผลึกที่ไม่เป็นลูกบาศก์ ซึ่งเมื่อพิจารณาขนาดของการแยกของแถบวาเลนซ์ดังกล่าวกับอุณหภูมิเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (บริเวณใกล้ ๆ 300 เคลวิน) พบว่ามีแนวโน้มที่จะแยกออกมากขึ้น สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของค่า c/a ที่ บริเวณนี้ของ $CuInSe_2$ [7] ซึ่งพบว่าจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า Δ_{cf} ซึ่งขึ้นกับค่า (2 - c/a) เพิ่มมากขึ้น การแยกของแถบวาเลนซ์จึงมากขึ้นด้วย

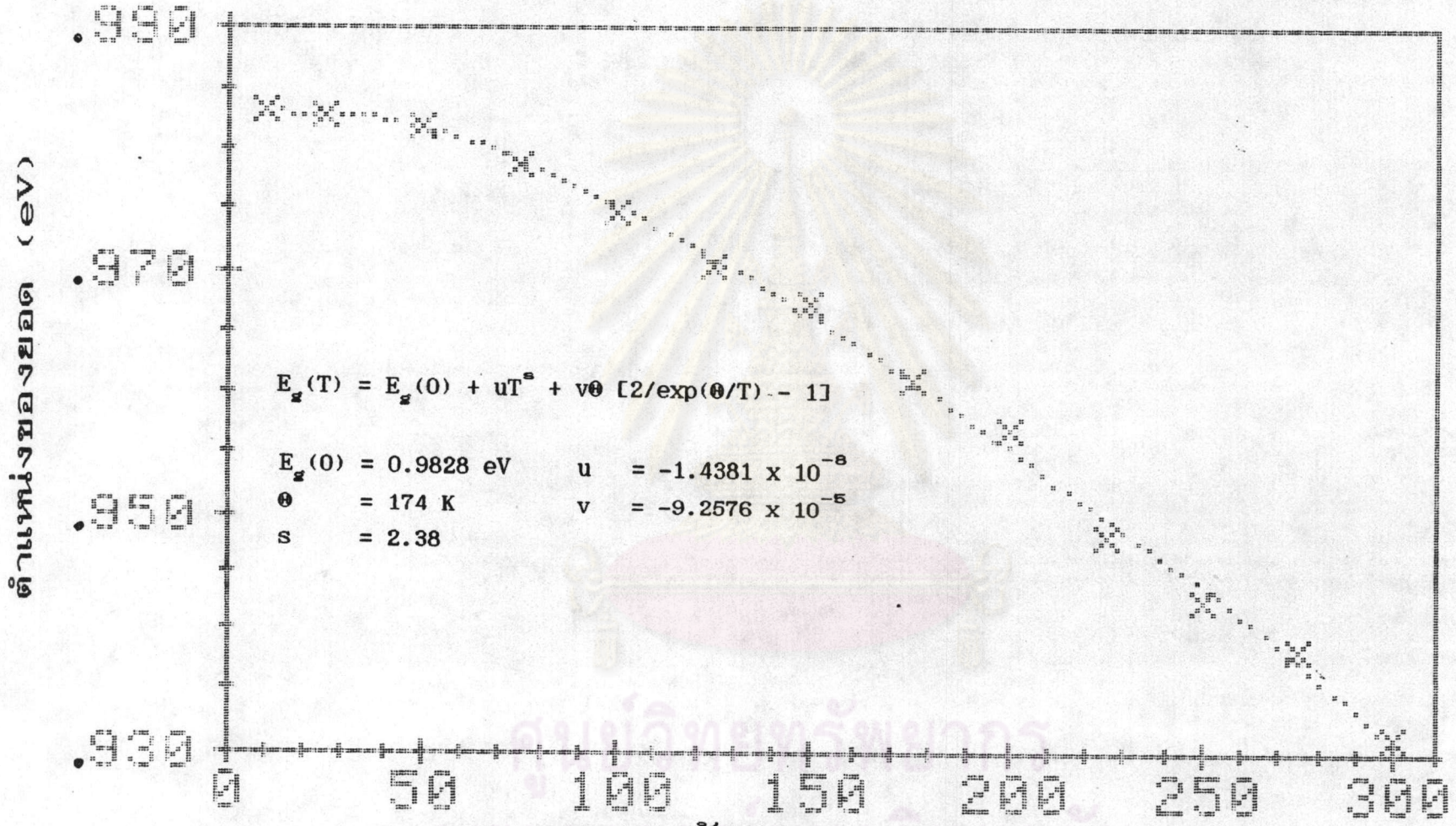


ภาพที่ 7.2 แสดงตำแหน่งของยอดแหลมทั้งสองของผลตอบสนองเชิงแสง
สัมพันธ์กับอุณหภูมิ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 7.3 ก. แสดงการเปรียบเทียบตำแหน่งของยอดแรก กับแบบจำลองของวาชนี



ภาพที่ 7.3 ข. แสดงการเปรียบเทียบตำแหน่งของยอดแรก กับแบบจำลองของมานูเกียน

อย่างไรก็ดี ขนาดของการแยกนี้ยังมากเกินไป เมื่อเทียบกับผลที่ได้จากการวัดโดยวิธีอิเลกโตรรีแฟลกแตนซ์ [32] ซึ่งพบว่ามีการแยกออกในกรณีนี้เพียง 3.8 meV เท่านั้นที่ 77 เคลวิน (ขณะที่จากการทดลองในที่นี้ได้ประมาณ 32 meV ที่ 75 เคลวิน)

กอนซาเลซ และพวก [28] ได้ทดลองวัดค่าความต่างศักย์ที่เกิดเมื่อแสงตกกระทบรอยต่อพี-เอ็นของ $CuInSe_2$ พบว่ามีผลจากรอยต่อ ทำให้เกิดยอดขึ้นสองยอดเช่นเดียวกัน ซึ่งมีแนวโน้มว่าอาจเป็นกรณีเดียวกับการวิจัยนี้ก็ได้ แต่มีข้อขัดแย้งที่สังเกตได้ชัดหลายประการ ได้แก่

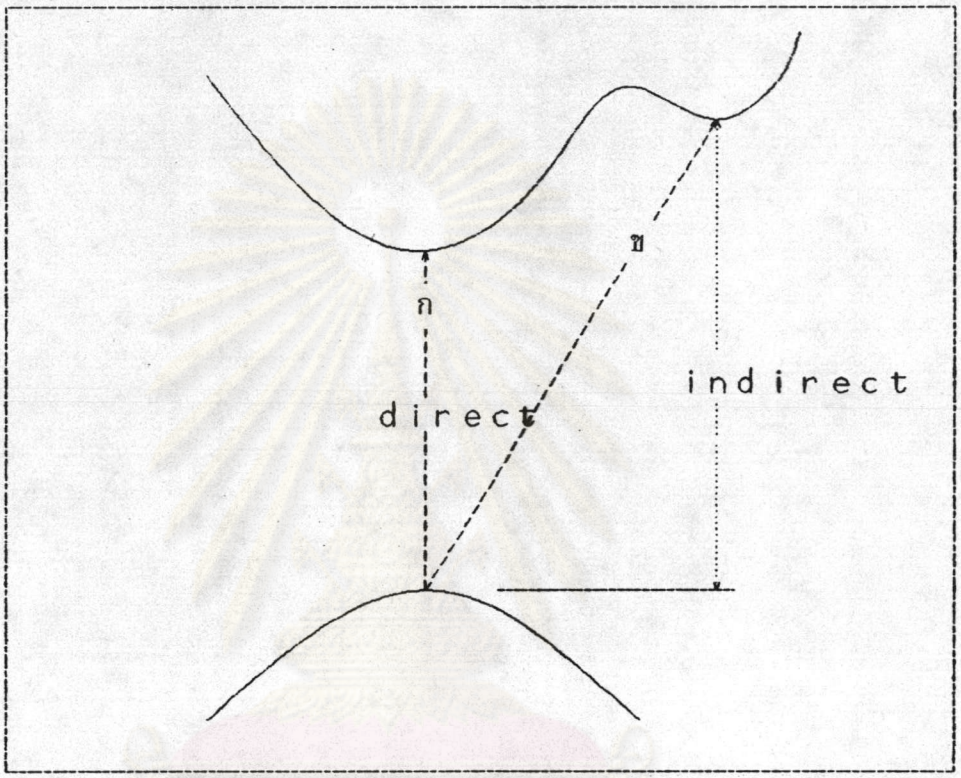
1. ถ้ายอดแรกที่สังเกตได้เป็นผลมาจากรอยต่อ เมื่อทำการฉายแสงที่ด้านหลังตรงกับรอยต่อพอดีแล้ว (ดูรูปที่ 6.5) ขนาดของยอดนี้ควรเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับอีกยอดหนึ่ง (ซึ่งคาดว่าเป็นผลจากช่องว่างแถบพลังงาน) แต่จากผลการทดลองพบว่าขนาดของยอดนี้กลับลดลง เมื่อเทียบกับอีกยอดหนึ่ง

2. ในการวิจัยนี้ ได้ทำการฉายแสงตกด้านหลัง และชิ้นสารตัวอย่างหนามาก ประกอบกับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของ $CuInSe_2$ มีค่ามาก และจากการวัดระยะลึกของรอยต่อ (junction depth) โดยความสัมพันธ์ความจุ-ความต่างศักย์ [27] พบว่าตื้นมาก ($\sim 10^{-5}$ ซม) จะถือว่า แสงที่ตกทะลุผ่านไปถึงรอยต่อได้มีค่าน้อยมาก ดังนั้น ผลที่คาดว่ามาจากรอยต่อควรจะน้อย

3. ลักษณะการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของยอดที่สอง (พลังงานมาก) มีลักษณะแปลกเมื่อเทียบกับยอดแรก (ดังภาพที่ 7.2) ไม่สอดคล้องกับการเลื่อนไปของช่องว่างแถบพลังงานที่มีผู้รายงานไว้

จากข้อโต้แย้งทั้งสามข้อ ทำให้แนวความคิดที่จะอธิบายพฤติกรรมของผลการตอบสนองเชิงแสง โดยโยงเข้ากับผลของรอยต่อพี-เอ็น ตามแนวความคิดของกอนซาเลซ เป็นไปได้น้อยมาก

แบบจำลองอีกรูปแบบหนึ่ง ที่ได้พยายามนำมาอธิบายพฤติกรรมของยอดแหลมทั้งสอง คือผลจากการย้ายสถานะพลังงานเชิงแสง (optical transition) ของอิเลกตรอน ทั้งแบบตรง และแบบเฉียง โดยอาศัยโครงสร้างแถบพลังงาน ดังภาพที่ 7.5



ภาพที่ 7.5 แสดงการย้ายสถานะเชิงแสงของอิเลกตรอน ทั้งแบบตรง (ก) และแบบเฉียง (ข)

เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่พบ ยอดแหลมที่ระดับพลังงานต่ำ เป็นผลจากการย้ายสถานะแบบตรง ซึ่งตรงกับขนาดช่องว่างแถบพลังงานของผลึก $CuInSe_2$ ขณะเดียวกันการเปลี่ยนตำแหน่งของยอดแหลมนี้กับอุณหภูมิ ก็สอดคล้องกับแบบจำลองของวาชนี และมานูเกียน นอกจากนั้น เนื่องจากการย้ายสถานะแบบเฉียงต้องการพลังงานจากโฟนอนช่วยในการย้ายสถานะพลังงาน เมื่ออุณหภูมิลดลง พลังงานของโฟนอนที่เกิดขึ้นจะน้อยลง ขนาดสัมพัทธ์ของยอดที่เกิดจากการย้ายสถานะแบบเฉียงควรจะน้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้

อย่างไรก็ดี ระดับพลังงานที่เกิดการย้ายสถานะพลังงานแบบเฉียงที่คำนวณตามทฤษฎี โดยซุงเกอร์ [10] พบว่า ระดับพลังงานดังกล่าวมีค่าสูงมาก คือประมาณ 2 eV ซึ่งห่างจากผลการทดลองมาก จึงยังไม่อาจสรุปได้จากแบบจำลองดังกล่าว

ประโยชน์ที่ได้รับจากผลการวิจัย

จากผลการทดลองที่ได้พบว่า การวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงสามารถใช้ศึกษาโครงสร้างแถบพลังงานของ $CuInSe_2$ ได้ แต่จะใช้ได้บริเวณใกล้ ๆ กับค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่านั้น โดยเฉพาะเมื่อมีระดับพลังงานอยู่ใต้แถบวาเลนซ์บนสุด เนื่องจากการศึกษาช่องว่าง-แถบพลังงานโดยการดูดกลืนแสงไม่สามารถกระทำได้ เพราะจะศึกษาได้เฉพาะแถบบนสุดเท่านั้น

นอกจากนั้น หากผลที่ได้สามารถบอกรายละเอียดของผลจากรอยต่อที่สร้างขึ้นได้ก็สามารถใช้การศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงนี้ศึกษารอยต่อของสารกึ่งตัวนำได้ และจะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์เป็นอุปกรณ์เชิงแสงต่าง ๆ ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นจุดมุ่งหมายหลักของการศึกษาสารกึ่งตัวนำ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข้อเสนอแนะ

สำหรับผลที่ได้ในขั้นนี้ ยังมีข้อขัดแย้งในตนเอง จึงควรทำการวิจัยนี้ต่อไป เพื่อยืน-ยันผลที่ได้ สำหรับการทดลองที่ควรทำได้แก่

1. ทดลองใช้แสงที่มีโพลาไรเซชันต่างกัน 90 ° ฉายตกบนชิ้นสารที่มีระนาบ (plane) ที่เหมาะสม เนื่องจากระดับพลังงานที่แยกออกของแถบวาเลนซ์เนื่องจากอันตร-กริยาจากสนามศักย์ของผลึกที่ไม่เป็นลูกบาศก์ มีผลต่อทิศทางของสนามไฟฟ้าต่าง ๆ กัน ถ้าตัดผลึกให้ได้ระนาบที่เหมาะสมจะสามารถแยกผลจากแถบวาเลนซ์คนละแถบได้

2. ทดลองเตรียมรอยต่อในลักษณะอื่น เช่น เตรียมรอยต่อโอห์มิกข้างหนึ่ง และรอยต่อพี-เอ็นอีกข้างหนึ่ง เพื่อศึกษาผลจากรอยต่ออย่างชัดเจน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย