บทที่ 10

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในการวิจัยครั้งนี้แบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนคือ การเตรียมผลึกกึ่งตัวนำให้มีขนาดใหญ่พอที่จะนำไปศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของสารกึ่งตัวนำ ผลึกกึ่งตัวนำที่เตรียมได้จะนำไปหาค่าคงที่ของโครงผลึก หลังจากนั้นจะนำไปศึกษาเพื่อหาขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ขั้นตอนถัดไปคือนำผลึกกึ่งตัวนำที่เตรียมได้นี้ไปตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า สำหรับขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการศึกษาสมบัติของรอยต่อแบบโอห์มมิกระหว่างผลึกกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ กับโลหะผสมของอินเดียม เพื่อให้ใช้ได้กับความหนาแน่นของกระแสที่มีค่าสูง ๆ และในช่วงของอุณหภูมิต่ำโดยที่รอยต่อไม่แสดงผลในการขัดขวางการไหลของกระแส

การเตรียมผลึกกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ จากสภาวะหลอมเหลวมักจะมีรอยแยกเกิดขึ้นเสมอ เนื่องจากการขยายตัวของสารขณะเริ่มเกิดเป็นผลึกในช่วงการลดอุณหภูมิของเตา (7,33) จากการเตรียมผลึกในแนวตั้งจึงมักจะมีรอยแยกในเนื้อสารเกิดขึ้นมาก ชิ้นสารที่นำมาตัดเพื่อใช้ในการทดลองจึงมักมีขนาดเล็กเกินไป การลดปัญหารอยแยกที่เกิดขึ้นนี้ทำได้โดยการเพิ่มพื้นที่ของผิวหน้าเปิด (free surface) ให้มากขึ้น เพื่อให้เนื้อสารมีการขยายตัวได้มากขึ้นโดยไม่ถูกผนังหลอดแก้วควอทซ์ขัดขวาง การเตรียมผลึกในแนวนอนจึงน่าจะเป็นวิธีที่ดีที่สุด แต่ขณะเดียวกันขนาดของชิ้นสารที่ได้จากการตัดแท่งสารตามขวางจะมีขนาดไม่ใหญ่นักเนื่องจากแท่งสารที่เตรียมได้มีขนาดค่อนข้างบาง แต่จุดประสงค์คือต้องการให้ได้ชิ้นสารที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นเราเลือกเตรียมสารโดยตั้งให้หลอดเอียง 45 องศาไปตามแนวเฉียงของเตาซึ่งขณะเดียวกันจะเป็นการเพิ่มผิวหน้าเปิดด้านส่วนบนของสารให้มากขึ้นเมื่อเทียบกับสารที่เตรียมจากแนวตั้ง รวมทั้งมีรอยแยกเกิดขึ้นในเนื้อสารมาก ดังนั้นการเตรียมสารในแนวนอนจะเป็นการเพิ่มผิวหน้าเปิดได้มากกว่าคุณภาพสารจึงดีกว่าถึงแม้ว่าสารที่เตรียมได้จะเป็นแท่งยาวก็ตาม แต่สามารถที่จะเลือกตัดเพื่อให้ได้ชิ้นใหญ่ (โดยตัดขนานกับผิวหน้า

เปิด) สำหรับการลดอุณหภูมิเพื่อให้สารจากสภาวะหลอมเหลวแข็งตัวเป็นผลึกโดยวิธีเลื่อนเตาหรือลดอุณหภูมิเตาโดยใช้วงจรไฟฟ้ากึ่งกลศาสตร์ไม่ทำให้เนื้อสารที่เตรียมได้มีความแตกต่างกันในแง่สมบัติทางฟิสิกส์ต่าง ๆ

จากการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่าเนื้อสารอยู่ในสภาวะสมดุล จึงสามารถที่จะคำนวณค่าคงที่ของโครงผลึกได้ ค่าคงที่ของโครงผลึก a และ c มีค่าเท่ากับ 5.79_4 Å และ 11.58_8 Å ตามลำดับ c/a จึงมีค่าเท่ากับ 2.00 ซึ่งสอดคล้องกับที่มีผู้รายงานไว้ (28) ขนาดของช่องว่างแถบพลังงานที่หาได้จากค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงโดยการวัดความเข้มแสงที่ทะลุผ่านสารชิ้นบาง ๆ พบว่ามีขนาดเท่ากับ 1.03 eV ที่อุณหภูมิห้องและลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรง ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับของผู้อื่นที่ได้รายงานไว้ว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานมีค่าระหว่าง 0.95 - 1.04 eV (19,27)และลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรง

จากการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าโดยวิธีชั่วความร้อนพบว่าตลอดทั้งแท่งสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ที่เตรียมได้จะเป็นชนิดพีหรือชนิดเอ็นอย่างใดอย่างหนึ่งโดยไม่ขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียม สภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้โดยใช้วิธีแวนเดอเพาว์ พบว่าสารที่เตรียมได้มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าค่อนข้างต่ำคืออยู่ในช่วง 0.1 - 10 Ω-cm. ที่อุณหภูมิห้องซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของผู้อื่น (6,27)

โดยทั่วไปปัญหารอยต่อแบบโอห์มมิกของสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ยังให้ความสำคัญกันน้อย มักจะกระทำรอยต่อแบบโอห์มมิกกันอย่างง่าย ๆ ไม่ซับซ้อนและไม่เน้นที่จะศึกษาถึงรายละเอียดมากนักทั้ง ๆ ที่รอยต่อแบบโอห์มมิกเป็นปัจจัยสำคัญที่จะทำให้ผลการทดลองเชิงไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าน่าเชื่อถือได้มากน้อยแค่ไหน จากการศึกษารอยต่อแบบโอห์มมิกระหว่าง $CuInSe_2$ กับโลหะผสมของอินเดียมตามวิธี ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ สามารถหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่รอยต่อ ช่วงของความหนาแน่นของกระแสที่ใช้ได้และช่วงของอุณหภูมิที่รอยต่อนี้ยังเป็นแบบโอห์มมิก ซึ่งปริมาณดังกล่าวนี้น่าจะเป็นปริมาณที่บ่งบอกถึงความเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิกได้ดีกว่าค่าความต้านทานจำเพาะของรอยต่อ (specific contact resistance, R_c)

ความสูงของกำแพงศักย์ที่รอยต่อระหว่างโลหะ In กับสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ชนิดพีและชนิดเอ็นมีค่าเท่ากับ 0.28 eV และ 0.3 eV ตามลำดับ ที่อุณหภูมิห้องค่าความหนาแน่นของกระแสที่ใช้ได้ต้องไม่เกิน 0.2 A/cm^2 ค่าความหนาแน่นของกระแสที่ใช้ได้นี้จะมีค่าต่ำลงที่อุณหภูมิต่ำลง (ดังกราฟในรูปที่ 9.23 และ 9.27) สำหรับรอยต่อระหว่าง In-Sn-Cd (44:42:14)) กับสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ทั้งชนิดพีและชนิดเอ็นเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิกที่ดีมากเนื่องจากสามารถใช้ได้กับช่วงความหนาแน่นของกระแสมีค่าสูงถึง 50 A/cm^2 และอุณหภูมิตั้งแต่ไนโตรเจนเหลวขึ้นไป ความสูงของกำแพงศักย์มีค่าน้อยมาก

จากการศึกษาพลังงานไอออไนซ์ของสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ โดยการวัดค่าส่วนกลับของความต้านทาน ($\frac{1}{R}$) ของสารที่อุณหภูมิต่าง ๆ ทำให้ทราบได้ว่า $CuInSe_2$ มีระดับพลังงานสิ่งเจือปนที่เกิดขึ้นเนื่องจากข้อบกพร่องของผลึกมีทั้งระดับพลังงานผู้รับ (E_a) และผู้ให้ (E_d) พลังงานไอออไนซ์ดังกล่าวของสารกึ่งตัวนำชนิดพีมีค่าเท่ากับ 20 meV, 100 meV และ 414 meV สำหรับของชนิดเอ็นมีค่าเท่ากับ 6 meV, 52 meV และ 410 meV ตามลำดับ ระดับพลังงานที่คำนวณได้เหล่านี้สอดคล้องกับผลการทดลองตามที่มีผู้รายงานไว้(12)ซึ่งทำให้ทราบว่าพลังงานไอออไนซ์ที่หาได้เป็น 414 meV และ 410 meV นั้นคือค่าเดียวกันและเป็นระดับพลังงานผู้รับที่มีค่าประมาณ 400 meV (19)

<u>ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย</u>

การเตรียมสารเป็นขั้นตอนพื้นฐานที่สำคัญในการวิจัยทางด้านฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ จากการศึกษาวิธีการเตรียมผลึกกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ทำให้ทราบถึงเทคนิคในการเตรียมเพื่อให้ได้สารที่มีขนาดใหญ่พอที่จะนำไปใช้ในการทดลองได้ ตลอดจนถึงทราบแนวทางในการหาค่าคงที่ของโครงผลึก ขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ชนิดและสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ การทำรอยต่อแบบโอห์มมิกของ $CuInSe_2$ ทั้งชนิดพีและชนิดเอ็นที่ใช้งานได้ดีที่ทุก ๆ อุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลวขึ้นไป อันเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการวัดสมบัติเชิงไฟฟ้า รวมทั้งทำให้ทราบว่า

$CuInSe_2$ ที่เตรียมได้นี้มีสิ่งเจือปนหรือความไม่สมบูรณ์ของผลึกอยู่ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการเตรียมผลึกกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ในขั้นต่อไป ในแง่ของการประยุกต์นั้นเป็นไปได้ที่จะนำ $CuInSe_2$ ที่เตรียมได้ไปใช้เป็นฐานรองเพื่อระเหย CdS เข้ามาเคลือบกลายเป็นสิ่งประดิษฐ์แบบเฮทเทอร์โรจังค์ชัน เพื่อใช้ทำเป็นโฟโตโวลตาอิกดีเทกเตอร์ หรือเซลล์แสงอาทิตย์ในโอกาสต่อไป การวิจัยนี้จึงเป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนาสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ทั้งทางวิชาการและการประยุกต์ต่อไปในอนาคต

ข้อเสนอแนะ

การเตรียมสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ จากสภาวะหลอมเหลวโดยวิธีไดเรกชันนัลฟรีซชิงเท่าที่ผ่านมายังไม่สามารถควบคุมกลไกการเกิดผลึกเอกพันธ์ที่มีขนาดใหญ่มากได้ สำหรับในการศึกษาขั้นต่อไปเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ในการเตรียมสาร เราอาจจะเลือกใช้เตาที่สามารถปรับค่าเกรเดียนท์ของอุณหภูมิและอัตราการเกิดผลึกให้เหมาะสมได้ เช่น เตาสองโซน และควบคุมการลดของอุณหภูมิด้วยวงจรไฟฟ้า รวมทั้งการเลือกใช้หลอดแก้วควอทซ์ขนาดต่าง ๆ เพื่อให้ได้แท่งผลึกขนาดตามต้องการ

เราอาจจะควบคุมชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ที่เตรียมได้โดยการแปรเปลี่ยนอัตราส่วนของ Cu, In และ Se ให้ต่างไปจากสตอยคิโอเมตตริเล็กน้อย หรือใช้วิธีโดปด้วยธาตุบางอย่างที่เหมาะสม เช่นธาตุในกลุ่ม IV หรือกลุ่ม V ลงไป อีกทั้งควรจะมีการวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall effect) เพื่อหาค่าความหนาแน่นของพาหะอิสระ สภาพเคลื่อนได้และสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงวิธีการเตรียมผลึกให้เป็นไปตามความต้องการ ตลอดจนการวัดโฟโตลูมิเนสเซนต์ (photoluminescence) เพื่อหาระดับพลังงานสิ่งเจือปนที่เกิดขึ้น