



สมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดเซลิไนด์

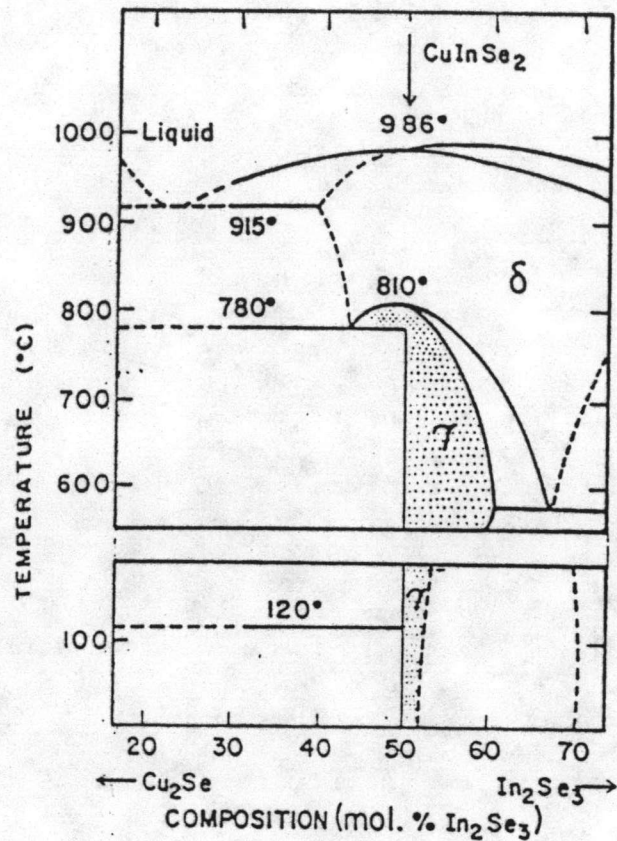
ผลึกสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 เตรียมขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Hahn และผู้ร่วมงาน [11] ในระยะเริ่มต้นการศึกษาสารกึ่งตัวนำกลุ่มซาลโคไฟไรต์ได้รับความสนใจในแง่ที่มีสมบัติพิเศษแตกต่างไปจากสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นที่รู้จักกันในขณะนั้นกล่าวคือ สารกึ่งตัวนำกลุ่มซาลโคไฟไรต์มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเทระโกนอล ส่วนสารกึ่งตัวนำอื่น ๆ มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบคิวบิก (cubic system) จึงทำให้สมบัติเชิงแสง (optical properties) ของสารกึ่งตัวนำชนิดนี้มีสมบัติพิเศษคือ ปรากฏการณ์ไบรีฟรินเจนซ์ (birefringent) [2] ซึ่งสามารถนำไปประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์เปลี่ยนความถี่แสง (nonlinear optical devices) ได้ ส่วนสมบัติอื่น ๆ ก็ได้รับการศึกษาในแนวทางเดียวกันกับสารกึ่งตัวนำทั่ว ๆ ไป ต่อมาเมื่อเกิดวิกฤตการณ์น้ำมันของโลก จึงได้มีความสนใจที่จะนำสารกึ่งตัวนำกลุ่มนี้ไปประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์

ในบทนี้เป็นการรวบรวมผลงานวิจัยที่มีผู้ทำไว้แล้วของ CuInSe_2 จนถึงปัจจุบัน เฉพาะเรื่องราวที่เกี่ยวกับงานวิจัยครั้งนี้

3.1 เฟสไดอะแกรม (phase diagram)

สารประกอบกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ส่วนใหญ่ได้จากการสังเคราะห์ขึ้นโดยตรง (direct synthesis) ระหว่างธาตุ Cu, In และ Se โดยสัดส่วนอะตอม 1:1:2 จากการศึกษาสารประกอบระหว่างธาตุทั้งสามในสัดส่วนต่างๆ พบว่าที่สัดส่วนดังกล่าวหรือที่เรียกว่า สโตยคิโอเมตริ (stoichiometry) และสัดส่วนใกล้เคียงกัน (near-stoichiometry) สารประกอบนี้จะอยู่ในเฟสเดียวกัน

เฟสไดอะแกรมของสารประกอบ Cu-In-Se ได้มีการศึกษาอย่างค่อนข้างละเอียดโดยอาศัยเฟสไดอะแกรมเชิงคู่เทียม [12] (pseudobinary phase diagram) ระหว่าง Cu_2Se กับ In_2Se_3 ดังรูปที่ 3.1



รูป 3.1 แสดงเฟสไดอะแกรมเชิงคู่เติมของสารประกอบ CuInSe_2

ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 986°C สารประกอบ CuInSe_2 จะเปลี่ยนจากสถานะหลอมเหลวเป็นของแข็งที่มีโครงสร้างเป็นแบบคิวบิกซิงค์เบลนด์ (δ -phase) โดยที่ Cu กับ In จะกระจายแบบสุ่ม (random) ในตำแหน่งซับแลตทิซ ของแคตไอออน (cation sublattice) ที่อุณหภูมิ 810°C โครงสร้างจะเปลี่ยนจากคิวบิกซิงค์เบลนด์ไปเป็นเทอร์โกนอลซาลโคไพไรท์ (γ -phase) โดยที่ Cu อยู่ที่ตำแหน่งซับแลตทิซ A และ In อยู่ที่ตำแหน่งซับแลตทิซ B จากการศึกษาศาสตร์ประกอบ CuInSe_2 ของ Becker & Wagner [13] โดยใช้วิธี DTA (Differential Thermal Analysis) พบที่มีการเปลี่ยนเฟสอีกที่อุณหภูมิ 790°C และ 665°C แต่โครงสร้างที่แท้จริงของสารประกอบในช่วงอุณหภูมินี้ยังไม่เป็นที่แน่นอน สำหรับช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 665°C สารประกอบจะเปลี่ยนโครงสร้างเป็นแบบซาลโคไพไรท์

3.2 การเตรียมผลึกกึ่งตัวนำ

ในการเตรียมผลึกกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ให้ได้ขนาดใหญ่พอสำหรับที่จะใช้ในงานวิจัยทั่วไปได้ นิยมเตรียมผลึกกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ด้วยวิธีไดเรกชันนัลฟรีซซิง (directional freezing) ซึ่งปัญหาที่นักวิจัยต้องคำนึงถึงอย่างมากในการเตรียมผลึกด้วยวิธีนี้ ที่สำคัญสรุปได้ดังต่อไปนี้ [3,14,15]

1. มีรอยแยกขนาดเล็ก (microcracks) และขนาดใหญ่ (bulk cracks) รวมทั้งผลึกแฝด (twins) ซึ่งมักเกิดขึ้นเสมอ เมื่อลดอุณหภูมิของเตาลงด้วยอัตราที่เร็วเกินไป
2. ความดันไอ (vapor pressure) ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของ Se ที่อุณหภูมิสูงกว่า 217°C รวมทั้งปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic reaction) ระหว่าง In ที่หลอมเหลวกับ Se ในสภาวะแก๊ส ซึ่งจะทำให้เกิดความดันภายในหลอดแก้วควอทซ์ที่ใช้เตรียมสารเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงอุณหภูมิ $220^\circ\text{C} - 320^\circ\text{C}$ เป็นเหตุให้หลอดแตกในกรณีที่หลอดมิด (sealed) ไม่ดีพอ หรือในกรณีบริเวณที่หลอดมิดนั้นเนื้อแก้วควอทซ์บางเกินไป
3. สารประกอบติดข้างหลอดแก้วควอทซ์ที่ใช้เตรียม ทำให้หลอดแตกขณะลดอุณหภูมิของเตาลง
4. ช่องว่าง (voids) มักเกิดขึ้นในเนื้อสารและบริเวณที่สัมผัสกับผนังด้านในของหลอดแก้วควอทซ์
5. สารประกอบที่เตรียมได้ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (inhomogeneities) ทั้งด้านองค์ประกอบ (composition) และชนิดการนำไฟฟ้า (conductivity type) ซึ่งในบางครั้งพบว่าแท่งผลึกที่เตรียมได้บางส่วนเป็นชนิดพี (p-type) แต่บางส่วนเป็นชนิดเอ็น (n-type)

จากปัญหาดังกล่าว Haupt และ Hess [16] ได้ตั้งสมมติฐานเพื่อที่จะอธิบายและแก้ปัญหที่เกิดขึ้น ดังนี้

1. ต้องคำนึงถึงชนิดและรูปร่างเรขาคณิตของภาชนะที่ใช้เตรียมสาร (ampoule or crucible)
2. ลักษณะของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียม ได้แก่ ปริมาณและความบริสุทธิ์ของธาตุ
3. วิธีการเตรียม

จากสมมติฐานดังกล่าวเขาทั้งสอง ได้ทดลอง เตรียมสารตัวอย่างตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. หลอดเตรียมสารทำจากแก้วควอทซ์ปลายหลอดเป็นรูปกรวย
2. ใช้ผลึกพหุพันธ์ (polycrystalline) เป็นสารตั้งต้น
3. อุณหภูมิที่ใช้หลอมสารจะต้องสูงกว่าจุดหลอมเหลวของสารตั้งต้นประมาณ 100°C และใช้เวลาในการหลอมอย่างน้อย 24 ชั่วโมง
4. ลดอุณหภูมิของเตาลงอย่างช้าๆ ด้วยอัตราที่เหมาะสมต่ำกว่าอุณหภูมิที่จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนเฟส (phase transition temperature)

จากขั้นตอนดังกล่าวทำให้เขาทั้งสองเตรียมสารตัวอย่างได้ผลเป็นที่น่าพอใจ โดยในกรณีสารตัวอย่างที่เตรียมได้ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน Haupt และ Hess เลือกใช้ผลึกพหุพันธ์เป็นสารตั้งต้น ส่วนในกรณีสารตัวอย่างติดข้างหลอดและเกิดช่องว่างบริเวณผิวของสารตัวอย่างที่สัมผัสกับหลอดเตรียมสาร แก้วไซโดยก่อนนำหลอดมาใช้เตรียมสาร จะต้องล้างให้สะอาดด้วยสารละลายเคมี (chemical solution) และอบให้แห้งด้วยอุณหภูมิ 1000°C และหลอมสารที่อุณหภูมิ 1100°C ใช้เวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง ขณะที่หลอมจะต้องเขย่าหลอดเตรียมสารเป็นระยะๆ เพื่อช่วยให้สารหลอมเป็นเนื้อเดียวกัน ได้ดียิ่งขึ้น [13,14] หลังจากนั้นจึงค่อยๆ ลดอุณหภูมิให้ต่ำลง เจือินไซที่สำคัญที่สุดคือช่วงอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนเฟสจะต้องใช้อัตราเร็วในการลดอุณหภูมิอย่างเหมาะสม ตัวอย่างเช่น Tomlinson [14] ลดอุณหภูมิจาก 1080°C ถึง 1000°C อย่างรวดเร็ว จาก 1000°C ถึง 950°C ลดด้วยอัตรา 2°C/hr เพื่อป้องกันการเกิดช่องว่าง จาก 950°C ถึง 850°C ลดด้วยอัตรา 6°C/hr และในช่วง 850°C ถึง 810°C ลดด้วยอัตรา 2°C/hr เพื่อลดรอยแยกขนาดเล็กที่เกิดขึ้นในเนื้อสารในขณะที่สารประกอบ CuInSe เปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิ 810°C หลังจากนั้นจึงเพิ่มอัตราการลดอุณหภูมิเป็น 10°C/hr จนถึงอุณหภูมิ 300°C จึงยุติการลดอุณหภูมิ เพื่อป้องกันการแตกของหลอดแก้วควอทซ์และเกิดออกไซด์ Tomlinson ใช้หลอดแก้วควอทซ์ 2 ชั้น

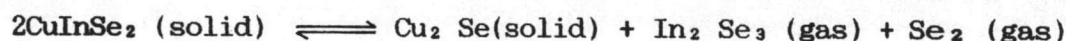
3.3 การเปลี่ยนแปลงสมบัติในการนำไฟฟ้า

แม้ว่าสมบัติขั้นพื้นฐานของสารประกอบกึ่งตัวนำในกลุ่ม I-III-VI₂ จะได้มีการศึกษามาแล้วก็ตามแต่ยังไม่ทราบรายละเอียดเกี่ยวกับข้อบกพร่องของผลึกที่เกิดขึ้นรวมทั้งระดับพลังงานของสิ่งเจือปนที่อยู่ภายในช่องว่างแถบพลังงาน โดยเฉพาะสารประกอบ CuInSe_2 ที่ส่วนใหญ่ที่เตรียมได้จะเป็นชนิดที่ทั้งที่ไม่ได้เติมสิ่งเจือปน (undoped)

สารประกอบกึ่งตัวนำในกลุ่ม I-III-VI₂ ที่มีค่าช่องว่างแถบพลังงานน้อยกว่า 1.5 eV [4] ส่วนใหญ่สภาพนำไฟฟ้า (conductivity) สามารถเปลี่ยนจากชนิดเอ็นไปเป็นชนิดพีได้ (หรือในทางกลับกัน) ด้วยการแอนนัล (anneal) ในลักษณะต่างๆ เช่น Tomlinson [14] สามารถเปลี่ยน CuInSe₂ จากชนิดเอ็นไปเป็นชนิดพี โดยการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของ Se ที่อุณหภูมิ 280 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงและสภาพต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนจาก 2-7 Ω-cm ไปเป็น 180 Ω-cm แต่ Tell และผู้ร่วมงาน [17] สามารถเปลี่ยนชนิดพีเป็นชนิดเอ็นได้โดยการแอนนัลในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 600 °C ถึง 800 °C ในสุญญากาศเป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง ซึ่งทำให้ค่าความหนาแน่นของพาหะ (carrier concentration) เปลี่ยนจาก $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ เป็น $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนจาก 0.5 Ω-cm เป็น 0.05 Ω-cm และค่าสภาพเคลื่อนที่ได้ (mobility) เปลี่ยนจาก 10 cm²/Vs เป็น 320 cm²/Vs

การเตรียม CuInSe₂ โดยการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนอะตอมไปจากสโตยคิโอมेटริเล็กน้อย (small deviations from stoichiometry) จะทำให้เกิดการเปลี่ยนชนิดของการนำไฟฟ้าและจำนวนของพาหะอิสระ เช่น ถ้ามี Cu หรือ In มากเกินไปเล็กน้อยจะได้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และถ้ามี Se มากเกินไปเล็กน้อยจะได้ชนิดพี หรือถ้าลด Se เล็กน้อยจะได้ชนิดเอ็น [14, 18] Datta และผู้ร่วมงาน [19] ได้รายงานว่าสำหรับ p-CuInSe₂ ถ้า Cu/In มากกว่า 1 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะต่ำ แต่ถ้า Cu/In น้อยกว่า 1 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าสูงกว่ามาก

สาเหตุที่การเปลี่ยนแปลงได้ทั้งชนิดและสภาพนำไฟฟ้าจากการแอนนัลในลักษณะต่างข้างกล่าวอาจเนื่องมาจากเกิดข้อบกพร่องขึ้นภายในผลึกในขณะที่แอนนัลตัวอย่างเช่น ถ้าแอนนัลในระบบปิด (closed system) ที่อุณหภูมิ 700 °C ส่วนประกอบ (component) ต่างๆที่การระเหย (evaporate) ออกมาจะเป็นไปตามความสัมพันธ์ [4]



ชนิดและสภาพนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงได้ดังกล่าวยังไม่เป็นที่เข้าใจกันอย่างชัดเจนจากการศึกษาระดับพลังงานที่เกิดขึ้นภายในช่องว่างแถบพลังงานทั้งระดับพลังงานผู้ให้และระดับพลังงานผู้รับของผลึกสารตัวอย่างที่ไม่ได้รับการเติมสิ่งเจือปนอื่นใดนอกจากการปรับสัดส่วนของธาตุทั้งสามจากสัดส่วนสโตยคิโอมेटริเล็กน้อย รวมทั้งการแอนนัลที่สภาวะต่างๆกัน พอดี

สรุปได้ว่าชนิดและสภาพนำไฟฟ้าที่ได้นั้นเกิดขึ้นจากข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นเองภายในผลึก. (intrinsic defects) ข้อบกพร่องแบบนี้เรียกว่าข้อบกพร่องทางเคมี (chemical defects) ซึ่งมักจะเกิดขึ้นกับผลึกของสารประกอบเคมีทั่วไป สำหรับในกรณีผลึก CuInSe_2 ชนิดและ โอกาสของการเกิดข้อบกพร่องที่เป็นไปได้ของผลึกนี้ สามารถอธิบายได้โดยอาศัยทฤษฎีพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอมในผลึกชนิดนี้ ทฤษฎีอาศัยแบบจำลองพันธะอไออนิก-โควาเลนต์ (ionic-covalent bonding model) [3] อธิบายถึงพลังงานยึดเหนี่ยวและ โครงสร้างผลึกที่ได้ และสามารถนำไปสู่คำอธิบายตลอดจนการคำนวณหาค่าพลังงานของการเกิดความบกพร่องแบบต่างๆ ได้ ลักษณะที่เป็นไปได้ของข้อบกพร่องจากแบบจำลองนี้มีได้ 4 รูปแบบด้วยกันคือ

1. อินเตอร์สติเชียล (interstitial) เป็นข้อบกพร่องที่เกิดจากการที่อะตอมหรือ ไอออนชนิดใดชนิดหนึ่ง ไปปรากฏในตำแหน่งซึ่งปกติไม่เป็นตำแหน่งของอะตอมในโครงผลึกชนิดนี้ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ ตำแหน่งที่อยู่ระหว่างตำแหน่งปกติของอะตอมในโครงผลึก ลักษณะของอินเตอร์สติเชียลจึงมีได้ 3 ชนิด คือ Cu_i , In_i และ Se_i ซึ่งหมายถึงการที่ Cu, In และ Se ไปปรากฏที่ตำแหน่งดังกล่าวข้างต้น
2. วาแคนซี (vacancy) หมายถึงการเกิดที่ว่างในตำแหน่ง โครงผลึกซึ่งปกติมีอะตอมอยู่ ลักษณะของข้อบกพร่องแบบนี้จึงมีได้ 3 ชนิดเช่นเดียวกับแบบแรก คือ V_{Cu} , V_{In} และ V_{Se} ซึ่งหมายถึง การเกิดที่ว่างขึ้นในตำแหน่งของ Cu, In และ Se ตามลำดับ
3. ความไม่เป็นระเบียบในแคตไอออนซับแลตทิส (antisite disorder in cation sublattice) หมายความว่าในสารที่มีโครงสร้างเป็นแบบซาลโคไพไรท์มีธาตุที่เป็นแคตไอออนอยู่ 2 ชนิด อยู่ที่ซับแลตทิส A และ B ลักษณะของข้อบกพร่องแบบนี้มีได้ 2 รูปแบบคือ Cu_{In} , In_{Cu} ซึ่งหมายถึงการที่ Cu ไปอยู่ที่ตำแหน่งซับแลตทิสของ In และ In ไปอยู่ที่ตำแหน่งซับแลตทิสของ Cu ตามลำดับ
4. ความไม่เป็นระเบียบของแคตไอออนกับแอนไอออน (cation - anion disorder) หมายถึงในตำแหน่งแลตทิสของแคตไอออนอะตอมของธาตุที่เป็นแอนไอออนไปปรากฏอยู่ ณ ตำแหน่งนั้น หรือในทางกลับกัน มีได้ทั้งหมด 4 ชนิด คือ Se_{Cu} , Se_{In} , In_{Se} และ Cu_{Se} ซึ่งหมายถึงการที่ Se ไปอยู่ที่ตำแหน่งแลตทิสของ In, Cu และการที่ In, Cu ไปอยู่ที่ตำแหน่งแลตทิสของ Se ตามลำดับ

Groenink & Jansse [20] ได้พยายามอธิบายถึงโอกาสที่จะเกิดข้อบกพร่องเองภายในผลึกในสารประกอบทั้งตัวนำ 3 ธาตุ ที่มีสูตรทางเคมีเป็น $\text{A}_x\text{B}_y\text{C}_z$ โดยนิยามพารามิเตอร์ 2 ค่า ได้แก่ นอนโมเลกุลาริตี (nonmolecularity, Δm) และ

นอนสโตยคิโอมेटรี (nonstoichiometry, Δs) ดังนี้

$$\Delta m = \frac{[A]}{[B]} - 1$$

$$\Delta s = \frac{2[C]}{[A] \cdot 3[B]} - 1$$

โดยที่ [A], [B] และ [C] เป็นจำนวนอะตอมทั้งหมดของ A, B, และ C ในผลึกตามลำดับ ในทางปฏิบัติเราใช้หารามีเตอร์การบ้ายเบนจากโมเลกุลารัต (deviation from molecularity) $x/y \neq 1$ และการบ้ายเบนจากวาเลนซ์สโตยคิโอมेटรี (deviation from valence stoichiometry) $\Delta z = z - (x/2) - (3y/2) \neq 0$ ว่าเป็นสิ่งที่ทำให้เกิดระดับพลังงานขึ้นภายในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งจะเป็นชนิดใดขึ้นอยู่กับชนิดของข้อบกพร่องของผลึก สำหรับสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 แสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.1

และจากการวัดพลังงานของการเกิดข้อบกพร่องต่างๆ (Formation energy) ในสารประกอบ CuInSe_2 แสดงในตารางที่ 3.2 จะเห็นว่าข้อบกพร่องที่จะเกิดได้ง่ายคือพวกอินเตอร์สตีเชี่ยล, วาแคนซี และความไม่เป็นระเบียบในแคตไอออนซัลไฟด์ ส่วนความไม่เป็นระเบียบของแคตไอออนกับแอนไอออนนั้นจะเกิดได้ยากกว่า

Stoichiometric condition		Majority defect pair
Molecularity x/y	Valence stoichiometry Δz	
<1	<0	V_{Cu} , In_{Cu}
<1	<0	Se_{i} , In_{Se}
<1	<0	In_{i} , ?
>1	<0	Cu_{i} , V_{In}
>1	<0	V_{Se} , V_{In}
>1	<0	V_{Se} , Cu_{In}
>1	<0	V_{Se} , Cu_{In}
<1	>0	V_{Cu} , In_{i}
<1	>0	In_{i} , Se_{i}
≈ 1	>0	Se_{i} , V_{Cu}

ตารางที่ 3.1 แสดงคู่ของข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นเนื่องจากการบ้ายเบนจากโมเลกุลารัต ($x/y \neq 1$) หรือ บ้ายเบนจากวาเลนซ์สโตยคิโอมेटรี ($\Delta z \neq 0$)

intrinsic defect	Formation energy(eV)	Electrical activity
In _{cu}	1.4	donor
Cu _{in}	1.5	acceptor
V _{se}	2.4	donor-acceptor ^a
V _{cu}	2.6	acceptor
V _{in}	2.8	acceptor
Cu _i	4.4	donor
In _{se}	5.0	donor
Se _{in}	5.5	acceptor
Cu _{se}	7.5	acceptor
Se _{cu}	7.5	donor
In _i	9.1	donor
Se _i	22.4	acceptor

^aAcceptor in the covalent-bonding model.

ตารางที่ 3.2 แสดงขนาดของพลังงานที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องชนิดต่าง ๆ ของ CuInSe₂

Rincon กับผู้ร่วมงาน [21] ใช้วิธีโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (photoluminescence) หาค่าระดับพลังงานผู้ให้และผู้รับ อีกทั้งรวบรวมผลงานของผู้อื่นไว้ด้วย ดังตารางที่ 3.3

Defect type	Energy levels (meV)	
Donors	In _{cu}	10 , 12 , 35
	Cu _i	55
	V _{se}	7 , 10 , 60 , 70 , 75 , 80 , 130
Acceptors	V _{cu}	38 , 40 , 45
	V _{in}	35 , 85 , 90
	Cu _{in}	30 , 40
	Se _i	98 , 100
	Fe _{in}	395 , 400

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าของระดับพลังงานผู้ให้และผู้รับของ CuInSe₂ ซึ่งเกิดจากข้อบกพร่องของผลึกแบบต่าง ๆ [21]

Qiu และ Shih [22] พบว่าหลังจากผ่านขบวนการความร้อน (heat treatment) และสัดส่วนประกอบ (composition) ของ Cu, In และ Se ในสารประกอบ CuInSe_2 ส่วนประกอบของ Se ในสารประกอบลดลงไป โดยที่อัตราส่วนของ Cu:In ยังคงเท่าเดิม

3.4 การทำรอยต่อแบบโอห์มมิก

สิ่งจำเป็นพื้นฐานในการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำคือ จะต้องมีการต่อขั้วไฟฟ้าออกจากสารกึ่งตัวนำ รอยต่อที่เกิดขึ้นจากโลหะ (ที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า) สัมผัสกับสารกึ่งตัวนำ จะต้องไม่แสดงผลในการขัดขวางการไหลของกระแส (nonblocking contact) รอยต่อดังกล่าวนี้นี้เรียกว่า รอยต่อแบบโอห์มมิก วิธีที่ใช้และวิธีปฏิบัติเพื่อให้ได้รอยต่อแบบโอห์มมิก ดังรายละเอียดในตารางที่ 3.4 [23]

วัสดุที่ใช้	ชนิดของ CuInSe_2	วิธีปฏิบัติเพื่อให้ได้รอยต่อแบบโอห์มมิก
Au	p	ระเหย Au ขึ้นไปเคลือบบนแผ่นผลึกในระบบสุญญากาศ
Au, Cr	p	ระเหย Cr ในระบบสุญญากาศขึ้นไปเคลือบบนแผ่นผลึกให้ได้ความหนา 70 \AA จึงระเหย Au เคลือบทับอีกชั้นด้วยความหนา 50 \AA
Au	p	สปัตเตอร์ริง (sputtering) Au ลงบนแผ่นผลึก
Au	p	กุด Au ขึ้นเล็กๆ ให้ติดแน่นบนผิวผลึกที่ทำความสะอาดแล้ว
Au	p	นำแผ่นผลึกที่ขัดด้วยกระดาษทรายแล้วจุ่มลงในสารละลาย AuCl ที่อุณหภูมิ $50^\circ - 70^\circ \text{ C}$
กาวนำไฟฟ้า	p	จนกระทั่ง Au เคลือบบนแผ่นผลึกหนาพอสมควร ขัดแผ่นผลึกด้วยกระดาษทรายแล้วป้ายด้วยกาวนำไฟฟ้า (silver paint) ก่อนที่จะนำไปเชื่อมกับลวดอลูมิเนียม
Ni	n,p	กุดด้วย Ni ขึ้นเล็กๆ ให้ติดแน่น
In	n	ให้แผ่นผลึก CuInSe_2 ที่อุณหภูมิ 200° C ภายในระบบสุญญากาศ ความดันต่ำกว่า $1 \times 10^{-6} \text{ torr}$ แล้วระเหย In ขึ้นไปเคลือบหนา 5000 \AA บล่อยไว้นาน 2-3 นาที จึงลดอุณหภูมิลง

ตารางที่ 3.4 แสดงวัสดุและวิธีปฏิบัติในการทำรอยต่อแบบโอห์มมิก ของ CuInSe_2

3.5 การทำรอยต่อพี-เอ็น ไฮโมจังค์ชัน

ในการประดิษฐ์อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (semiconductor devices) เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) ที่มีประสิทธิภาพสูง อุปกรณ์บันทึกแสง (photodetector) อุปกรณ์เหล่านี้จะต้องทำเป็นรอยต่อแบบพี-เอ็น (p-n junction) รอยต่อแบบนี้มี 2 ชนิดคือ รอยต่อแบบไฮโมจังค์ชัน (homojunction) ซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกัน แต่ถูกโด๊ปต่างกัน กับรอยต่อแบบเฮเทอโรจังค์ชัน (heterojunction) ซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกัน มีช่องว่างแถบพลังงานต่างกัน ดังนั้นในการทำรอยต่อพี-เอ็นนี้ แบบไฮโมจังค์ชัน จะสามารถทำได้ง่ายกว่า และโครงสร้างแถบพลังงานของไฮโมจังค์ชัน ได้มีการศึกษาอย่างค่อนข้างละเอียดแล้ว มีผู้รายงานเกี่ยวกับสารที่ใช้ทำรอยต่อพี-เอ็นไฮโมจังค์ชัน ชนิดของการนำไฟฟ้าของ CuInSe_2 ที่ใช้เป็นแผ่นรองรับ (substrate) และวิธีปฏิบัติเพื่อให้ได้รอยต่อแบบพี-เอ็น ไฮโมจังค์ชัน ดังรายละเอียดในตารางที่ 3.5

วัสดุที่ใช้	ชนิดการนำไฟฟ้าของ CuInSe ₂ ที่ใช้เป็นแผ่นรองรับ	วิธีปฏิบัติเพื่อให้ได้รอยต่อแบบพี-เอ็น โสโมจังค์ชัน	เอกสารอ้างอิง
In	p	กอด In ให้ติดกับแผ่นรองรับแล้วแอนนัลที่อุณหภูมิ 450 °C 18 นาทีในบรรยากาศของซีเลียม	18
In, Cu	p	ระเหย (evaporation) ขึ้นไปบนแผ่นรองรับแล้วทำให้แพร่กระจาย (diffuse) ที่อุณหภูมิ 200 °C 20 นาที ในบรรยากาศของไนโตรเจน	14 15 24
Cd	p	แอนนัลในบรรยากาศของ Cd ที่อุณหภูมิ 400 °C 6-8 นาที	25
Br, Cl, Zn, Cd	p	ยิงด้วยอะตอมหรือไอออน (ion-implanted) ด้วยเครื่องเร่งอนุภาคพลังงานสูงประมาณ 135 keV แล้วแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 °C 20-30 นาที	26 27
Zn, Cd	p	กอด Zn และ Cd ให้ติดกับแผ่นรองรับแล้วแอนนัลที่อุณหภูมิ 200-450 °C 1-5 นาที	28
Se	n	แอนนัลในบรรยากาศของ Se เป็นเวลาสั้นๆ	29
In	p	เคลือบ In ด้วยไฟฟ้า (electrodeposition) ไปบนหัวด้านหนึ่งแล้วทำให้ In แพร่กระจายที่อุณหภูมิ 300 °C 10 นาที ในบรรยากาศของไนโตรเจนและไฮโดรเจน	30

ตารางที่ 3.5 แสดงชนิดสารที่ใช้และวิธีการทำรอยต่อพี-เอ็น โสโมจังค์ชันของ CuInSe₂