

บทที่ 3

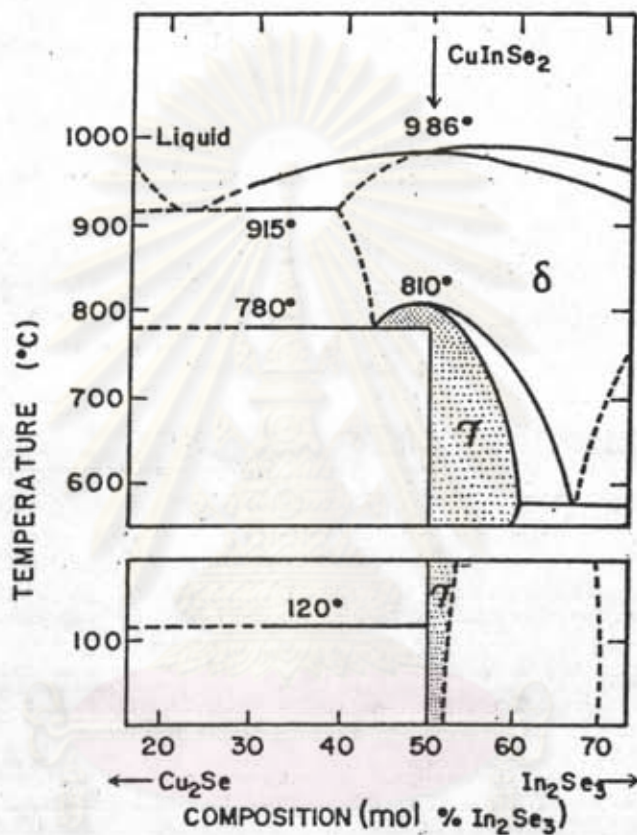
สมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดเซลีไนด์

นับตั้งแต่ Hahn และผู้ร่วมงาน² (พ.ศ. 2496) ได้ริเริ่มเตรียม CuInSe_2 ขึ้นเป็นครั้งแรก ในระยะเริ่มต้นการศึกษาสารกึ่งตัวนำกลุ่มซาลโคไฟไรต์ได้รับความสนใจในแง่สมบัติที่พิเศษแตกต่างไปจากสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นที่รู้จักกันในขณะนั้นกล่าวคือ สารกึ่งตัวนำกลุ่มซาลโคไฟไรต์มีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบเพระโกนอล (tetragonal system) ส่วนสารกึ่งตัวนำอื่น ๆ มีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบคิวบิก (cubic system) จึงทำให้สมบัติเชิงแสง (optical properties) ของสารกึ่งตัวนำชนิดนี้มีสมบัติพิเศษ คือปรากฏการณ์ไบรีฟรินเจนซ์ (birefringent) ซึ่งสามารถนำไปประดิษฐ์เป็น อุปกรณ์เปลี่ยนความถี่แสง (nonlinear optical devices) ขณะเดียวกันสมบัติอื่น ๆ ก็ได้รับการศึกษาไปในแนวทางเดียวกันกับสารกึ่งตัวนำทั่วไป จนกระทั่งเมื่อเกิดวิกฤตการณ์น้ำมันของโลกในปี พ.ศ. 2520 จึงมีความสนใจในด้านที่จะนำไปประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์กึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดเซลีไนด์ในคอนตัน ในบทนี้จะรวบรวมผลงานที่ได้มีผู้วิจัยไว้แล้วสำหรับ CuInSe_2 เฉพาะเรื่องราวที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยครั้งนี้จนถึงปัจจุบัน

3.1 เฟสไดอะแกรม (phase diagram)

สารประกอบ CuInSe_2 ส่วนใหญ่ได้จากการสังเคราะห์ขึ้นโดยตรง (direct synthesis) ระหว่างธาตุ Cu, In และ Se โดยสัดส่วนอะตอม 1 : 1 : 2 การศึกษาสารประกอบระหว่างธาตุทั้งสามในสัดส่วนต่าง ๆ พบว่าที่สัดส่วนดังกล่าวหรือที่เรียกว่า สโตยคิโอเมตริกและสัดส่วนใกล้เคียงกัน (near-stoichiometry) สารประกอบนี้จะอยู่ในเฟสเดียวกัน

เฟสไดอะแกรมของสารประกอบ Cu-In-Se ได้รับการศึกษามาแล้วค่อนข้างละเอียดโดยอาศัยเฟสไดอะแกรมเชิงคู่เทียม (pseudo-binary phase diagram) (10) ระหว่าง Cu_2Se กับ In_2Se_3 ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงเฟสไดอะแกรมของสารประกอบ Cu-In-Se

ที่อุณหภูมิต่ำกว่า $986\text{ }^{\circ}\text{C}$ CuInSe_2 จะเปลี่ยนจากสภาพหลอมเหลวเป็นของแข็งที่มีโครงสร้างเป็นแบบซิงค์เบลนด์ (δ -phase) หรือที่เรียกว่า โครงสร้างแบบคิวบิกเทียม (pseudocubic phase) แคตไอออน (cation) ประกอบด้วย Cu กับ In จะเรียงตัวไม่เป็นระเบียบในตำแหน่งซับแลตทิซของแคตไอออน (cation sublattice) แต่จะอยู่ในลักษณะกระจายแบบสุ่ม (random) ที่อุณหภูมิ $810\text{ }^{\circ}\text{C}$ โครงสร้างจะเปลี่ยนจากซิงค์เบลนด์ไปเป็นซาลโตไฟรท์ (γ -phase) สารตัวอย่างที่เตรียมได้อาจเป็นชนิด

เอ็นหรือชนิดที่ เมื่อไม่นานมานี้ Becker & Wagner (11,12) ได้ศึกษาสารประกอบ CuInSe_2 โดยใช้วิธี DTA (Differential Thermal Analysis) ได้รายงานว่า จะมีการเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิ 810°C และ 665°C แต่โครงสร้างที่แท้จริงของสารประกอบในช่วงอุณหภูมิ $665^\circ\text{C} - 810^\circ\text{C}$ ยังไม่เป็นที่ยืนยัน สำหรับช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 665°C จะเปลี่ยนเป็นโครงสร้างแบบซาลโคไฟไรท์

3.2 การเตรียมผลึกกึ่งตัวนำ

ปัญหาใหญ่ที่นักวิจัยประสบอยู่คือยากที่จะเตรียมผลึกกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ให้ได้ขนาดใหญ่มากพอสำหรับใช้ในงานวิจัยทั่วไปได้ จึงได้มีการพัฒนาวิธีเพื่อเตรียมผลึกชนิดนี้กันอย่างจริงจัง ถึงกระนั้นก็ตามการเตรียมผลึกยังอยู่แค่ระดับห้องปฏิบัติการ (research laboratories) เพื่อใช้ในการศึกษาและวิจัยเท่านั้น โดยทั่วไปนิยมเตรียมผลึกกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ด้วยวิธีโคเรกชันนัล ฟรีซซิง (directional freezing) ปัญหา (13) ที่สำคัญที่นักวิจัยต้องคำนึงถึงอย่างมากในการเตรียมผลึกด้วยวิธีนี้สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ความดันไอ (vapour pressure) ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของ Se ที่อุณหภูมิสูงกว่า 217°C อีกทั้งปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic reaction) ระหว่าง In ที่หลอมเหลวกับ Se ในสภาวะแก๊ส อันก่อให้เกิดความดันภายในหลอดแก้วควอทซ์ที่ใช้เตรียมสารเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงอุณหภูมิ $220^\circ\text{C} - 320^\circ\text{C}$ ซึ่งจะเป็นเหตุให้หลอดแตกในกรณีที่หลอดปิดหลอด (sealed) ไม่ดีพอหรือในกรณีบริเวณที่หลอดปิดนั้นเนื้อแก้วควอทซ์บางเกินไป

2. สารประกอบที่เตรียมได้ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (inhomogeneities) ทั้งด้านองค์ประกอบ (composition) และชนิดการนำไฟฟ้า (conductivity type) ซึ่งในบางครั้งพบว่า แท่งผลึกที่เตรียมได้บางส่วนเป็นชนิดที่ (p-type) แต่บางส่วนเป็นชนิดเอ็น (n-type) (6)

3. รอยแยกขนาดเล็ก (microcracks) และขนาดใหญ่ (bulk cracks) รวมทั้งผลึกแฝด (twins) มักจะเกิดขึ้นเสมอเมื่อลดอุณหภูมิของเตาลงด้วยอัตราที่เร็วเกินไป

4. ช่องว่าง (voids) มักจะเกิดขึ้นในเนื้อสารและบริเวณที่สัมผัสกับผิวคานในของหลอมแก้วควอทซ์

Haupt และ Hess (7) ได้ตั้งสมมุติฐานเพื่อที่จะอธิบายและแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ สมมุติฐานดังกล่าวคือ

1. ต้องคำนึงถึงชนิดและรูปทรงเรขาคณิตของภาชนะที่ใช้เตรียมสาร (ampoule or crucible)
2. ลักษณะของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียม เช่น ปริมาณ และความบริสุทธิ์ของธาตุ
3. วิธีการเตรียม

จากสมมุติฐานดังกล่าว เขาทั้งสองทดลองเตรียมสารตัวอย่างซึ่งได้ผลเป็นที่น่าพอใจตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. หลอมเตรียมสารทำจากแก้วควอทซ์ปลายหลอมเป็นรูปกรวย
2. ใช้ผลึกพหุพันธ์ (polycrystalline) เป็นสารตั้งต้น
3. อุณหภูมิที่ใช้หลอมสารจะต้องสูงกว่าจุดหลอมเหลวของสารตั้งต้นประมาณ 100°C และใช้เวลาในการหลอมอย่างน้อย 24 ชั่วโมง
4. ลดอุณหภูมิของเตาลงอย่างช้า ๆ ด้วยอัตราที่เหมาะสมจนต่ำกว่าอุณหภูมิที่จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนเฟส (phase transition temperature)

จากการทดลองเขาพบว่าถ้าใช้ภาชนะที่ทำด้วยอลูมินา (alumina) จะเป็นสาเหตุให้สารตัวอย่าง (samples) ที่เตรียมได้มีรอยแตกทั้งขนาดเล็กและใหญ่ รวมทั้งเป็นผลึกแผ่น สาเหตุดังกล่าวนี้อาจเนื่องมาจากสมบัติของผิวและรูปทรงเรขาคณิตของภาชนะที่ใช้ โดยทั่วไปการเตรียมผลึกด้วยวิธีโคเรกซ์ชันล หรือวิธีอื่นมักจะให้ปลายของภาชนะเป็นมุมกรวยแหลม(7,31) เพราะเชื่อว่าในส่วนนี้จะเป็จุดกำเนิดของนิวคลีเอชัน (nucleation) และผลึกที่เกิดขึ้นในส่วนถัดไปจะเป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั้งก้อน โดยมีลักษณะโครงสร้างเหมือนนิวคลีเอชัน

กรณีสารตัวอย่างที่เตรียมได้ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน จะทำให้เกิดข้อบกพร่องของผลึก (crystal defects) เพื่อให้แน่ใจว่าสารตัวอย่างที่เตรียมเป็นเนื้อเดียวกัน Haupt และ Hess เลือกใช้ผลึกพหุพันธ์เป็นสารตั้งต้น ช่องว่าง (voids) ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของสารตัวอย่างที่สัมผัสกับหลอดเตรียมสารสามารถแก้ไขได้โดยก่อนนำหลอดมาใช้เตรียมสารจะต้องล้างให้สะอาดด้วยสารละลายเคมี (chemical solution) และอบให้แห้งด้วยอุณหภูมิ 1000°C และหลอมสารที่อุณหภูมิ 1080°C ใช้เวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง ขณะที่หลอมจะต้องเขย่าหลอดเตรียมสารเป็นระยะ ๆ เพื่อช่วยให้สารหลอมเป็นเนื้อเดียวกันได้ดียิ่งขึ้น (10, 14) หลังจากนั้นจึงค่อย ๆ ลดอุณหภูมิให้ต่ำลง เงื่อนไขที่สำคัญที่สุดก็คือช่วงอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงจะต้องใช้อัตราเร็วในการลดอุณหภูมิอย่างเหมาะสม ต่อจากนั้นอาจจะเพิ่มอัตราการลดอุณหภูมิให้เร็วขึ้น ตัวอย่างเช่น Tomlinson (14) ลดอุณหภูมิจาก 1080°C ถึง 1000°C อย่างเร็ว และจาก 1000°C จนถึง 950°C ด้วยอัตรา 2°C/hr . ในช่วงตั้งแต่ 950°C ถึง 850°C ใช้อัตรา 6°C/hr . สำหรับอุณหภูมิตั้งแต่ 850°C ถึง 810°C ใช้อัตรา 2°C/hr . เพื่อลดรอยแตกขนาดเล็กที่เกิดขึ้นในเนื้อสารในขณะที่สารประกอบ CuInSe_2 เปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิ 810°C หลังจากนั้นจึงเพิ่มอัตราการลดอุณหภูมิเป็น 10°C/hr . จนถึงอุณหภูมิ 300°C จึงยุติการลดอุณหภูมิ

3.3 การเปลี่ยนแปลงสมบัติในการนำไฟฟ้า

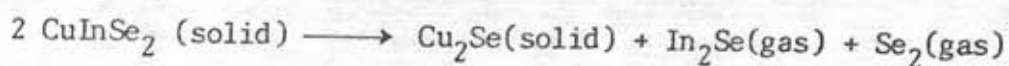
ถึงแม้สมบัติขั้นพื้นฐานทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม I-III-VI₂ จะได้มีการศึกษามาแล้วก็ตาม แต่ก็ยังไม่ทราบรายละเอียดเกี่ยวกับข้อบกพร่องของผลึกที่เกิดขึ้นรวมทั้งระดับพลังงานของสิ่งเจือปนที่อยู่ภายในช่องว่างแถบพลังงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลึกกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ที่เตรียมได้ส่วนใหญ่จะเป็นชนิดพี ทั้ง ๆ ที่ไม่ได้เติมสิ่งเจือปนลงไป (undoped)

ส่วนใหญ่สภาพนำไฟฟ้าของสารประกอบกลุ่ม I-III-VI₂ ที่มีค่าช่องว่างแถบพลังงานน้อยกว่า 1.5 eV (15, 16) โดยเฉพาะ CuInSe_2 สามารถที่จะเปลี่ยนจากชนิดพีเป็นชนิดเอ็นได้ (หรือในทางกลับกัน) โดยการแอนนัล (anneal) ในลักษณะต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น Parkes และผู้ร่วมงาน (17) สามารถเปลี่ยน CuInSe_2 จาก

ชนิดเอ็นเป็นชนิดพีได้โดยการแอนนัลในบรรยากาศของ Se ที่อุณหภูมิ 600° C เป็นเวลานาน 15 นาที แต่ Tell และผู้ร่วมงาน สามารถเปลี่ยนชนิดพีเป็นชนิดเอ็นได้โดยการแอนนัลในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 600° C ถึง 800° C เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง ซึ่งทำให้ค่าความหนาแน่นของพาหะ (carrier concentration) เปลี่ยนจาก $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ เป็น $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนจาก 0.5 $\Omega\text{-cm}$. เป็น 0.05 $\Omega\text{-cm}$. และค่าสภาพเคลื่อนได้ (mobility) เปลี่ยนจาก 10 $\text{cm}^2/\text{V.S}$ เป็น 320 $\text{cm}^2/\text{V.S}$ (15)

นอกจากการแอนนัลจะทำให้เกิดการเปลี่ยนชนิดของการนำไฟฟ้าแล้วยังสามารถทำให้เกิดเฉพาะการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้ควย เช่น Shih และผู้ร่วมงาน (6) ทดลองแอนนัล p-CuInSe₂ ภายใต้สุญญากาศ (ความดันต่ำกว่า 10^{-5} torr) ที่อุณหภูมิ 250° C เป็นเวลานาน 8 นาที พบว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนจาก 1 $\Omega\text{-cm}$. เป็น 15 $\Omega\text{-cm}$. การเตรียม CuInSe₂ โดยการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนอะตอมไปจากสโตยคิโอเมตรีเล็กน้อย (small deviations from stoichiometry) จะทำให้เกิดการเปลี่ยนชนิดของการนำไฟฟ้าและจำนวนของพาหะอิสระ เช่น ถ้ามี Se มากเกินไปเล็กน้อยจะได้นำเป็นตัวนำเป็นชนิดพี และถ้า In มากเกินไปเล็กน้อยจะเป็นชนิดเอ็น (12) Datta กับผู้ร่วมงาน ได้รายงานไว้ว่า สำหรับ p-CuInSe₂ ถ้า Cu/In มากกว่า 1 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะต่ำ แต่ถ้า Cu/In น้อยกว่า 1 แล้วค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าสูงกว่ามาก (18)

สาเหตุที่มีการเปลี่ยนแปลงได้ทั้งชนิดและสภาพนำไฟฟ้าจากการแอนนัลในลักษณะต่าง ๆ ดังกล่าว อาจจะเนื่องมาจากเกิดข้อบกพร่องที่ภายในผลึกในขณะที่แอนนัล ตัวอย่างคือ ถ้าแอนนัลในระบบปิด (closed system) ที่อุณหภูมิ 700° C ณ สภาวะสมดุล ส่วนประกอบ (component) ต่าง ๆ ที่มีการระเหย (evaporate) ออกมาจะเป็นไปตามความสัมพันธ์ (16)



ชนิดและสภาพนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงได้คงกลายยังไม่เป็นที่เข้าใจกันอย่างชัดเจน รวมทั้งมีการศึกษาระดับพลังงานที่เกิดขึ้นภายในช่องว่างแถบพลังงานพบว่ามีระดับพลังงานผู้ให้ (donor energy levels) และระดับพลังงานผู้รับ (acceptor energy levels) Groenink & Jansse (16) ได้พยายามอธิบายระดับพลังงานทั้งผู้ให้และผู้รับในรูปของข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นเองภายในผลึก (intrinsic defects) โดยนิยามพารามิเตอร์ 2 ค่า เรียกว่า นอนโมเลกุลาริตี (nonmolecularity, Δx) และนอนสโตยคิโอเมตริ (nonstoichiometry, Δy) ดังนี้คือ

$$\Delta x = \frac{[Cu]}{[In]} - 1$$

$$\Delta y = \frac{2 [Se]}{[Cu] + 2 [In]} - 1$$

โดยที่ $[Cu]$, $[In]$ และ $[Se]$ เป็นจำนวนอะตอมทั้งหมดของ Cu, In และ Se ในผลึก ตามลำดับ สำหรับในกรณีที่ Δx มีค่าน้อยกว่าศูนย์ ระดับพลังงานที่เกิดขึ้นภายในช่องว่างแถบพลังงานจะเป็นชนิดใดขึ้นอยู่กับชนิดของข้อบกพร่องของผลึก รายละเอียดจะปรากฏอยู่ในตารางที่ 3.1

Majority defect pair		Deviation from stoichiometry (Δy)
Acceptor	Donor	
V_{Cu}	In_{Cu}	< 0
V_{Cu}	V_{Se}	< 0
V_{Cu}	In_i	> 0
Se_i	In_{Se}	> 0
Se_i	In_i	> 0

ตารางที่ 3.1 แสดงชนิดการนำไฟฟ้าของ $CuInSe_2$ ที่เกิดจากชนิดของข้อบกพร่องของผลึกซึ่งเป็นกรณีที่ Δx น้อยกว่าศูนย์ (19)

Defect type		Formation energy (eV)
Vacancies	V_{Se}	2.4
	V_{Cu}	2.6
	V_{In}	2.8
Interstitials	Cu_i	4.4
	In_i	9.1
	Se_i	22.4
Antisites	In_{Cu}	1.4
	Cu_{In}	1.5
	In_{Se}	5.0
	Se_{In}	5.5
	Se_{Cu}	7.5
	Cu_{Se}	7.5

ตารางที่ 3.2 แสดงขนาดของพลังงานที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องชนิดต่างๆ ของผลึก $CuInSe_2$ (19)

Rincon กับผู้ร่วมงาน (19) ใช้วิธีโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (photoluminescence) หาการะดับพลังงานผู้ให้และผู้รับอีกทั้งรวบรวมผลงานของผู้อื่นไว้ด้วย ดังปรากฏในตารางที่ 3.3

Intrinsic defect		References							
		[8]	[9]	[11]	[13]	[42]	[43]	[44]	This work
Donor	In _{Cu}	—	—	35	—	10	—	—	12
	Cu _I	—	—	55	—	—	—	—	—
	V _{Se}	70	10	130 ^a	60 - 80	—	—	7	75
Acceptor	V _{Cu}	40	—	45	40	—	—	—	38
	V _{In}	—	35	85	—	—	90	—	—
	Cu _{In}	—	—	30	—	—	40	—	—
	Se _I	—	100	—	—	—	—	98	—
	Fe _{In}	—	400	—	—	—	400	395	—

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าของระดับพลังงานผู้ให้และผู้รับของ CuInSe₂ ซึ่งเกิดจากขอบกพร่องของผลึกแบบต่าง ๆ

3.4 การทำความสะอาดผิวหน้าผลึก

การทำความสะอาดผิวหน้าของผลึกสารกึ่งตัวนำมีความสำคัญมากต่อการที่จะนำไปใช้ศึกษาในขั้นต่อไปที่ต้องคำนึงถึงความสะอาด เรียบ และความสมบูรณ์ของผิวหน้าผลึก โดยเฉพาะการนำไปใช้เป็นฐานรอง (substrate) เพื่อปลูกชั้นผลึก (Epitaxial layer) ที่มีคุณภาพดีต่อไปซึ่งจะนำไปใช้ทำเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีประสิทธิภาพสูง เช่น ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า (field-effect transistor, FET) หรือเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น การทำความสะอาดผิวหน้าผลึกเป็นปัญหาที่สำคัญที่จะมีผลต่อสิ่งประดิษฐ์นั้นโดยตรง แผ่นผลึกที่ตัดออกมาจากแท่งผลึกจะถูกนำไปขัดให้เรียบเป็นมันวาวด้วยผงขัดซิลิกอนคาร์ไบด์หรือผงขัดอลูมินา จากนั้นจึงนำไปกัดผิวหน้าด้วยสารละลายเคมี (chemical etching solution) ที่เหมาะสมเพื่อขจัดผิวหน้าส่วนที่ชำรุดเนื่องจากการขัด ชนิดของสารละลายเคมีและวิธีการที่ใช้กับสารกึ่งตัวนำ CuInSe₂ ดังปรากฏในตารางที่ 3.4

สารละลายเคมี	ชนิดของ CuInSe ₂	วิธีปฏิบัติ	ชื่อเอกสารอ้างอิง
Br + CH ₃ OH	n, p	ไม่กล่าวถึงรายละเอียด	7, 20, 21
HCl + HNO ₃ (1:1)	p	กัดด้วยสารละลายเคมีที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 2 นาที	6, 22, 23
HCl + HNO ₃ (1:1)	p	อุณหภูมิสารละลายเคมีที่ร้อน	24, 25, 26, 27
HCl + HNO ₃ (3:1) (aqua-regia)	p	ใช้เวลาในการกัดผิว 10-30 วินาที แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นจำนวนมาก	28

ตารางที่ 3.4 แสดงชนิดของสารละลายเคมีและวิธีปฏิบัติ เพื่อทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นผลึก CuInSe₂

3.5 การทำรอยต่อแบบโอห์มมิก

แต่สิ่งจำเป็นพื้นฐานในการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำก็จะต้องมีการต่อขั้วไฟฟ้าออกจากสารกึ่งตัวนำ รอยต่อที่เกิดขึ้นจากโลหะ (ที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า) สัมผัสกับสารกึ่งตัวนำจะต้องไม่แสดงผลในการขัดขวางการไหลของกระแส (nonblocking current) รอยตอดังกล่าวนี้นี้เรียกว่า รอยต่อแบบโอห์มมิก มีผู้รายงานเกี่ยวกับวัสดุที่ใช้รวมถึงวิธีปฏิบัติเพื่อให้ได้รอยต่อแบบโอห์มมิก ดังปรากฏในตารางที่ 3.5

วัสดุที่ใช้	ชนิดของ CuInSe ₂	วิธีการปฏิบัติเพื่อให้ได้รอยต่อแบบโอห์มมิก	ชื่อเอกสารอ้างอิง
Au	p	ระเหย Au ขึ้นไป เคลือบแผ่นผลึกในระบบ สุญญากาศ	29
Au, Cr	p	ระเหย Cr ในระบบสุญญากาศขึ้นไปเคลือบ บนแผ่นผลึกให้ได้ความหนา 70 Å จึงระเหย Au เคลือบทับอีกชั้นด้วยความหนา 50 Å	30
Au	p	สปัตเตอร์ริง (sputtering) Au ลงบน แผ่นผลึก	26
Au	p	กด Au ขึ้นเล็ก ๆ ให้ติดแน่นบนผิวผลึกที่ทำ ความสะอาดแล้ว	22
Au	p	นำแผ่นผลึกที่ขัดด้วยกระดาษทรายแล้วจุ่มลงใน สารละลาย AuCl ₃ ที่มีอุณหภูมิ 50-70 C จนกระทั่ง Au เคลือบบนแผ่นผลึกหนาพอ สมควร	28
Al	p	ขัดแผ่นโลหะด้วยกระดาษทรายแล้วป้ายด้วย กาวนำไฟฟ้า (silver paint) ก่อนที่ จะนำไปเชื่อมกับลวดคอลลูมิเนียม	6, 17
Ni	n, p	กดด้วย Ni ขึ้นเล็ก ๆ ให้ติดแน่น	27
In	n	ให้แผ่นผลึก CuInSe ₂ มีอุณหภูมิ 200 C ภายในระบบสุญญากาศความดันต่ำกว่า 1×10^{-5} torr แล้วระเหย In ขึ้นไป เคลือบหนา 5000 Å ปล่อยให้ละลายไว้นาน 2-3 นาที จึงลดอุณหภูมิลง	20, 30

ตารางที่ 3.5 แสดงวัสดุและวิธีปฏิบัติในการทำรอยต่อแบบโอห์มมิกของ CuInSe₂

วัสดุที่ใช้	ชนิดของ CuInSe_2	วิธีปฏิบัติเพื่อให้ได้รอยต่อแบบโอห์มมิก	ชื่อเอกสารอ้างอิง
In-Sn	n	สัปดาห์เตอริงโลหะผสม In-Sn ลงบน แผ่นผลึก	26
In-Zn	n	ระเหยโลหะผสม In-Zn เคลือบบน แผ่นผลึกในระบบสุญญากาศ	29

ตารางที่ 3.5 แสดงวัสดุและวิธีปฏิบัติในการทำรอยต่อแบบโอห์มมิกของ CuInSe_2 (ต่อ)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย