บทที่ 7

สรุปผลการทดลอง

การวิจัยการปลูกผลึกสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมแกลเลียมไดซีลีไนด์ (CIGS) ในครั้งนี้แบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอน คือ ศึกษาทฤษฎีและวิธีการ เตรียมอุปกรณ์และทำการหลอมสารปลูกผลึก ตรวจสอบส่วนประกอบของผลึกโดยใช้ EDS ตรวจสอบโครงสร้างโดยใช้ X-ray diffraction ตรวจสอบสมบัติการดูดกลืนแสง ตรวจสอบสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธี Van der pauw และสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ สุดท้ายวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

วิธีการปลูกผลึกคอปเปอร์อินเดียมแกลเลียมไดซีลีไนด์ ($CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$) โดยที่ x มีค่าประมาณ 0.1 และ 0.2 นี้ประยุกต์ขึ้นมาจากการปลูกผลึก คอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์ ($CuInSe_2$) ที่ประสบผลสำเร็จมาแล้ว โดยวิธีเตรียมแบบ ไดเรกชัลนัล ฟรีซซิง (directional freezing) โดยเลือกใช้วิธีของบริดจ์แมนแบบแนวนอน (horizontal Bridgman method) ทำการปลูกผลึกขึ้นมาจำนวน 5 หลอด ซึ่งทั้ง 5 หลอดจะต่างกันที่อัตราการเย็นตัวของผลึก โดย CIGS3 ลดอุณหภูมิในอัตรา 35 ^{0}Cต่อวัน จนอุณหภูมิถึง 900 ^{0}C เปลี่ยนเป็นลดในอัตรา 100 ^{0}Cต่อวัน จนถึงอุณหภูมิ 600 ^{0}C แล้วปิดไฟ CIGS10 ลดอุณหภูมิในอัตรา 140 ^{0}Cต่อวัน จนอุณหภูมิถึง 950 ^{0}C เปลี่ยนเป็นลดในอัตรา 58 ^{0}Cต่อวัน จนถึงอุณหภูมิ 600 ^{0}C แล้วปิดไฟ CIGS11 และ CIGS12 ลดเหมือน CIGS10 ส่วน CIGS13 ลดอุณหภูมิในอัตรา 46.7 ^{0}Cต่อวัน จนอุณหภูมิถึง 950 ^{0}C เปลี่ยนเป็นลดในอัตรา 58 ^{0}Cต่อวัน จนถึงอุณหภูมิ 600 ^{0}C แล้วปิดไฟ กรรมวิธีที่ใช้ปลูกทั้ง 5 หลอดผลึกที่ได้ไม่ติดหลอดแก้วควอทซ์ และในหลอด CIGS3 ที่ x มีค่าประมาณ 0.1 ปราศจากรอยร้าว (crack free) ช่องว่าง (void free) และมีสภาพผิวเรียบมันกว่าหลอดอื่น

ผลึกที่ปลูกได้ทั้งหมดเมื่อวิเคราะห์หาปริมาณของสาร ค่าอัตราส่วนของ Cu/(Ga+In) จะมีค่าเพิ่มขึ้นจากส่วนที่เย็นก่อน (first to freeze end) ไปยังส่วนที่เย็นหลัง (last to freeze end) และค่าอัตราส่วนของ Ga/(Ga+In) จะมีค่าลดลงจากจุดที่เย็นก่อนไปยังจุดที่เย็นหลัง โดยผลึก CIGS3 ค่า Cu/(Ga+In) ที่จุดที่เย็นก่อนมีค่าประมาณ 0.92 จุดที่เย็นหลังจะมีค่าประมาณ 1.01 และ ค่า Ga/(Ga+In) ที่จุดที่เย็นก่อนมีค่าประมาณ 0.12 จุดที่เย็นหลังจะมีค่าประมาณ 0.09

ในการคำนวณหาค่า lattice constant (a,c) ค่า a และ c จะมีค่ามากขึ้นจากปลายที่เย็นก่อนไปยังปลายที่เย็นหลังของแท่งผลึกที่ทำการปลูกทั้ง 5 หลอด โดยผลึก

CIGS3 ค่า a ที่จุดที่เย็นก่อนมีค่าประมาณ 5.74 A จุดที่เย็นหลังจะมีค่าประมาณ 5.76 A และค่า c ที่จุดที่เย็นก่อนมีค่าประมาณ 11.48 A ที่เย็นหลังมีค่าประมาณ 11.54 A

ผลการคำนวณช่องว่างแถบพลังงานของ CIGS ที่ทำการปลูกจะมีค่าช่องว่างแถบพลังงานที่ทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำจะมากกว่าที่ทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง แต่ค่าที่วัดได้มีค่าน้อยเกินไป เนื่องจากผลึกที่ทำการวัดหนาเกินไป หนาประมาณ 200 ไมครอน โดยถ้าจะให้ได้ค่าที่ถูกต้องจะต้องใช้ผลึกหนาน้อยกว่า 10 ไมครอน เนื่องจาก αd จะต้องมีค่าอยู่ในระดับประมาณ 1 จึงจะทำให้สมการ $I = I_0 e^{-\alpha d}$ เปลี่ยนแปลงอย่างมาก

ชนิดการนำไฟฟ้าของผลึก CIGS ทั้ง 5 หลอดเป็นชนิดพี (P – Type)ผลการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าวัดที่อุณหภูมิห้องค่อนข้างต่ำ โดยมีค่า 0.29 ถึง 13.1 Ohm–cm สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์มีค่า 6.8 ถึง 51.7 $cm^2/V.s$ จากผลการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ของ CIGS3/10 ทำการวัดที่อุณหภูมิ 100 ^0K ถึง 327 ^0Kที่อุณหภูมิต่ำพบว่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์จะเพิ่มขึ้นตามการลดลงของอุณหภูมิ ส่วนความหนาแน่นของพาหะจะลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิ จากการคำนวณข้อมูลความหนาแน่นของโฮลพบว่าพลังงานผู้รับมีค่าประมาณ 72.3 meV เมื่อทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์พบว่า การเปลี่ยนแปลงเกิดจากกลไกการกระเจิงของพาหะอิสระที่แปรไปตามอุณหภูมิของผลึกซึ่งเป็นผลเนื่องมาจาก piezoelectric potential กลไกการกระเจิงแบบนี้เรียกว่า การกระเจิงโดย acoustic phonon scattering

ปัญหาและข้อเสนอแนะ

การปลูกผลึกสารกึ่งตัวนำ CIGS ครั้งนี้จุดสำคัญที่สุดที่จะทำให้ได้ผลึกที่สมบูรณ์จะขึ้นอยู่กับช่วงการลดอุณหภูมิ และขั้นตอนการดึงเลื่อนหลอดสาร ผลึกสารกึ่งตัวนำที่ได้มีลักษณะแข็งแต่เปราะง่ายมีสีเทาดำ ผิวหน้าที่ไม่สัมผัสกับหลอดแก้วควอทซ์มีลักษณะมันเงาและค่อนข้างเรียบ เมื่อนำมาส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ (microscope) จะพบว่า บริเวณผิวหน้าเปิดนั้นจะเป็นชั้นๆ ที่เกิดจากการซ้อนกันของระนาบเล็กๆนั้นเองและปัญหาที่เกิดมีดังนี้

1. มีรอยแยกขนาดเล็ก (microcracks) และขนาดใหญ่ (bulk cracks) รวมทั้งผลึกแฝด (twins) ซึ่งมักเกิดขึ้นเมื่อลดอุณหภูมิของเตาหลอมลงมาด้วยอัตราเร็วเกินไป

2. ความดันไอ (vapor pressure) ของ Se ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงกว่า 217 ^0C รวมทั้งปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic reaction) ระหว่าง In ที่หลอมเหลวกับ Se ในสภาวะแก๊ส ซึ่งจะทำให้เกิดความดันภายในหลอดแก้วควอทซ์ ที่ใช้ปลูกผลึกเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงอุณหภูมิ 220 ^0C ถึง 320 ^0C เป็นเหตุให้หลอดแก้วควอทซ์ที่ใช้ปลูกผลึกแตก ในกรณีที่หลอมปิดหลอดแก้วควอทซ์ไม่ดีพอ

3. สารประกอบติดข้างหลอดแก้วควอทซ์ที่ใช้บรรจุ ทำให้หลอดแก้วควอทซ์แตกขณะที่ลดอุณหภูมิของเตาหลอมลง

4. ช่องว่าง (voids) มักเกิดขึ้นในเนื้อสารและบริเวณที่สัมผัสกับผิวด้านในของหลอดแก้วควอทซ์

5. สารประกอบที่ได้ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (inhomogeneities)

6. หลอดแก้วควอทซ์เปราะขาวเป็นเนื้อทราย

ข้อเสนอแนะ

1. ในช่วงการลดอุณหภูมิของเตาหลอมลงมาควรลดในอัตราช้าๆ เพื่อป้องกันรอยแยกขนาดเล็ก (microcracks) และขนาดใหญ่ (bulk cracks)

2. การเพิ่มในช่วงอุณหภูมิ 220 ^{0}C ถึง 320 ^{0}C ควรเพิ่มอย่างช้าๆ เพื่อป้องกันหลอดแก้วควอทซ์ที่ใช้ปลูกผลึกแตก เนื่องจากความดันไอ (vapor pressure) ของ Se ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงกว่า 217 ^{0}C รวมทั้งปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic reaction) ระหว่าง In ที่หลอมเหลวกับ Se ในสภาวะแก๊ส

3. ควรทำความสะอาดหลอดแก้วควอทซ์ให้ดี เพื่อป้องกันสารประกอบติดข้างหลอดแก้วควอทซ์ที่ใช้บรรจุ ทำให้หลอดแก้วควอทซ์แตกขณะที่ลดอุณหภูมิของเตาหลอมลง

4. ในการโยกเตาต้องให้เตาเอียงอย่างช้าๆ เพื่อให้สารที่หลอมเหลวผสมกันเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneities)

5. ท่อที่จะนำมาทำเตาจะต้องเป็นท่อชนิด มูนไลท์ (moonlight) เพื่อป้อง หลอดแก้วควอทซ์เปราะขาวเป็นเนื้อทราย เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างท่อของเตา กับ หลอดแก้วควอทซ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย