หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 7

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในการวิจัยครั้งนี้แบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอน คือ การเตรียมผลึกกึ่งตัวนำให้มีชนิดการนำไฟฟ้าตามที่ต้องการด้วยการเติมหรือลดปริมาณสารต่าง ๆ ลงไปในขณะที่เตรียมและได้ผลึกเดี่ยวขนาดใหญ่พอ นำผลึกที่เตรียมได้ไปตรวจสอบระนาบที่พื้นผิวเปิด หลังจากนั้นนำมาตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ขั้นตอนถัดไปคือ นำผลึกกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ไปศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยขบวนการความร้อน ต่อจากนั้นนำมาวัดหาพลังงานไอออไนซของระดับสิ่งเจือปน สำหรับขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการศึกษารอยต่อแบบพี-เอ็น โฮโมจังค์ชันด้วยการแพร่กระจายโลหะอินเดียมเข้าไปในสารประกอบ $CuInSe_2$ ชนิดพีด้วยการแอนนีล

การเตรียมผลึกกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ เราเตรียมผลึกแบบไดเรกชันนัล ฟรีซซิง โดยเลือกใช้วิธีของบริดจ์แมน-สโตคบาร์เกอร์ในแนวนอนด้วยการลดอุณหภูมิเตาโดยใช้วงจรไฟฟ้ากึ่งกลศาสตร์ การเตรียมผลึกจากสัดส่วนสตอยคิโอเมตริ พบว่าสารตัวอย่างที่เตรียมได้อาจเป็นชนิดพี หรือ ชนิดเอ็น โดยไม่ขึ้นกับวิธีการเตรียม [2.] ดังนั้นเมื่อเราต้องการได้ผลึกสารกึ่งตัวนำให้มีชนิดการนำไฟฟ้าตามที่ต้องการเราจึงเตรียมผลึกสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ โดยการโด๊ปด้วยสารต่าง ๆ คือ เติม Cu , In , Se , Ge , GaAs กับการลด Cu , In และ Se ในปริมาณ 0.3 at.% ของ $CuInSe_2$

ผลึกสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ที่เตรียมโดยวิธีของบริดจ์แมน-สโตคบาร์เกอร์ในแนวนอนนี้พบว่าสามารถลดรอยแยกในเนื้อสารได้มากจนเกือบไม่มี และผลึกเดี่ยวที่ได้มีขนาด $10 \times 8 \times 5$ mm^3

จากการศึกษาการสะท้อนกลับของรังสีเอ็กซ์ โดยวิธี back reflection Laue photograph พบว่าระนาบที่ซ้อนกันบนผิวหน้าของผลึกสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ที่เตรียมได้เป็นระนาบ (112) ซึ่งสอดคล้องกับที่มีผู้รายงานไว้ [12,45]

จากการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าโดยวิธีชั้วความร้อนพบว่าตลอดทั้งแท่งสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ที่เตรียมได้นั้น ถ้าเตรียมตามสัดส่วนสโตอยคิโอเมตริสารตัวอย่างที่เตรียมได้มีทั้งชนิดเอ็น หรือ ชนิดพี อย่างใดอย่างหนึ่งโดยไม่ขึ้นกับวิธีการเตรียม ส่วนที่เตรียมจากการเติม In , Ge กับการลด Se จะได้ผลึกของสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดเอ็น และที่เตรียมจากการเติม Cu , Se , GaAs กับการลด Cu , In จะได้ผลึกสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดพี ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานของการเกิดอินเตอร์สทิเทียล วาแคนซีของ Cu , Se ,In กับการแทนที่ของ Ge ใน In และ As ใน Se ยกเว้นการเติม Cu ซึ่งควรจะได้ผลึกสารเป็นชนิดเอ็นแต่กลับได้เป็นชนิดพี. อาจเนื่องมาจากพลังงานที่ใช้ในการเกิดอินเตอร์สทิเชียลมากกว่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดความไม่เป็นระเบียบของแคดไอออนซับแลททิสของ In ใน Cu ดังตารางที่ 3.2 สภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้โดยใช้วิธีแวนเดอเพาว์ พบว่าสารที่เตรียมได้มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าค่อนข้างต่ำคือ อยู่ในช่วง 0.01-15 Ω-cm ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของผู้อื่น [12]

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยขบวนการความร้อน โดยแอนนีลชิ้นสารที่อุณหภูมิระหว่าง 150 °- 700 °C ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าสารที่ได้จากการเตรียมตามสัดส่วนสโตอยคิโอเมตริและจากการเติมธาตุที่เป็นส่วนประกอบสำหรับสารชนิดพีที่อุณหภูมิแอนนีลต่ำกว่า 300 °C สภาพต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 400 °C สภาพต้านทานจะลดลงไปประมาณ 10-100 เท่า และเปลี่ยนชนิดการนำไฟฟ้าจากชนิดพีไปเป็นชนิดเอ็น ส่วนสารที่เป็นชนิดเอ็นในช่วงอุณหภูมิแอนนีลต่ำกว่า 500 °C สภาพต้านทานไฟฟ้าเกือบไม่เปลี่ยนแปลงเลย แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 °C สภาพต้านทานไฟฟ้าจะลดลงไปประมาณ 10 เท่า และยังคงเป็นชนิดเอ็นเหมือนเดิม สารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ที่เตรียมด้วยการโด๊ปธาตุ Ge เมื่อแอนนีลที่อุณหภูมิตั้งแต่ 150 °- 700 °C พบว่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะลดลงไปเรื่อย ๆ เมื่อถึงอุณหภูมิแอนนีล 600 °C สภาพต้านทานไฟฟ้าจะลดลงไปประมาณ 10 เท่า แต่สารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ที่เตรียมด้วยการโด๊ป GaAs เมื่อแอนนีลที่อุณหภูมิต่าง ๆ แล้ว สภาพต้านทานไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลงให้เห็นได้ชัดเจนและชนิดการนำไฟฟ้ายังคงเป็นชนิดพีอยู่

การศึกษาพลังงานไอออไนซ์ของสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ที่เตรียมได้และจากที่แอนนีลที่อุณหภูมิ 700 °C โดยการวัดค่าส่วนกลับของความต้านทาน(1/R)ของสารที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตั้งแต่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลวจนถึงอุณหภูมิห้อง ทำให้เราทราบว่า $CuInSe_2$ มีระดับพลังงานสิ่งเจือปนที่เกิดขึ้นเนื่องจากข้อบกพร่องของผลึกมีทั้งระดับพลังงานผู้ให้ (E_d) และผู้รับ (E_a) พลังงานไอออไนซ์ดังกล่าวของสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ตามรายละเอียดในตาราง ที่ 6.5 ระดับพลังงานที่คำนวณได้เหล่านี้สอดคล้องกับผลการทดลองตามที่มีผู้รายงานไว้ [44]

ชนิดของ $CuInSe_2$	พลังงานไอออไนซ์ของระดับสิ่งเจือปน					
	ชนิดผู้รับ (E_a)			ชนิดผู้ให้ (E_d)		
	E_{a1}	E_{a2}	E_{a3}	E_{d1}	E_{d2}	E_{d3}
A1	63	54	14			
A1*				68	54	3
A3				159	20	–
B6	84	39	–			
B6*				41	10	–
B5				43	17	–
B5*				11	–	–
B3	208	130	39			

การทำรอยต่อแบบพี-เอ็นโฮโมจังค์ชันของผลึกกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ สามารถทำได้หลายวิธีซึ่งเราเลือกใช้วิธีการแพร่โลหะอินเดียมเข้าไปในสารประกอบ p-$CuInSe_2$ ด้วยการแอนนีลที่อุณหภูมิ 300 °C ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจนเป็นเวลานาน 10 นาที และ 15 นาที จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็นโฮโมจังค์ชันด้วยลักษณะสอกระแส-ศักย์ไฟฟ้า พบว่า ค่าแฟคเตอร์อุดมคติ (n) มีค่าอยู่ระหว่าง 2.00-3.30 แสดงว่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดบริเวณรอยต่อพี-เอ็น เมื่อ n=2 เป็นกระแสเกิดและรวมตัวเป็น

ส่วนใหญ่ ส่วนที่ค่า $2<n<3$ สอดคล้องกับกรณีที่มีกระแสฉีดสูง [30] และที่ค่า $n>3$ อาจเป็นผลของความต้านทานของแผ่นรองรับที่ต่ออนุกรม และการขัดขวางการไหลของกระแสของกาวซิลเวอร์ที่ใช้ทำรอยต่อโอห์มมิก

จากการวัดลักษณะสอความจุ-ศักย์ไฟฟ้า จะได้ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ (impurity concentration) บนด้านที่มีค่าอยู่ระหว่าง $10^{14} - 10^{16}$ cm^{-3} และความลึกของรอยต่อมีค่า 1 - 5 μm เมื่อเขียนกราฟระหว่างความเข้มข้นของสารเจือกับระยะห่างจากรอยต่อ (doping profile) จะได้ดังกราฟในรูปที่ 6.25 และ 6.26

ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

การเตรียมสารเป็นขั้นตอนพื้นฐานที่สำคัญในการวิจัยทางด้านฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ นอกจากนี้แล้วการเตรียมสารให้ได้ชนิดของการนำไฟฟ้าตามต้องการเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อจะได้ควบคุมสมบัติทางไฟฟ้าของสารได้วิธีหนึ่ง จากการศึกษาการเตรียมผลึกกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ด้วยการโด๊ปวิธีต่างๆ ทำให้ทราบถึงแนวทางในการเตรียมเพื่อให้ได้ชนิดของสารกึ่งตัวนำตามที่ต้องการได้ ตลอดจนถึงทราบแนวทางในการหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ชนิดของสารกึ่งตัวนำ ค่าพลังงานไอออไนซ์ของระดับสิ่งเจือปน การเปลี่ยนแปลงของสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยขบวนการความร้อนของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ การเตรียมรอยต่อพี-เอ็นโฮโมจังชันของสารกึ่งตัวนำชนิดพีทำให้ทราบถึงเทคนิคในการเตรียมเพื่อให้ได้รอยต่อที่มีค่าแฟคเตอร์อุดมคติใกล้เคียงกับไดโอดที่ใช้งานอยู่และมีค่าศักย์ไฟฟ้าพังทลายสูง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการเตรียมรอยต่อพี-เอ็นโฮโมจังชันในขั้นต่อไป ในแง่ของการประยุกต์นั้นเป็นไปได้ที่จะนำรอยต่อนี้ไปศึกษาการตอบสนองต่อแสงโดยการวัดสภาพนำไฟฟ้าที่ขึ้นกับแสง (Photoconductivity ซึ่งเป็นการศึกษาโครงสร้างแถบพลังงานอีกวิธีหนึ่ง ตลอดจนสามารถนำไปพัฒนาสร้างเป็นอุปกรณ์บันทึกแสง (Photodetector) หรือเซลล์แสงอาทิตย์ในโอกาสต่อไป การวิจัยนี้จึงเป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนาสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ทั้งทางวิชาการและการประยุกต์ต่อไปในอนาคต

ข้อเสนอแนะ

สารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ที่เตรียมได้จากสภาวะหลอมเหลวโดยวิธีไดเรกชันนัลฟรีซซิงจากสัดส่วนสตอยคิโอเมตริกับเตรียมจากการลดและเพิ่มธาตุที่เป็นส่วนประกอบ คือ Cu, In และ Se พร้อมทั้งเตรียมด้วยการโด๊ปธาตุ Ge กับสารประกอบ GaAs เท่าที่ผ่านมายังได้รับการศึกษาสมบัติของผลึกกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ไม่มากนักโดยเฉพาะที่เตรียมจากการโด๊ป จากการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารที่เตรียมได้ พบว่าสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ที่เตรียมจากการโด๊ปด้วย GaAs มีสภาพต้านทานไฟฟ้าเกือบไม่เปลี่ยนแปลงกับการแอนนีลที่อุณหภูมิสูง และไม่เปลี่ยนชนิดการนำไฟฟ้า ดังนั้นจึงควรได้มีการศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำนี้ให้มากขึ้น เนื่องจากมีแนวโน้มที่จะนำมาใช้เป็นแผ่นรองรับเพื่อระเหย CdS เข้ามาเคลือบกลายเป็นสิ่งประดิษฐ์แบบเฮทเทอร์โรจังค์ชัน เพื่อใช้เป็นตัวบันทึกแสง หรือเซลล์แสงอาทิตย์ในโอกาสต่อไป

นอกจากนี้ควรมีการวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall effect) เพื่อหาความหนาแน่นของพาหะอิสระ สภาพเคลื่อนที่ได้ พร้อมทั้งการวัดโฟโตลูมิเนสเซนต์เพื่อหาระดับพลังงานของสิ่งเจือปนที่เกิดขึ้น และการวัดลักษณะสอกระแส-ศักย์ไฟฟ้า ของรอยต่อพี-เอ็นโฮโมจังค์ชันที่อุณหภูมิต่าง ๆ เพื่อจะได้ทราบกระแสบริเวณรอยต่อนั้นเกิดจากขบวนการใด เพื่อจะได้ปรับปรุงการเตรียมรอยต่อให้ดียิ่งขึ้นต่อไป