บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้แบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนคือ การปลูกผลึกกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ให้มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดพีด้วยการเติมธาตุ Se และโดปสารประกอบ GaAs ลงไปในสารตั้งต้นและได้ผลึกเดี่ยวขนาดพอเหมาะแก่การวิจัย นำผลึกที่ปลูกได้ไปตรวจสอบระนาบที่พื้นผิวหน้าเปิดและคำนวณโครงสร้างผลึก ตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้า วัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นและสภาพเคลื่อนที่ได้ของพาหะ ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์ของผลึกกึ่งตัวนำที่ปลูกได้เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างของช่องว่างแถบพลังงานของผลึกดังกล่าว

การปลูกผลึกกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ครั้งนี้ปฏิบัติตามแบบไดเรกชันนัลฟรีซซิงโดยเลือกใช้วิธีของบริดจ์แมน-สโตคบาร์เกอร์ ในแนวนอน ได้นำใช้วงจรไฟฟ้าเชิงตัวเลขและคอมพิวเตอร์เข้าช่วยควบคุมการเพิ่มและลดอุณหภูมิของเตา ได้ปรับเตาหลอมให้เอียงตัวขึ้นลงได้เพื่อช่วยให้สารได้ผสมเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น การปลูกผลึกกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ โดยการเติม Se และโดปด้วย GaAs ในปริมาณ 0.3 at.% ของ $CuInSe_2$ ได้ผลึกเดี่ยวที่มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดพีจริง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของกัลยาที่ได้รายงานไว้ [10] จากแท่งผลึกที่ได้พบว่าเนื้อผลึกที่เป็นผลึกเดี่ยวจะไม่มีรอยแยกและมีขนาด $22 \times 9 \times 5\ mm^3$ สามารถนำเอาไปตัดให้เป็นชิ้นบางที่มีความหนา 1 mm และเนื้อที่ประมาณ $1\ cm^2$

จากการทำการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เนื่องจากผิวหน้าของผลึกกึ่งตัวนำที่ได้สามารถคำนวณหาโครงผลึก c/a มีค่าใกล้เคียงกับ 2 และทราบได้ว่าระนาบที่ซ้อนกันบนผิวหน้าของผลึกเป็นระนาบ (112) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกของ $CuInSe_2$ เป็นแบบชาลโคไพไรท์ จากการทำ EDXS พบว่า ผลึกที่ปลูกได้บริสุทธิ์มากและปราศจากการเจือปนของธาตุอื่น

จากการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของผลึกโดยวิธีขั้วความร้อนพบว่าผลึกกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ที่ปลูกได้มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดพี สอดคล้องกับทฤษฎีที่กล่าวไว้ว่าการปลูกผลึกกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ด้วยการเติม Se เข้าไปในสารตั้งต้นในปริมาณที่พอเหมาะจะได้ผลึกที่มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นพี [10] ผลึก $CuInSe_2$ ที่ปลูกได้จากการเติม Se ลงไปมีชนิดการนำไฟฟ้าที่ชัดเจนกว่าผลึกที่ได้จากการโดปด้วย GaAs ซึ่งได้ชนิดการนำไฟฟ้าที่มีแนวโน้มเป็นพี และมีบางส่วน

เป็นชนิดเอ็น อันเนื่องมาจากการหลอมเหลวเข้ากันของสารไม่ดีพอจึงทำให้อะตอมของ Ga ซึ่งทำหน้าที่คล้ายกับ In จับกับอะตอมใกล้เคียงและรวมกันอยู่บริเวณแคบ ทำให้ปริมาณของ In มีมากเกินไป ผลึกในบริเวณนั้นจึงมีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นเอ็นได้

จากผลการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของผลึกกึ่งตัวนำที่ปลูกได้ด้วยวิธีการวัดของแวนเดอเพาว์และด้วยระบบวัดฮอลล์ที่อุณหภูมิห้องพบว่าผลึกกึ่งตัวนำ CISA3 มีสภาพต้านทานไฟฟ้าค่อนข้างต่ำมาก (4.7 Ω.cm) ดังตารางที่ 3.4 จากการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ของผลึกตัวอย่าง CISA3 ที่อุณหภูมิต่ำ พบว่า สมบัติทางไฟฟ้าของผลึกมีการเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ โดยที่สภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์จะเพิ่มขึ้นตามการลดลงของอุณหภูมิ ส่วนความหนาแน่นพาหะจะลดค่าลงตามการลดลงของอุณหภูมิ โดยเฉพาะในช่วงอุณหภูมิต่ำจะทำให้ความหนาแน่นของโฮลในแถบเวเลนซ์น้อยกว่าความหนาแน่นของสิ่งเจือปนชนิดผู้รับ เนื่องจากโอกาสที่โฮลจะถูกไอออไนซ์ด้วยพลังงานความร้อนมีค่าน้อยมาก และความหนาแน่นของโฮลในแถบเวเลนซ์จะมากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ จากการคำนวณข้อมูลความหนาแน่นของโฮลในช่วงนี้พบว่าพลังงานผู้รับมีค่าประมาณ 59 meV เมื่อทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์พบว่า การเปลี่ยนแปลงเกิดจากกลไกการกระเจิงของพาหะอิสระที่แปรไปตามอุณหภูมิของผลึกซึ่งเป็นผลเนื่องมาจาก deformation potential กลไกการกระเจิงแบบนี้เรียกว่า การกระเจิงโดยแอคูสติกโฟนอน (acoustic phonon scattering)

จากการวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์ของผลึกกึ่งตัวนำ CISA3 พบว่า มี PR - สเปกตรัม (ยอดแหลม) ซึ่งแสดงว่า มีการย้ายสถานะพลังงานของพาหะเกิดขึ้นเมื่อมีแสงตกกระทบชิ้นผลึกกึ่งตัวนำ สเปกตรัมดังกล่าวจะเปลี่ยนแปลงความสูงและตำแหน่งไปกับอุณหภูมิของผลึก โดยจะสูงขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 12 ถึง 160 K หลังจากนั้นจะค่อยๆลดลงในช่วงอุณหภูมิ 160 ถึง 300 K จากการวิเคราะห์ด้วยการคำนวณข้อมูลที่วัดได้พบว่ามี PR - สเปกตรัมเกิดขึ้นอยู่สองที่ของระดับพลังงานโฟตอน คือ ที่ช่วง 1.015 ถึง 1.075 eV และที่ 1.27 eV โดยเฉพาะ สเปกตรัมแรกเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสถานะของพาหะด้วยสองระดับพลังงานที่มีค่าใกล้เคียงกัน เป็นผลมาจากการแยกของแถบเวเลนซ์ที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิซึ่งมีผลมาจากการบิดเบี้ยวของผลึกเนื่องจากการอัดตัวของโครงผลึกตามแกน z ของสารซาลโคไพไรท์ ส่วนสเปกตรัมที่พบ ณ ที่ระดับพลังงาน 1.27 eV มีขนาดเล็กมาก ไม่สามารถที่จะวิเคราะห์ให้ชัดเจนได้ อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงความสูงและตำแหน่งของสเปกตรัมที่ช่วง 1.015 ถึง 1.075 eV แสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแถบพลังงานของผลึกตัวอย่างเกิดขึ้นแน่นอน

ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

การปลูกผลึกเป็นขั้นตอนพื้นฐานที่สำคัญในการวิจัยทางด้านฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำและเป็นสิ่งที่จำเป็นเพื่อควบคุมสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำซึ่งมีผลโดยตรงต่อการวิจัยอุปกรณ์กึ่งตัวนำ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์เป็นต้น

จากการศึกษาการปลูกผลึกครั้งนี้ทำให้ทราบถึงแนวทางและเทคนิคในการปลูกเพื่อให้ได้ผลึกที่มีชนิดการนำไฟฟ้าตามต้องการ พร้อมทั้งแนวทางปรับปรุงเพื่อให้ได้ผลึกที่มีสมบัติของความเป็นผลึกมากขึ้น

จากการวัดสมบัติการนำไฟฟ้าของผลึกด้วยวิธีแวนเดอเพาว์และด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ทำให้เราสามารถศึกษาและวิเคราะห์การนำไฟฟ้าของผลึกได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจะรู้ได้จากสภาพต้านทานไฟฟ้า สภาพเคลื่อนที่ได้ ความหนาแน่นของพาหะ และ การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานต่างๆในผลึก ซึ่งเป็นสิ่งที่บ่งบอกว่าผลึกตัวอย่างนี้มีสมบัติการนำไฟฟ้าดีหรือไม่

การศึกษาโฟโตรีเฟลกแทนซ์ของผลึกกึ่งตัวนำเป็นวิธีการเพื่อศึกษาโครงสร้าง แถบพลังงานของผลึกทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของพาหะ และเป็นครั้งแรกที่สามารถวัดสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ของผลึก $CuInSe_2$ ที่เปลี่ยนแปลงรูปร่างของเปกตรัมไปตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ซึ่งจะเป็นแนวทางให้แก่การวิจัยของ SPRL ต่อไป

ข้อเสนอแนะ

การปลูกผลึกโดยที่ทำให้เตาหลอมสามารถเอียงตัวขึ้นลงได้ในขณะที่สารกำลังหลอมเหลวอยู่นั้น เชื่อว่าน่าจะได้ผลึกที่เป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น จากผลรับในการวิจัยครั้งนี้ยังไม่ได้รับผลเท่าที่ควร ดังนั้นผู้เขียนจึงคิดว่าหน้าจะทดลองปฏิบัติต่อไป

สำหรับผลการวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์ที่ได้ในขั้นนี้ยังไม่สมบูรณ์ เนื่องจากเป็นการพบยอดแหลมเป็นครั้งแรกที่วัดได้สัญญาณอย่างชัดเจน เพื่อให้ละเอียดควรจะวัดในช่วงอุณหภูมิต่ำแล้วค่อยเปลี่ยนอุณหภูมิให้สูงขึ้น อาจเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิครั้งละ 5 องศา คิดว่าน่าจะได้ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของยอดแหลมที่ละเอียดขึ้น ส่วนยอดแหลมที่ตำแหน่งพลังงาน 1.27 eV นั้นน่าจะมีการวิเคราะห์และศึกษาต่อไปโดยการใช้หัววัดแสงที่เหมาะกับย่านพลังงานนั้น จึงเสนอไว้เป็นแนวทางสำหรับการวิจัยต่อไป