หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 8

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ การเตรียมผลึกกึ่งตัวนำให้มีขนาดใหญ่พอที่จะนำไปศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของสารกึ่งตัวนำ ขั้นตอนต่อไปคือนำผลึกกึ่งตัวนำที่เตรียมได้นี้มาตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า แล้วนำผลที่ได้คำนวณหาค่าสภาพนำไฟฟ้าและสภาพเคลื่อนได้ของอิเล็กตรอนและ/หรือโฮล สำหรับขั้นตอนสุดท้ายนั้นจะเป็นการศึกษาสมบัติอื่น ๆ ของสารกึ่งตัวนำเช่น ชนิดของพาหะข้างมากของสารกึ่งตัวนำ ค่าความหนาแน่นของพาหะสุทธิของสารกึ่งตัวนำที่บริเวณใกล้ๆ ผิวรอยต่อ ขนาดของช่วงดีพลีชันมากที่สุด ค่าความจุของรอยต่อแบบฉับพลัน ค่าความจุของฉนวน ค่าความจุของชั้นกลับกลาย ค่าความจุขณะที่ไม่มีการไบอัสแก่รอยต่อ ค่าความต่างศักย์ที่ไม่ทำให้แถบพลังงานโค้ง เป็นต้น โดยการทำรอยต่อแบบ MIS ของสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ และ GaAs เมื่อใช้โลหะเหลว In-Ga หรือIn-Hg หรือ Ga เป็นชั้นโลหะ ใช้น้ำยาไวแสงชนิดลบของบริษัทโกดักผสมกับทินเนอร์ ในอัตราส่วนผสม 1:20 เคลือบเป็นฉนวนชั้นบาง ๆ บนผิวหน้าด้านขัดมันของสารกึ่งตัวนำ แล้วนำมาวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ที่อุณหภูมิห้องที่ค่าความถี่สูงคงที่เท่ากับ 1 MHz เนื่องจากพบว่าวิธีนี้ เป็นวิธีที่สะดวกรวดเร็ว ให้ผลถูกต้องแม่นยำ ไม่ทำให้ชิ้นสารเกิดความเสียหาย และลักษณะรอยต่อแบบนี้ เป็นลักษณะโครงสร้างแบบง่าย ๆ ซึ่งจากการทดลอง เราพบว่าไม่ว่าจะใช้โลหะชนิดใดก็ตาม ค่าสมบัติต่าง ๆ ทางไฟฟ้าของชิ้นสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ และ GaAs เกือบมีค่าไม่แตกต่างกันเลย ทั้งนี้เนื่องจากค่าความสูงของกำแพงศักย์ของโลหะเหล่านี้ มีค่าใกล้เคียงกันนั่นเอง จึงทำให้เราไม่สามารถพบความแตกต่างอย่างชัดเจน

การเตรียมผลึกกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ จากสภาวะ หลอมเหลว มักจะมีหลอดแตกและรอยแยกเกิดขึ้นเสมอ เนื่องจาก สัมประสิทธิ์การขยายตัวของสารขณะเริ่มเกิดเป็นผลึกกับสัมประสิทธิ์การขยายตัวของเนื้อแก้วควอทซ์ มีค่าไม่สอดคล้องกันในช่วงการลดอุณหภูมิเตาลง แต่อย่างไรก็ตามปัญหานี้ส่วนใหญ่ไม่เป็นอุปสรรคต่อการเตรียมสารเท่าไรนัก เพราะแม้หลอดแก้วควอทซ์จะแตกก็ตาม ถ้าผิวของสารประกอบมีลักษณะไม่เป็นสีน้ำตาลคล้ำ ก็แสดงว่าสารนั้นยังใช้ได้ และเราสามารถป้องกันเหตุการณ์เช่นนี้ได้ด้วยการใส่หลอดสารนั้นลงในหลอดที่ใหญ่กว่า เป็นหลอดแก้วใส่สาร 2 ชั้น ดังที่เราใช้สำหรับการเตรียมสารในงานวิจัยนี้ เราเลือกเตรียมสารโดยตั้งให้หลอดเอียง 5 องศากับแนวราบไปตามแนวเฉียงของเตา จึงเป็นการเพิ่มพื้นที่ของผิวหน้าเปิด (free surface) ให้มากขึ้นเพื่อลดปัญหา เรื่องรอยแยกที่เกิดขึ้น เนื่องจากเนื้อสารสามารถขยายตัวได้มากขึ้นโดยไม่ถูกผนังหลอดแก้วควอทซ์ขัดขวาง ซึ่งในความเป็นจริง การเตรียมผลึกในแนวนอนน่าจะเป็น

วิธีที่ดีที่สุด แต่ข้อเสียก็คือจะทำให้เราได้ขนาดของชิ้นสารที่ตัดตามขวางไม่ใหญ่นัก เพราะแท่งสารที่เตรียมได้มีขนาดค่อนข้างบาง ซึ่งการตั้งให้หลอดเอียง 5 องศา กับแนวราบ เราสามารถที่จะเลือกตัดเพื่อให้ได้ชิ้นใหญ่ (โดยตัดขนานกับผิวหน้าเปิด) และพบว่าสารที่ได้มีรอยแยกทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็ก ที่เกิดขึ้นในเนื้อผลึกน้อยกว่ากรณีเตรียมสารในแนวตั้ง ดังมีรายงานกล่าวไว้มากมาย [11,16,17] และขนาดของเกรนผลึกเดี่ยว (single grain) จะโตกว่า ซึ่งสามารถตัดมาใช้งานได้ในระดับขนาด 5x8x1 mm^3. ดังนั้นการเตรียมสารในแนวเฉียง 5 องศากับแนวราบจึงได้สารคุณภาพดีกว่าในแนวนอนและแนวตั้ง โดยเฉพาะการใช้วงจรไฟฟ้ากึ่งกลศาสตร์ควบคุมอัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิเตาโดยอัตโนมัติ จะช่วยให้อัตราเพิ่มและการลดอุณหภูมิเตาเป็นไปอย่างคงที่สม่ำเสมอและทำให้การเตรียมสารมีความสะดวกมากขึ้น

จากการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าโดยวิธีชั้วความร้อนพบว่าตลอดทั้งแท่งสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ส่วนมากที่เตรียมได้จะเป็นชนิดพีหรือชนิดเอ็นอย่างใดอย่างหนึ่ง สารประกอบส่วนใหญ่เป็นเนื้อเดียวกันทั้งด้านองค์ประกอบและชนิดการนำไฟฟ้า แต่มีน้อยมากที่พบว่าสารตัวอย่างบางชุดไม่เป็นเนื้อเดียวกันทั้งด้านองค์ประกอบ และการนำไฟฟ้ากล่าวคือ แท่งผลึกที่เตรียมได้บางส่วนเป็นชนิดพีและบางส่วนเป็นชนิดเอ็น นอกจากนี้ยังพบทวิน รอยแยกทั้งขนาดใหญ่และเล็กในสารตัวอย่างชุดดังกล่าวนี้ด้วย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสมบัติผิว รูปทรงเรขาคณิตของหลอดแก้วควอทซ์ที่ใช้บรรจุสารและผลกระทบจากภายนอกที่มีต่อขั้นตอนการเตรียมผลึกแต่ละชุดแตกต่างกันไป ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้โดยใช้วิธีแวนเดอเพาว์ของสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ และ GaAs มีค่าอยู่ในช่วง 2.0-6.0 Ω-cm. และ 0.0019-0.0010 Ω-cm. ตามลำดับที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของผู้อื่น [22,27,30,36,51]

จากการคำนวณค่าสภาพเคลื่อนได้ และสภาพนำไฟฟ้าจากค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้โดยวิธีแวนเดอร์เพาว์โดยใช้สมการ

$$\sigma = ne\mu$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

ทำให้มีโอกาสเกิดค่าผิดพลาด (error) ได้อย่างมาก เนื่องจากในความเป็นจริงแล้วค่าสภาพเคลื่อนได้ของพาหะทั้งหมด ยังขึ้นกับอุณหภูมิและการกระเจิงของพาหะอีกด้วย [22,35] แต่เราจะไม่กล่าวถึงรายละเอียดในที่นี้

โดยทั่วไป ปัญหารอยต่อแบบโอห์มมิกของสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ และ GaAs ยังให้ความสำคัญกันน้อย มักจะมีการทำรอยต่อแบบโอห์มมิกกันอย่างง่าย ๆ ไม่ซับซ้อนและไม่เน้นที่จะศึกษา

ถึงรายละเอียดมากนัก ทั้ง ๆ ที่รอยต่อแบบโอห์มมิก เป็นปัจจัยจัยสำคัญที่จะทำให้ผลการทดลองเชิงไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าถูกต้องมากน้อยแค่ไหน จากการศึกษารอยต่อแบบโอห์มมิกระหว่าง $CuInSe_2$ และ GaAs กับโลหะอินเดียม หรือกาวนำไฟฟ้า ช่วงของความหนาแน่นของกระแสที่ใช้ได้โดยที่รอยต่อนี้ยังเป็นแบบโอห์มมิก สำหรับรอยต่อระหว่างโลหะอินเดียมกับสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ชนิดพีและชนิดเอ็นที่อุณหภูมิห้อง จะใช้ได้กับค่าความหนาแน่นของกระแสไม่เกิน 0.2 A/cm^2. สำหรับรอยต่อระหว่างกาวนำไฟฟ้ากับสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ชนิดพีและชนิดเอ็นที่อุณหภูมิห้องจะใช้ได้กับค่าความหนาแน่นของกระแสไม่เกิน 0.2 A/cm^2., 0.04 A/cm^2. ตามลำดับ ไม่ว่าสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ จะถูกเตรียมจากเงื่อนไขสัดส่วนธาตุต่าง ๆ อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ พบว่าค่าความหนาแน่นของกระแสที่ใช้ได้ เพื่อที่ว่ารอยต่อนี้ยังเป็นแบบโอห์มมิกจะมีค่าไม่ต่างกันนัก ส่วนรอยต่อระหว่างโลหะอินเดียมกับสารกึ่งตัวนำ GaAs ชนิดเอ็นที่อุณหภูมิห้องจะใช้ได้กับค่าความหนาแน่นของกระแสไม่เกิน 800 A/cm^2. และรอยต่อระหว่างกาวนำไฟฟ้ากับสารกึ่งตัวนำ GaAs ชนิดเอ็นที่อุณหภูมิห้องจะใช้ ได้กับค่าความหนาแน่นของกระแสไม่เกิน 60 A/cm^2. รอยต่อระหว่างโลหะอินเดียมกับสารกึ่งตัวนำทั้งสองอย่างเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิกที่นำมาใช้งานได้ดีกว่ารอยต่อระหว่างกาวนำไฟฟ้ากับสารกึ่งตัวนำทั้งสองอย่าง เนื่องจากสามารถใช้ได้กับค่ากระแสสูงกว่า แต่ในการทดลองของเราจะเลือกใช้กาวนำไฟฟ้าในการทำรอยต่อแบบโอห์มมิก โดยป้ายกาวนำไฟฟ้าเป็นพื้นที่ขนาดใหญ่คลอดบริเวณผิวหน้าชิ้นสารกึ่งตัวนำ เพื่อเป็นการขจัดปัญหาเรื่อง การมีพื้นที่เล็กขัดขวางการไหลของกระแสและการแอนนีลที่อุณหภูมิสูงอันจะเป็นต้นเหตุในการทำลายผิวหน้าสารกึ่งตัวนำและชั้นฉนวน ที่ทำด้วยน้ำยาไวแสงชนิดลบผสมกับทินเนอร์

นอกจากนี้ จากผลการทดลองเราพบว่า สามารถควบคุมชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ที่เตรียมขึ้นเองได้โดยการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของธาตุ Cu, In และ Se ให้แตกต่างไปจากค่าสตอยคิโอเมตตริเล็กน้อย เช่น เมื่อเพิ่มธาตุ Cu ให้มากกว่าสัดส่วนตามสตอยคิโอเมตตริ เท่ากับ 0.3 % จะทำให้ได้สารประกอบกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ที่มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดพี และเมื่อเพิ่มธาตุ In, Se ให้มากกว่าสัดส่วนตามสตอยคิโอเมตตริเท่ากับ 0.3 % จะได้สารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดเอ็นและชนิดพี ตามลำดับเป็นต้น แต่เราไม่ทราบแน่ชัดว่าธาตุ Cu, In และ Se ที่เติมเข้าไปจะเข้าไปแทรกอยู่ในโครงสร้างผลึกแบบใด จึงนับว่าเป็นข้อบกพร่องอย่างหนึ่ง ที่ทำให้เราไม่สามารถนำคำอธิบายนี้มาเป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ผลการทดลองให้ถูกต้องมากขึ้น

ในการใช้สารกึ่งตัวนำ GaAs ที่ทราบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แล้วเป็นตัวมาตรฐานในการสอบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องมือที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ที่อุณหภูมิห้องนั้น ทำให้เราสามารถแน่ใจได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ต่างๆทุกตัวของสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ คือ

1. ค่าความหนาแน่นของพาหะสุทธิของสารกึ่งตัวนำที่บริเวณใกล้ ๆ ผิวรอยต่อ
สำหรับสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ พบว่าเป็นทั้งชนิดพีและเอ็นมีค่าอยู่ในช่วง
$1.1x10^{16}$-$2.2x10^{16}$ $cm.^{-3}$
สำหรับสารกึ่งตัวนำ GaAs เป็นชนิดเอ็นมีค่าอยู่ในช่วง
$3.5x10^{18}$-$3.8x10^{18}$ $cm.^{-3}$
2. ขนาดของช่วงดีพลีชันมากที่สุด มีค่าขึ้นกับความหนาแน่นของพาหะสุทธิในข้อที่ 1 กล่าวคือสำหรับ
สารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ มีค่าอยู่ในช่วง 0.248-0.678 $\mu m.$
สำหรับสารกึ่งตัวนำ GaAs มีค่าอยู่ในช่วง 0.023-0.024 $\mu m.$
3. ค่าความจุของรอยต่อแบบฉับพลัน
สำหรับสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ จะมีค่าอยู่ในช่วง 20-70 pF
สำหรับสารกึ่งตัวนำ GaAs จะมีค่าอยู่ในช่วง 145-235 pF
4. ค่าความจุของฉนวน
สำหรับสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ มีค่าประมาณ 390 pF
สำหรับสารกึ่งตัวนำ GaAs มีค่าในช่วง 750-780 pF
5. ค่าความจุของชั้นกลับกลายหรือค่าความจุของช่วงดีพลีชันเมื่อขนาดช่วงดีพลีชันกว้างมากที่สุด
สำหรับสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ มีค่าอยู่ในช่วง 20-60 pF
สำหรับสารกึ่งตัวนำ GaAs จะมีค่าอยู่ในช่วง 120-170 pF
6. ค่าความจุขณะที่ไม่มีการไบอัสแก่รอยต่อ
สำหรับสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ จะมีค่าอยู่ในช่วง 140-300 pF
สำหรับสารกึ่งตัวนำ GaAs จะมีค่าอยู่ในช่วง 500-570 pF
7. ค่าความต่างศักย์ที่ไม่ทำให้แถบพลังงานโค้งที่เลื่อนไปจากกรณีอุดมคติ
สำหรับสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ จะมีค่าอยู่ในช่วง -5.0 ถึง +6.0 V
สำหรับสารกึ่งตัวนำ GaAs จะมีค่าอยู่ในช่วง +6.0 ถึง +7.0 V
8. ความหนาแน่นพาหะสุทธิชนิดอินทรินสิกของสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$
มีค่าอยู่ในช่วง $1.1x10^{7}$-$8.2x10^{7}$ $cm.^{-3}$
ความหนาแน่นพาหะสุทธิชนิดอินทรินสิกของสารกึ่งตัวนำ GaAs มีค่าอยู่ในช่วง
$4.2x10^{6}$-$7.0x10^{6}$ $cm.^{-3}$
9. ความยาวเดอบายของสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ทั้งชนิดพีและชนิดเอ็นจะมีค่าอยู่ในช่วง 254.3-766.8 Å และของสารกึ่งตัวนำ GaAs มีค่าอยู่ในช่วง 19.5-23.5 Å ซึ่งจะขึ้นกับความหนาแน่นของพาหะสุทธิของสารกึ่งตัวนำที่บริเวณใกล้ผิวรอยต่อ

10. ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมฉนวนมีค่าเกือบคงที่ กล่าวคือ สำหรับตัวเก็บประจุ MIS ของสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ มีค่าประมาณ +0.25 V และสารกึ่งตัวนำ GaAs มีค่าประมาณ +2.25 V แสดงว่าผลการทดลองสอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่า เมื่อความเข้มของสนามไฟฟ้าภายในฉนวนมีค่าคงที่แล้ว ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมฉนวนจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความหนาของฉนวน ($V = Ed$) เท่านั้น
11. ค่าไบอัสความต่างศักย์ที่เริ่มเกิดชั้นกลับกลายอย่างมาก มีค่าใกล้เคียงกัน กล่าวคือ สำหรับตัวเก็บประจุ MIS ของสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ มีค่าประมาณ +1.27 V และของสารกึ่งตัวนำ GaAs มีค่าประมาณ +3.67 V
12. ค่าประจุต่อหน่วยพื้นที่ในชั้นกลับกลาย กรณีเกิดชั้นกลับกลายอย่างมาก ในสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ทั้งชนิดพีและชนิดเอ็นมีค่าอยู่ในช่วง -7.8×10^{-7} -7.1×10^{-7} C/cm.^{2} และในสารกึ่งตัวนำ GaAs มีค่าอยู่ในช่วง 5.7×10^{-6}-8.2×10^{-6} C/cm.^{2}
13. ค่าประจุต่อหน่วยพื้นที่ทั้งหมดที่อยู่บริเวณผิวหน้าสารกึ่งตัวนำเมื่อช่วงดีพลีชันกว้างมากที่สุด (W_{max}) ของสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ทั้งชนิดพีและชนิดเอ็น มีค่าอยู่ในช่วง 1.0×10^{-8}-9.2×10^{-8} C/cm.^{2} และของสารกึ่งตัวนำ GaAs มีค่าอยู่ในช่วง 1.3×10^{-6}-1.6×10^{-6} C/cm.^{2} ซึ่งมีค่าน้อยกว่าข้อ 12 จึงแสดงให้เห็นว่าความกว้างชั้นกลับกลายมีค่าน้อยกว่าความกว้างช่วงดีพลีชันที่กว้างมากที่สุดมาก
14. ความจุที่เกิดจากการมีประจุมาสะสมเป็นระยะความยาวเดอบายในบริเวณผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ ขณะที่แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำยังไม่โค้ง ($\psi_s=0$) สำหรับสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ทั้งชนิดพี และชนิดเอ็น มีค่าอยู่ในช่วง 156-375 pF สำหรับสารกึ่งตัวนำ GaAs มีค่าอยู่ในช่วง 493-633 pF ซึ่งขึ้นกับความยาวเดอบาย $\left[C_d \text{ (flat-band)} = \frac{\epsilon_s}{L_D}\right]$
15. ความเข้มสนามไฟฟ้าที่บริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ทั้งชนิดพี และชนิดเอ็นมีค่าใกล้เคียงกันคือประมาณ 6.0×10^4 V/cm. และของสารกึ่งตัวนำ GaAs มีค่าใกล้เคียงกันเช่นเดียวกันคือ มีค่าประมาณ 1.2×10^5 V/cm. ซึ่งขึ้นกับความกว้างช่วงดีพลีชันที่กว้างมากที่สุด จึงสอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่าความเข้มสนามไฟฟ้า เป็นปฏิภาคโดยตรงกับ $1/$ระยะห่างของแผ่นประจุ ($E = \frac{V}{d}$)

เมื่อความต่างศักย์ที่ตกคร่อมแผ่นประจุมีค่าคงที่คงหนึ่ง

16. ค่าสภาพเคลื่อนได้ของอิเล็กตรอนหรือของโฮล สำหรับสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ชนิดพีจะมีค่าอยู่ในช่วง 30-90 cm.^{2}/V.s

สำหรับสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ชนิดเอ็นจะมีค่าอยู่ในช่วง 270-865 $cm^2/V.s$

สำหรับสารกึ่งตัวนำ GaAs จะมีค่าอยู่ในช่วง 865-1650 $cm^2/V.s$

17. ค่าสภาพนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอนและโฮล

สำหรับสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ชนิดพีจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.2-0.5 $(\Omega\text{-cm})^{-1}$

สำหรับสารกึ่งตัวนำ GaAs ชนิดเอ็นมีค่าอยู่ในช่วง 526.3-1000.0 $(\Omega\text{-cm})^{-1}$

มีความถูกต้อง เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ทุกตัวของสารกึ่งตัวนำ GaAs ที่วัดได้จากเครื่องมือชนิดนี้สอดคล้องกับค่ามาตรฐานที่ทางโรงงานผลิตศึกษาตรวจสอบมาแล้วจริงเกือบทุกค่า อย่างไรก็ตาม แม้จะมีการนำอุปกรณ์ที่มีอยู่เดิม มาดัดแปลงใช้งานร่วมกับระบบไมโครคอมพิวเตอร์ เพื่อช่วยในการเก็บและวิเคราะห์ข้อมูล จากผลการทดลองที่วัดได้ทำให้สามารถศึกษาสมบัติของรอยต่อแบบ MIS สะดวกและรวดเร็วขึ้น แต่ปัญหาที่สำคัญสำหรับการใช้งานก็คือ การทำงานผิดพลาดของระบบคอมพิวเตอร์ ซึ่งเกิดเนื่องจากมีการใช้แหล่งจ่ายไฟให้กับเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ร่วมกับอุปกรณ์ต่าง ๆ ในห้องวิจัย มักทำให้เกิดไฟกระเพื่อม หรือทำให้ค่าความต่างศักย์ที่เข้าระบบคอมพิวเตอร์ไม่คงที่ ดังนั้นหากแก้ไขปัญหานี้ ด้วยการใช้แหล่งจ่ายไฟที่ทำหน้าที่รักษาเสถียรภาพ (power line condition) ที่ใช้เฉพาะเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ก็จะทำให้ได้ผลการทดลองถูกต้องขึ้น และจะลดปัญหาขณะทำการเก็บข้อมูลไปได้มากทีเดียว

ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

จากการศึกษาวิธีการเตรียมผลึกกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ซึ่งนับว่าเป็นขั้นตอนพื้นฐานที่สำคัญในการวิจัยทางด้านฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ ทำให้ทราบถึงเทคนิคในการเตรียมเพื่อให้ได้สารที่มีขนาดใหญ่และเป็นผลึกเอกพันธ์ที่สมบูรณ์เพื่อนำไปใช้ในการทดลอง ซึ่งจะให้ข้อมูลที่มีความถูกต้องมากขึ้น แต่อย่างไรก็ดี สารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะตามต้องการนี้ เตรียมขึ้นได้ยากลำบากมากโดยทั่วไป สารกึ่งตัวนำที่เตรียมโดยวิธีไดเรกชันนัล ฟรีซชิง ด้วยวิธีลดอุณหภูมิเตาจะอยู่ในรูปของผลึกเอกพันธ์หลายเกรน ข้อมูลที่วัดได้จึงมีโอกาสเกิดความผิดพลาด (error) มากกว่าข้อมูลที่วัดได้จากผลึกเอกพันธ์ (single crystal) นอกจากนี้จะทำให้ทราบถึงแนวทาง ในการหาค่าชนิดและสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ การทำรอยต่อแบบโอห์มมิกของ สารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ทั้งชนิดนี และชนิดเอ็นกับของสารกึ่งตัวนำ GaAs ชนิดเอ็นที่ใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิห้อง การทำรอยต่อแบบ MIS ของ $CuInSe_2$ และ GaAs อันเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการวัดสมบัติทางไฟฟ้า รวมทั้งทำให้ทราบว่า $CuInSe_2$ ที่เตรียมขึ้นจากเงื่อนไขต่าง ๆ นี้ มีสิ่งเจือปน สารอสุทธิหรือความไม่สมบูรณ์ของผลึกอยู่ และการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนธาตุให้มากกว่าค่าสตอยคิโอเมตริเล็กน้อย สามารถควบคุมชนิดการนำไฟฟ้าของสารได้ จะเป็นประโยชน์ต่อการเตรียมผลึกกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ เพื่อนำมาทำอุปกรณ์ต่าง ๆ ใช้งานในขั้นต่อไป สำหรับแง่ของการประยุกต์นั้น เป็นไปได้ที่จะนำผลึกกึ่งตัวนำ

$CuInSe_2$ มาใช้เป็นฐานรอง เพื่อระเหย CdS เข้าไปเคลือบ กลายเป็นสิ่งประดิษฐ์แบบเฮทเทอร์โรจังค์ชัน ใช้ทำเป็นโฟโตโวลตาอิกดีเทกเตอร์หรือเซลล์แสงอาทิตย์ ในโอกาสต่อไปและอาจเป็นไปได้ ที่จะนำผลึกกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ และ GaAs ที่เตรียมได้มาทำเป็นสิ่งประดิษฐ์โดยอาศัยพื้นฐานจากลักษณะรอยต่อแบบ MIS ซึ่งได้แก่ MISFET, MIOS และ DMIS เป็นต้น ดังนั้นการวิจัยนี้จึงเป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนาสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ และ GaAs ทั้งการวิชาการและการประยุกต์ใช้งานต่อไปในอนาคต

<u>ข้อเสนอแนะ</u>

จากการเตรียม สารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ จากสภาวะหลอมเหลว โดยวิธีไดเรกชันนัล ฟรีซชิง ด้วยวิธีลดอุณหภูมิเตา เท่าที่ผ่านมา ยังไม่สามารถควบคุมกลไกการเกิดผลึกเอกพันธ์ที่มีขนาดใหญ่ได้ เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ดังกล่าว ในการเตรียมสารเราอาจเลือกใช้เตาที่สามารถปรับค่าเกรเดียนท์ของอุณหภูมิ และอัตราการเกิดผลึกให้เหมาะสมและสม่ำเสมอได้ โดยการใช้เตาสองโซน และการควบคุมการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิเตาด้วยวงจรไฟฟ้ากึ่งกลศาสตร์ ซึ่งจะช่วยในการหลีกเลี่ยงการระเบิดที่เกิดเนื่องจากการทำปฏิกิริยากันระหว่าง In และ Se ซึ่งทำให้ความดันไอมีค่าสูงโดยการให้ Cu ทำปฏิกิริยากับ In ก่อนในโซนหนึ่งแล้วจึงระเหย Se_2 เข้ามาทำปฏิกิริยากับ Cu-In ที่กำลังหลอมเหลวอยู่ แล้วจึงปรับค่าอุณหภูมิเตาแต่ละโซนให้เหมาะสม การควบคุมการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิเตาด้วยวงจรไฟฟ้ากึ่งกลศาสตร์ จะทำให้อัตราการเกิดผลึกมีค่าคงที่ ซึ่งสะดวกและประหยัดเวลาการทำงานมาก นอกจากนี้ควรพิจารณาเลือกใช้หลอดแก้วควอทซ์ขนาดต่าง ๆ เพื่อให้ได้แท่งผลึกขนาดตามต้องการด้วย

เราอาจจะควบคุมชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ที่เตรียมขึ้นเองได้โดยการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนธาตุ Cu, In และ Se ให้ต่างไปจากค่าสตอยคิโอเมตตริเล็กน้อย หรือใช้วิธีโด๊ปด้วยธาตุบางอย่างที่เหมาะสม เช่นธาตุในกลุ่ม IV หรือกลุ่ม V ลงไปเป็นต้น หรือโดยการนำ $CuInSe_2$ มาแอนนีล ในบรรยากาศของธาตุต่าง ๆ ที่อุณหภูมิค่าเหมาะสมสำหรับการกำจัดข้อบกพร่องผลึก ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติที่บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำเพื่อทำรอยต่อแบบโอห์มมิกนั้น สามารถทำโดยการนำมาแอนนีลด้วยเงื่อนไขที่เหมาะสมซึ่งจะทำให้ได้รอยต่อแบบโอห์มมิกที่ดี แต่การไม่ทราบรายละเอียดเกี่ยวกับสิ่งเจือปนและลักษณะตำแหน่งของอะตอมที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องผลึกในโครงสร้างผลึก มักจะเป็นสาเหตุให้ข้อสรุปผิดพลาดไป เช่น ในความเป็นจริงแล้วตำแหน่งของระดับพลังงานเฟอร์มิจะขึ้นกับสถานะประจุของข้อบกพร่องผลึก [55] แต่แบบจำลอง (model) ง่าย ๆ ที่นำมาใช้อธิบายผลการทดลองนั้นเราสมมุติว่าตำแหน่งของระดับพลังงานเฟอร์มิจะอยู่คงที่เสมอ ดังนั้นจึงเป็นการสมมติคำอธิบายที่ทำให้ผลการทดลองผิดพลาดไปเป็นต้น การวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ค่าความต่างศักย์

มักเป็นที่นิยม ใช้ตรวจสอบอุปกรณ์ที่มีลักษณะโครงสร้างพื้นฐานมาจากลักษณะรอยต่อแบบ MIS กันอย่างแพร่หลายเพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ การวัดที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้ค่าความถี่ต่าง ๆ และการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-เวลาที่เปลี่ยนไปจะทำให้ได้ข้อมูลเพิ่มขึ้นมามากมาย เกี่ยวกับลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และช่วงชีวิตพาหะของสารกึ่งตัวนำตามลำดับ สำหรับการเคลือบชั้นฉนวน ควรทำให้มีความหนาเหมาะสม สะอาด เรียบสม่ำเสมอ และควรทำทันทีที่ทำความสะอาดผิวหน้าสารกึ่งตัวนำเสร็จ เพื่อหลีกเลี่ยงสิ่งสกปรกที่จะเกาะติดอยู่บนผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ อันเป็นสาเหตุของการเกิดสถานะประจุที่ผิวรอยต่อระหว่างฉนวน - สารกึ่งตัวนำ ข้อเสียของการใช้น้ำยาไวแสงผสมทินเนอร์ ทำเป็นชั้นฉนวนก็คือ ควบคุมความหนา ความเรียบสม่ำเสมอตลอดทั่วผิวหน้าสารกึ่งตัวนำยากมาก แม้จะอาศัยการใช้เครื่องสปินเนอร์ (spinner) เพื่อทำให้น้ำยาแห้งติดบนผิวหน้าสารกึ่งตัวนำก็ตาม ดังนั้นควรทำชั้นฉนวนด้วยสารชนิดอื่นเช่นสารประกอบออกไซด์ เป็นต้น ซึ่งมีวิธีการเคลือบแตกต่างกันมากมายหลายวิธี เช่น การทำสปัตเตอริง (sputtering) การระเหย (evaporation) การเคลือบชั้นฉนวนจากสารละลายด้วยไฟฟ้า (anodic oxidation) การเคลือบชั้นฉนวนโดยขบวนการพาด้วยไอระเหยสารเคมี (CVD process) เป็นต้น วิธีการต่าง ๆ เหล่านี้สามารถควบคุมปริมาณความหนา ความเรียบ สม่ำเสมอ และความสะอาดของชั้นฉนวนได้ง่าย นอกจากนี้การทำชั้นฉนวนทับบนชั้นฉนวนที่เป็นน้ำยาไวแสงผสมกับทินเนอร์อีกชั้นหนึ่ง และการนำมาอบที่อุณหภูมิพอเหมาะ จะทำให้สถานะผิวรอยต่อและกับดักประจุตรงผิวรอยต่อและกับดักประจุในชั้นฉนวนลดน้อยลง ซึ่งทำให้ตัวเก็บประจุเสถียรมากขึ้น ส่วนการทำชั้นโลหะนั้นต้องระมัดระวังอย่าให้โลหะเหลวที่ใช้ ไหลกลิ้งตกลงจากขอบสารกึ่งตัวนำ พื้นที่ของโลหะต้องเล็กมากเมื่อเทียบกับพื้นที่ของผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ อันจะทำให้มีโอกาสได้อุปกรณ์ที่มีชั้นฉนวนเรียบ หนาสม่ำเสมอมากที่สุด รูปลักษณะสัณฐานของโลหะควรมีลักษณะแน่นอนอย่างใดอย่างหนึ่ง เช่น กลมหรือสี่เหลี่ยม เป็นต้น เพราะมีความสำคัญต่อการคำนวณหาพื้นที่อย่างมาก ลักษณะขอบของโลหะควรลาดชัน เพื่อป้องกันการเกิดกระแสรั่วไหลที่ขอบของอุปกรณ์ แต่ในงานวิจัยนี้เนื่องจากใช้โลหะเหลว In-Hg หรือ In-Ga หรือ Ga เป็นชั้นโลหะ จึงเป็นการยากต่อการควบคุมลักษณะดังกล่าว และนอกจากนี้ยังทำชั้นโลหะด้วยวิธีหยอดแตะลงบนชั้นฉนวน ถ้าทำแรงเกินไป อาจทำให้ชั้นฉนวนทะลุได้ อุปกรณ์ที่ได้ก็จะกลายเป็นมีลักษณะรอยต่อแบบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ อันเป็นกรณีที่เราไม่ต้องการพิจารณาไป การทำชั้นโลหะที่ดี ควบคุมได้โดยอัตโนมัติ มีมากมายหลายวิธี ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่ใช้ เช่น ถ้าเป็นอลูมิเนียม (Al) หรือ ทอง (Au) ก็มักจะใช้วิธีการระเหยผ่านแผ่นภาพหน้ากากที่เจาะเป็นช่องลักษณะรูปร่าง และขนาดตามที่ต้องการมีพื้นที่แน่นอนซึ่งจะวางอยู่บนชั้นฉนวนเป็นต้น เพื่อความถูกต้องมากขึ้น ควรมีการเปรียบเทียบข้อมูลที่วัดได้จากงานวิจัยนี้กับสารที่นำมาใช้สอบเทียบมาตรฐาน อีกทั้งควรจะมีการวัดปรากฏการณ์อื่น ๆ เปรียบเทียบกัน เช่น การวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall effect) การวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ - ความต่างศักย์ การวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า - ความต่างศักย์

การวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ การวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าประจุ – ความต่างศักย์ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เป็นต้น เพื่อหาค่าความหนาแน่นของพาหะสุทธิ สภาพเคลื่อนได้และสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้จะทำให้ได้ข้อสรุปผลที่ถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น อันจะเป็นแนวทางในการปรับปรุงวิธีการเตรียมผลึกให้เป็นไปตามความต้องการสำหรับงานวิจัยขั้นสูงต่อไป ซึ่งจะช่วยในการประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายมากขึ้น