หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
บทนำ

การศึกษาเกี่ยวกับสารกึ่งตัวนำได้ทำกันมานานแล้ว นับตั้งแต่มีการประดิษฐ์อุปกรณ์กึ่งตัวนำ เพื่อแปลงกระแสไฟฟ้าสลับเป็นกระแสตรงโดยใช้ลวดโลหะต่อเข้ากับผลึก CuO ขึ้นมาในปี พ.ศ. 2417 [1] จนปัจจุบันนี้ได้มีการศึกษาวิจัยสารกึ่งตัวนำทั้งในด้านการทดลอง และทฤษฎีควบคู่กันไปด้วย ซึ่งสามารถนำสารกึ่งตัวนำมาประดิษฐ์ขึ้นเป็นอุปกรณ์เพื่อใช้งานด้านต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง สารกึ่งตัวนำที่เป็นมูลฐานและถูกนำมาใช้ประโยชน์กันมากคือ ธาตุซิลิกอน (Si) ซิลิกอนเป็นสารกึ่งตัวนำที่ได้รับการพัฒนามานาน จึงเป็นที่เข้าใจเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกันดี และมีการนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบัน เช่น นำมาทำไดโอด (diode) ทรานซิสเตอร์ (transister) เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) และ วงจรรวม (integrated circuits) เป็นต้น

อย่างไรก็ตามงานวิจัยเกี่ยวกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ที่คาดว่ามีสมบัติที่ดีกว่าซิลิกอนก็ยังคงมีการดำเนินงานต่อไปอย่างไม่หยุดยั้ง สารกึ่งตัวนำที่ประสบความสำเร็จบ้างแล้วได้แก่ GaAs, $Ga_x Al_{1-x}As$, CdS และ InSb เป็นต้น ซึ่งสารกึ่งตัวนำเหล่านี้เหมาะสำหรับการนำไปประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์โฟโตอิเล็กตริก (photoelectric devices) ในรูปแบบต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี ด้วยเหตุนี้ ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับการเตรียมสารกึ่งตัวนำ และการวัดสมบัติทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ จึงถูกนำมาใช้เป็นขั้นตอนที่สำคัญสำหรับการวิจัยสารกึ่งตัวนำชนิดใหม่ ๆ เพื่อพิจารณาว่าสารกึ่งตัวนำที่เตรียมขึ้นมานั้นมีสมบัติทางฟิสิกส์อย่างไร เหมาะที่จะนำไปประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์ที่ต้องการหรือไม่ ในปัจจุบันนี้อุปกรณ์ประเภทมอสเฟตกำลังได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลาย แต่ทว่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์ประเภทนี้จะขึ้นอยู่กับสมบัติของผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ประดิษฐ์อย่างมาก [2] ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการศึกษาและตรวจสอบสมบัติผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ และสมบัติผิวระหว่างรอยต่อของฉนวน-สารกึ่งตัวนำ (insulator - semiconductor interfaces) ในยุคแรก ๆ นิยมใช้ทฤษฎีเกี่ยวกับทฤษฎีผลของสนามไฟฟ้าแบบดั้งเดิม (classical field effect theory) เป็นหลักการพื้นฐานที่สำคัญสำหรับศึกษาสมบัติของมอสเฟต และตัวเก็บประจุ MIS ซึ่งในงานวิจัยนี้เราจะเลือกใช้ตัวเก็บประจุ MIS ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ โดยที่ปริมาณต่าง ๆ ที่วัดได้จะขึ้นกับค่าความต่างศักย์ที่จ่ายให้แก่เกท (gate bias) และค่าความถี่ที่ใช้ในการวัด

เนื่องจากตัวเก็บประจุ MIS มีลักษณะพิเศษคือ มีโครงสร้างแบบง่ายๆ เป็นสิ่งประดิษฐ์ไม่ซับซ้อนจึงวิเคราะห์ผลได้ง่าย เพราะใช้เงื่อนไขการสมดุลเชิงความร้อน (thermal equilibrium conditions) และพิจารณาเพียงหนึ่งมิติเท่านั้น นอกจากนี้ในการศึกษาสมบัติต่าง ๆ จากตัวเก็บประจุ MIS ยังไม่เป็นการทำลายสมบัติใด ๆ ของตัวเก็บประจุ MIS อีกด้วย

ในการศึกษาสมบัติของระบบ MIS โดยวิธีต่าง ๆ เช่น การวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส-ความต่างศักย์ (I-V measurement) ค่าประจุ-ความต่างศักย์ (Q-V measurement) ค่าความจุ-ค่าความถี่ (C-F measurement) และค่าความจุ-ความต่างศักย์ (C-V measurement) เป็นต้น จะทำให้เราทราบสมบัติต่าง ๆ ดังนี้คือ การโค้งของแถบพลังงาน ที่ผิวรอยต่อ (surface band bending) ขนาดของช่วงดีพลีชัน (depletion layer width) ค่าความต่างศักย์และค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดสภาวะพังทลายของตัวเก็บประจุ (voltage and field at avalanche breakdown) ค่าการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของพาหะที่ระยะต่าง ๆ ในสารกึ่งตัวนำ (doping profile in semiconductor) ค่าความหนาแน่นของระดับพลังงานที่เป็นกับดักตรงบริเวณรอยต่อ (interface trap level density) ที่อยู่ภายในช่องว่างแถบพลังงาน ตำแหน่งของระดับพลังงานที่เป็นกับดักที่อยู่ภายใน ช่องว่างแถบพลังงาน (interface trap centers) ค่าช่วงชีวิต (lifetime) ของพาหะในเนื้อสารกึ่งตัวนำ ค่าความหนาของฉนวน (insulator thickness) ค่าประจุที่อยู่กับที่ในชั้นฉนวน (insulator fixed charge) ค่าประจุที่อยู่ตรงบริเวณผิวรอยต่อ (charge at the interface) ผลต่างค่าเวิร์กฟังค์ชัน (work function) ระหว่างสารกึ่งตัวนำ และเกท (gate) ชนิดการนำไฟฟ้า (conducting type) ของสารกึ่งตัวนำ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant) ของสารกึ่งตัวนำ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฉนวน ค่าความหนาแน่นของพาหะสุทธิของสารกึ่งตัวนำที่บริเวณใกล้ ๆ ผิวรอยต่อในกรณีที่มีการกระจายของพาหะแบบสม่ำเสมอ (concentration of the net carrier in semiconductor region near the surface) ขนาดของช่วงดีพลีชันมากที่สุด (maximum depletion layer width) ค่าความจุของรอยต่อแบบฉับพลัน (abrupt junction capacitance) ค่าความจุของฉนวน (insulator capacitance) ค่าความจุของชั้นกลับกลาย (inversion layer capacitance) หรือค่าความจุของชั้นดีพลีชัน (depletion layer capacitance) เมื่อขนาดของช่วงดีพลีชันมากที่สุด ค่าความจุพาหะที่ไม่มีการไบอัสแก่รอยต่อ (flatband capacitance) ค่าความต่างศักย์ที่ไม่ทำให้แถบพลังงานโค้ง (flatband voltage) ที่เลื่อนไปจากกรณีอุดมคติ เป็นต้น

อย่างไรก็ตามแม้ว่าปัจจุบันอุปกรณ์กึ่งตัวนำต่าง ๆ จะทำจากซิลิกอน แต่ก็มีการพัฒนาสารกึ่งตัวนำอื่น ๆ ขึ้นมาอีกด้วยเช่นกัน สารกึ่งตัวนำกลุ่มหนึ่งซึ่งคาดว่าสามารถนำมาทำเป็นอุปกรณ์ได้ก็คือ สารกึ่งตัวนำในกลุ่มชาลโคไพไรท์ (Chalcopyrite) สารกลุ่มนี้แบ่งออกได้เป็น

2 พวกคือ พวกที่มีสูตรเคมี I-III-VI_2 และ II-IV-V_2 ตามลำดับ แต่สำหรับ $CuInSe_2$ ยังไม่ได้มีการศึกษาในรูปแบบของ MIS เลย การวิจัยครั้งนี้จึงเลือกวิจัย $CuInSe_2$ โดยใช้ GaAs เป็นตัวสอบเทียบมาตรฐานเครื่องมือและวิธีทำการทดลอง

$CuInSe_2$ ที่ใช้วิจัยในครั้งนี้ได้จากการปลูกผลึกแบบไดเรกชันนัลฟรีซชิง (directional freezing method) โดยการลดอุณหภูมิเตาในแนวเฉียง 5 องศากับแนวราบด้วยอัตรา 28 °Cต่อวัน ส่วน GaAs ที่ใช้สอบเทียบมาตรฐาน เป็นสารกึ่งตัวนำสำเร็จรูปที่ถูกโด๊ปด้วย Si จากการตรวจสอบกระแสที่เกิดจากการแพร่ด้วยวิธีชี้วัดความร้อนพบว่า $CuInSe_2$ เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) หรือชนิดเอ็น (n-type) อย่างใดอย่างหนึ่ง ส่วน GaAs พบว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity) ด้วยวิธีแวนเดอเพาว์ พบว่า $CuInSe_2$ มีสภาพต้านทานไฟฟ้าประมาณ 2.0 - 6.0 Ω-cm. ที่อุณหภูมิห้อง (300 K) ส่วน GaAs จะมีสภาพต้านทานไฟฟ้าประมาณ 0.0019 - 0.0010 Ω-cm. และมีค่าสภาพเคลื่อนได้ของอิเล็กตรอนเท่ากับ 1041 - 1326 $cm^2/V.s.$ สำหรับขั้นตอนในการวิจัยครั้งนี้มีดังนี้

1. นำธาตุ Cu , In และ Se ที่มีความบริสุทธิ์สูงและมีสัดส่วนของธาตุตามต้องการมาหลอม เพื่อให้ได้ผลึกกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ตามวิธีการเตรียมผลึกแบบไดเรกชันนัล ฟรีซชิง โดยใช้เทคนิคการลดอุณหภูมิเตาในแนวเฉียงประมาณ 5 องศา กับแนวราบ
2. ทดสอบชนิดการนำไฟฟ้า และสภาพต้านทานไฟฟ้า
3. คำนวณค่าสภาพนำไฟฟ้าจากค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้
4. นำสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ และ GaAsมาทำรอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ (Metal-Insulator-Semiconductor Junctions or MIS Junctions)
5. ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของ $CuInSe_2$ ที่ทำรอยต่อแบบ MIS และของ GaAs ที่ทำรอยต่อแบบ MIS ด้วยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ-ความต่างศักย์ (C-V measurement) ที่ค่าความถี่สูงคงที่ 1 MHz ที่อุณหภูมิห้องอันได้แก่ ค่าความหนาแน่นของพาหะสุทธิของสารกึ่งตัวนำที่บริเวณใกล้ ๆ ผิวรอยต่อ ขนาดของช่วงดีพลีชันมากที่สุด ค่าความจุของรอยต่อแบบฉับพลัน ค่าความจุของฉนวน ค่าความจุของชั้นกลับกลาย ค่าความจุขณะที่ไม่มีการไบอัสแก่รอยต่อ ค่าความต่างศักย์ที่ไม่ทำให้แถบพลังงานโค้ง และจากค่าความหนาแน่นของพาหะสุทธิของสารกึ่งตัวนำที่บริเวณใกล้ ๆ ผิวรอยต่อ จะทำให้เราสามารถหาค่าสภาพเคลื่อนได้ของอิเล็กตรอนหรือของโฮลได้ด้วย
6. นำข้อมูลที่ศึกษาได้ทั้งหมดมาสรุป เพื่อใช้เป็นประโยชน์ในการเตรียมสารและในการวิจัยประยุกต์ใช้เป็นสิ่งประดิษฐ์ต่าง ๆ ต่อไปในอนาคต

สิ่งสำคัญในการวิจัยประการหนึ่งคือ ความต้องการที่จะเตรียมผลึกกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ให้ได้ขนาดใหญ่พอที่จะใช้ในการทดลอง และต้องเป็นผลึกที่มีความสมบูรณ์สูง อีกทั้งข้อบกพร่องของผลึก (crystal defects) ต้องมีค่าน้อยที่สุด ข้อบกพร่องของผลึกดังกล่าว

ได้แก่การที่ อะตอมของคอปเปอร์ (Cu) และ/หรืออินเดียม (In) และ/หรือซีลีเนียม (Se) หายไปจาก ตำแหน่งที่ควรจะมีอะตอมนั้น ๆ อยู่ (vacancy defect) หรืออาจเป็นกรณีที่อะตอมเหล่านั้นเข้าไปอยู่ใน ตำแหน่งควรจะเป็นที่ว่าง (interstitials defect) หรือไม่ก็อะตอมเหล่านั้นเข้าไปแทนที่ ตำแหน่งของอะตอมชนิดเดิม หรืออะตอมในโครงผลึกที่สมบูรณ์แบบ (substitutional defect) ซึ่งข้อบกพร่องของผลึกต่าง ๆ เหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำนอกจากนี้ยังพบว่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำยังขึ้นกับเงื่อนไขที่ใช้ในการแอนนีล และค่าสัดส่วนผสมที่ต่างไปจากค่าสตอยคิโอเมตตริเล็กน้อยด้วย เช่น ผลึกที่มีการเติมธาตุซีลีเนียม มากกว่าค่าสตอยคิโอเมตตริเล็กน้อย หรือผลึกที่ถูกแอนนีลภายใต้บรรยากาศ ของซีลีเนียมจำนวนมาก จะมีการนำไฟฟ้าเป็นชนิดพี ผลึกที่มีการเติมธาตุคอปเปอร์มากกว่าค่าสตอยคิโอเมตตริเล็กน้อย หรือผลึกที่ถูกแอนนีลภายใต้บรรยากาศของคอปเปอร์จำนวนมาก จะมีการนำไฟฟ้าเป็นชนิดเอ็น หรือ ชนิดพี และผลึกที่มีการเติมธาตุอินเดียมมากกว่า ค่าสตอยคิโอเมตตริเล็กน้อย หรือผลึกที่ถูกแอนนีลในสุญญากาศจะมีการนำไฟฟ้าเป็นชนิดเอ็น เป็นต้น [3]

ดังนั้นการวิจัยนี้จึงทำให้ทราบถึงเทคนิคในการเตรียมสาร และพื้นฐานขั้นต้นในการประดิษฐ์อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบง่ายๆ ซึ่งนับว่าเป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนา สารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ทั้งเชิงวิชาการ และการประยุกต์ต่อไปในอนาคต