

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผล

ขั้นตอนของงานวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ขั้นตอนแรกเป็นการศึกษาเทคนิคการวัดความจุ-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างเป็นแบบ MIS ขั้นตอนต่อไปคือการสร้างระบบซี-วี ควบคุมโดยคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการศึกษาการวัดความจุ-แรงดันไฟฟ้า และขั้นตอนสุดท้ายคือการทดสอบการทำงานของระบบที่ได้สร้างขึ้นกับตัวอย่างมาตรฐาน และทดลองวัดกับตัวอย่างที่มีเป็นโครงสร้าง MIS โดยมี CuInSe_2 เป็นแผ่นรองรับ ในบทนี้จะได้สรุปและวิจารณ์ผลแต่ละขั้นตอนตามลำดับ

จากการศึกษาเทคนิคการวัดความจุ-แรงดันไฟฟ้าพบว่า เป็นวิธีการศึกษาที่เหมาะสมในงานวิจัยสมบัติของสารกึ่งตัวนำตั้งต้น เพื่อนำไปใช้สร้างเป็นอุปกรณ์กึ่งตัวนำต่อไป เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาไม่ยุ่งยากเกินไป สามารถดัดแปลงเป็นระบบอัตโนมัติได้ง่าย ตัวอย่างที่ใช้ในการวัดคือโครงสร้าง MIS เตรียมได้ง่ายและที่สำคัญคือการวัดด้วยวิธีการเช่นนี้จะทำให้เราได้ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างนี้เป็นอันมาก ตั้งแต่บริเวณชั้นฉนวน, บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฉนวนและสารกึ่งตัวนำ และบริเวณที่เป็นสารกึ่งตัวนำ ประจุไฟฟ้าที่อยู่ในบริเวณนี้มีส่วนกำหนดประสิทธิภาพและเสถียรภาพของอุปกรณ์กึ่งตัวนำโดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุปกรณ์กึ่งตัวนำจำพวกวงจรรวม (IC) อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้เราจะศึกษาเฉพาะบริเวณที่สามคือบริเวณที่เป็นสารกึ่งตัวนำเท่านั้น ข้อมูลที่เราได้จากการศึกษาคือชนิดของพาหะข้างมาก, ปริมาณความเข้มข้นสารเจือปน, โป้รไฟล์ของสารเจือปนและช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อย สมบัติเหล่านี้จัดได้ว่าเป็นข้อมูลเบื้องต้นในงานวิจัยสมบัติของสารกึ่งตัวนำตั้งต้น ซึ่งจะทำให้เราทราบแนวทางในการพัฒนากระบวนการเตรียมสารและควบคุมให้ได้สมบัติทางไฟฟ้าที่เหมาะสมเพื่อที่จะนำไปประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์กึ่งตัวนำต่อไป

ระบบซี-วี ที่ได้สร้างขึ้นเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการศึกษาเป็นการนำเอา อุปกรณ์ที่ใช้ตัวนำมา เชื่อมต่อกับ เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ แอปเปิลทู เพื่อให้เป็นระบบ เก็บข้อมูลอัตโนมัติ จากแนวความคิดในการนำเอาอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าความจุไฟฟ้า ที่มีมาตรฐานและมีความเที่ยงตรงสูงมา เชื่อมต่อกับ เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ พบว่า ช่วยลดขั้นตอนในการออกแบบและระบบที่สร้างเสร็จมีความเชื่อถือได้สูง ในการเก็บ ข้อมูลในแบบเก่าคือให้ผู้ที่ทำการทดลองจดบันทึกข้อมูล พบว่ามีความผิดพลาดในการจด บันทึกมากกว่าการเก็บข้อมูลโดย เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ ในลักษณะข้อมูลที่เป็นตัวเลข โดยตรง และโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการวัดโปรไฟล์สารเจือปน พบว่าค่าแรงดันไบแอส จะต้องเพิ่มขึ้นในทิศทาง การไบแอสย้อนกลับ เพื่อให้ค่าความจุไฟฟ้าของตัวอย่างที่ทำ การวัด มีค่าลดลงจากค่าเดิม ประมาณ 5 % ในระบบซี-วี นี้โปรแกรมก็จะทำการควบคุมการ เพิ่มค่าแรงดันไบแอส โดยตัดสินใจปริมาณการเพิ่มจากการวัดค่าความจุไฟฟ้าในแต่ละ ขั้นตอนของการเก็บข้อมูล เพื่อให้ค่าความจุไฟฟ้าที่จะอ่านเป็นค่าถัดไปมีค่าลดลงจาก ค่าเดิมประมาณ 5 % นอกจากนี้ในการวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วยเครื่อง Boonton 72A โปรแกรมยังได้ทำการควบคุมการ เลือกช่วงการวัดโดยอัตโนมัติโดยจะเลือกช่วงการวัด เพื่อให้ค่าความจุไฟฟ้าที่อ่านได้มีค่านัยสำคัญสูงสุดในแต่ละขั้นตอนของการเก็บข้อมูลความจุ- แรงดันไฟฟ้า และในการวัดข้อมูลที่ขึ้นกับเวลากล่าวคือการวัดความจุไฟฟ้า-เวลา การควบคุมการวัดคาบเวลาจะกระทำโดยตรงจากโปรแกรมและสัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการ ไบแอสก็สามารถสร้างขึ้นจากวงจรแปลง ข้อมูลดิจิทัลเป็นอนาลอกและควบคุมการ กำเนิดพัลส์โดยตรงจากโปรแกรม หากเป็นการเก็บข้อมูลในแบบเก่าก็จำเป็นต้องหา อุปกรณ์บางอย่างเพิ่มเติมขึ้นมาอีก และการเก็บข้อมูลจะยุ่งยากกว่า และข้อที่สำคัญคือ การนำเสนอข้อมูลและการวิเคราะห์ผลกระทำได้สะดวกและรวดเร็ว เนื่องจากมี โปรแกรมสำเร็จรูปช่วยในการพลอตกราฟและวิเคราะห์ข้อมูลเป็นอันมาก ข้อจำกัด ของระบบที่ได้ออกแบบมานี้มีส่วนที่สำคัญคือ ส่วนแรกเป็นความละเอียดของข้อมูลที่ เก็บบันทึก ในวงจรอินเทอร์เฟซเราใช้ไอซีแปลงข้อมูลอนาลอกให้เป็นดิจิทัล ชนิด ซีโมส ขนาด 12 บิต พบว่ามีความละเอียดในการแปลงข้อมูลเท่ากับ 0.02 % เมื่อนำมาเชื่อมต่อกับเครื่องวัดค่าความจุไฟฟ้า Boonton 72A และเครื่องจ่ายไฟ

ทรงโปรแกรมได้ Kepco ABC 425 M โดยการปรับความเที่ยงตรงกับดิจิทัล
 โวลท์มิเตอร์ขนาด $4\frac{1}{2}$ หลัก พบว่า ค่าความจุไฟฟ้าที่อ่านได้มีความผิดพลาด $\pm 0.5\%$
 ของค่าเต็มสเกลในแต่ละช่วงการวัดและค่าแรงดันไบแอสมีความผิดพลาด ± 0.002
 โวลท์ในช่วงเต็มสเกล 5 โวลท์ และ ± 0.004 โวลท์ในช่วงเต็มสเกล 10 โวลท์
 ชี้ดจำกัดส่วนที่สองคือ การทำงานของโปรแกรมบางส่วนใช้เวลามาก ทั้งนี้เป็นเพราะ
 โปรแกรมส่วนใหญ่จะเขียนด้วยภาษาเบสิก เนื่องจากการแก้ไขและตรวจสอบการ
 ทำงานของโปรแกรมกระทำได้ง่ายและรวดเร็ว การแก้ไขในชี้ดจำกัดข้อแรกอาจ
 กระทำโดยการเปลี่ยนไอซีแปลงข้อมูลใหม่จำนวนบิตเพิ่มมากขึ้น เช่นขนาด 14 บิต จะ
 ทำให้ความละเอียดของข้อมูลสูงขึ้น เป็นต้น ส่วนชี้ดจำกัดข้อสองอาจแก้ไขโดยเปลี่ยน
 โปรแกรมบางส่วนที่ทำงานช้าให้เป็นภาษาเครื่อง เครื่องก็จะทำงานได้เร็วขึ้น

ในการทดสอบตัวอย่างมาตรฐานที่มีโครงสร้างเป็น MOS โดยมี Si โคป
 ดิวฟอสฟอรัส ปริมาณ 10^{15} cm^{-3} ชั้นออกไซด์หนา 1000 \AA ได้ทำการ
 ตรวจสอบชนิดของพาหะข้างมากและวัดปริมาณความเข้มข้นสารเจือปนพวาชชนิดของพาหะ
 ข้างมากเป็นชนิดเอ็น ซึ่งตรงกับชนิดของสารที่ใช้โคปและวัดความเข้มข้นสารเจือปนได้
 เท่ากับ $1.8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ มีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่างมาตรฐาน ส่วนการวัด
 โปรไฟล์สารเจือปน เนื่องจากไม่มีข้อมูลจากตัวอย่างมาตรฐาน จึงได้ทดลองวัดกับ
 ซิลิกอนไดออกไซด์ เบอร์ IN 5401 และได้ทดลองวัดกับรอยต่อโลหะสารกึ่งตัวนำมี
 CuInSe_2 เป็นสารกึ่งตัวนำและ In เป็นโลหะ สำหรับโครงสร้างที่เราจะใช้
 ในการวัดเป็นโครงสร้าง MIS ที่มี CuInSe_2 เป็นแผ่นรองรับและมีน้ำยาโพตรีซีสต์
 เป็นชั้นฉนวน และมี In-Ga, In-Hg เป็นขั้วโลหะ ดังนั้นจึงได้ทำการทดสอบ
 การทำงานของระบบซี-วี ด้วยตัวอย่างมาตรฐานที่เป็น GaAs ชนิดเอ็นมีความเข้มข้น
 สารเจือปน 10^{18} cm^{-3} โดยทำเป็นโครงสร้าง MIS ด้วยวิธีการเช่นเดียวกับ
 โครงสร้าง MIS ที่มี CuInSe_2 เป็นแผ่นรองรับ จากการตรวจสอบพบว่าชนิด
 ของพาหะข้างมากตรงกับข้อมูลของตัวอย่างมาตรฐานและปริมาณความเข้มข้นสารเจือปน
 มีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับการวัดช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อยเราใช้ตัวอย่างมาตรฐานมี
 โครงสร้างเป็น MOS แบบเดียวกับที่ใช้ในการวัดปริมาณความเข้มข้นสารเจือปน

พบว่าช่วงชีวิตพาหะข้างน้อยคำนวณได้เท่ากับ $56 \mu\text{s}$ ทำการวัดที่อุณหภูมิ 25°C ความถูกต้องของค่าที่วัดได้จะขึ้นกับความถูกต้องในการวัดปริมาณความเข้มข้นสารเจือปนโดยตรง ในขณะที่ทำการวัดควรจะควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่างที่ทำการวัดให้มีความคงที่และป้องกันแสงมิให้ตกกระทบตัวอย่างที่ใช้ในการวัด

ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

ในกระบวนการเตรียมสารกึ่งตัวนำคงต้นเพื่อนำไปใช้สร้างเป็นอุปกรณ์กึ่งตัวนำขึ้นตอนที่สำคัญหลังจากการเตรียมสารกึ่งตัวนำได้แล้วคือการศึกษาสมบัติบ่งชี้ต่าง ๆ ก็เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพัฒนากระบวนการเตรียมสารและควบคุมให้ได้สมบัติที่เหมาะสมตามต้องการ ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาเครื่องมือเพื่อใช้ในการศึกษาการวัดความจุ-แรงดันไฟฟ้า ซึ่งจัดได้ว่าเป็นเครื่องมือมาตรฐานที่ใช้ในการศึกษาสมบัติบ่งชี้ทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ข้อมูลที่ได้จะนำไปสู่แนวทางในการพัฒนากระบวนการเตรียมสารและควบคุมสมบัติทางไฟฟ้าให้เหมาะสมเพื่อนำไปประยุกต์เป็นอุปกรณ์กึ่งตัวนำต่อไป ระบบที่พัฒนาขึ้นช่วยให้ขั้นตอนการศึกษาสมบัติบ่งชี้ทางไฟฟ้ากระทำได้ง่ายสะดวกและรวดเร็ว นอกจากนี้แนวความคิดในการออกแบบระบบซี-วียังนำไปประยุกต์เพื่อคัดแปลงอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาสมบัติต่าง ๆ นำมาเชื่อมต่อกับเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์เพื่อให้เป็นระบบอัตโนมัติ ซึ่งจะทำให้การศึกษาสมบัติบ่งชี้ต่าง ๆ กระทำได้สะดวกและรวดเร็วยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้จึงเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยการเตรียมสารกึ่งตัวนำทั้งทางด้านวิชาการและการประยุกต์ต่อไปในอนาคต

ข้อเสนอแนะ

การวัดสมบัติบ่งชี้ทางไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS ด้วยวิธีการวัดความจุ-
 แรงดันไฟฟ้า ยังให้ข้อมูลอีกมากมาย ส่วนที่ควรจะศึกษาต่อไปคือบริเวณรอยต่อ
 ระหว่างชั้นฉนวนและสารกึ่งตัวนำ ประจุและระดับพลังงานบริเวณรอยต่อนี้
 จะเป็นปริมาณที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ผลการวัดปริมาณอื่น ๆ เป็นอันมาก เช่น
 การเบี่ยงเบนของกราฟ ลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้า, การวัดปริมาณช่วงชีวิต
 ของพาหะข้างน้อย เป็นต้น และในการวัดลักษณะความจุไฟฟ้า-เวลา หากวัดที่
 อุณหภูมิต่าง ๆ กัน จะทำให้ทราบข้อมูลเกี่ยวกับระดับพลังงานของสารเจือปนที่อยู่ใน
 ช่องว่างแถบพลังงาน การที่เราทราบข้อมูลเหล่านี้จะทำให้เข้าใจถึงธรรมชาติของ
 ระดับพลังงานของสารเจือปน จะทำให้การควบคุมสมบัติทางไฟฟ้าโดยการเติมสาร
 เจือปนกระทำได้ง่าย