บทที่ 3

วิธีการวิจัย

การทำวิจัยเพื่อศึกษาจุลโครงสร้างของซิลิกอนบนฉนวนโดยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ใช้วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. วัสดุ

วัสดุที่ใช้แล้วหมดสิ้นไปหรือสิ้นเปลืองในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยหลายชนิดดังต่อไปนี้

1.1 ตัวอย่าง ได้แก่ แผ่นผลึกซิลิกอน ซิลิกอนบนฉนวนชนิดไซมอกซ์ ที่ฝังออกซิเจนปริมาณ 3, 3.5, 4, 7 $\times$ 10^{17} ไอออนต่อตารางเซนติเมตร บนแว่นผลึกซิลิกอน (100) ชนิดพี ที่อุณหภูมิ 500 ^{o}C พลังงาน 65 keV และอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 1350 ^{o}C ในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอน 99.5 % ออกซิเจน 5 % 4 ชั่วโมง สำหรับตัวอย่างที่ไม่มีชั้นป้องกันผิว 6 ชั่วโมง สำหรับตัวอย่างที่มีชั้นป้อง-กันผิว ซึ่งตัวอย่างนี้ได้รับอนุเคราะห์จาก Prof. Supapan Seraphin มหาวิทยาลัยอริโซนา ประเทศสหรัฐอเมริกา

1.2 วัสดุที่ใช้เตรียมตัวอย่างสำหรับเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน ได้แก่

1.2.1 แผ่นแก้ว สำหรับวางตัวอย่าง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายแก่แท่นวางตัวอย่าง

1.2.2 กาวขี้ผึ้ง (wax) ใช้สำหรับติดตัวอย่าง

1.2.3 กาวจีวันอีพอกซี (G-1 epoxy) เป็นกาวที่ใช้ในการติดตัวอย่างเพื่อความแข็งแรงในการทำชั้นตัวอย่างภาคตัดขวาง

1.2.4 ผงตัดซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC_2) เป็นผงที่ใช้ในการตัดตัวอย่างด้วยเครื่องตัดอัลตราโซนิก

1.2.5 กระดาษทราย เบอร์ 2500, 4000 และแผ่นขัด ยี่ห้อ 3M ความละเอียด 40, 15 และ 5 ไมโครเมตร ใช้ขัดผิวหน้าสารตัวอย่าง

1.2.6 ผงขัดเพชร (dimond plate) ยี่ห้อ Gatan ขนาด 3 ไมโครเมตร

1.2.7 ผงขัดอะลูมินา (aluminar) ยี่ห้อ Gatan ขนาด 0.05 ไมโครเมตร

1.2.8 ท่อโลหะ (metal tube) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 ไมโครเมตร ใช้ป้องกันตัวอย่างที่ตัดเป็นรูปทรงกระบอกแล้วก่อนการตัดด้วยเครื่องตัดเพชร

1.3 ลวดอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ใช้ในการฉาบผิวเพื่อทำเป็นขั้วไฟฟ้า

1.4 ก๊าซไนโตรเจน ใช้ในขั้นตอนการอบให้ความร้อนตัวอย่างภายหลังการฉาบผิว

1.5 กาวเงิน ใช้ยึดสารตัวอย่างกับฐานรอง

1.6 แผ่นอะลูมิเนียม ใช้สำหรับเป็นฐานรองและเป็นตัวนำไฟฟ้า ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าของตัวอย่าง

1.7 กรดไฮโดรฟลูโอริก (HF) ความเข้มข้น 40 % และ สารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ใช้กัดตัวอย่าง

1.8 อะซีโตน (acetone) เมธานอล (methanol) ใช้ทำความสะอาดตัวอย่าง

1.9 น้ำกลั่น ใช้เตรียมสารละลายในการกัดสาร และใช้ในการทำความสะอาดอุปกรณ์และตัวอย่าง

2. อุปกรณ์

ในงานวิจัยนี้มีอุปกรณ์หลายชนิดซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาจุลโครงสร้าง อุปกรณ์ที่ใช้เตรียมตัวอย่างในการศึกษาจุลโครงสร้าง อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า

2.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM 5800 LV ให้กำลังขยาย 18-300,000 เท่า กำลังแยก 5.5 นาโนเมตรใช้สำหรับถ่ายภาพพื้นผิวตัวอย่าง

2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ยี่ห้อ JEOL รุ่น JEM 2010 200 kV แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน LaB_6 ให้กำลังขยาย 50-1,500,000 เท่า กำลังแยก 0.14 นาโนเมตร ใช้สำหรับถ่ายภาพภาคตัดขวางตัวอย่าง

2.3 อุปกรณ์เตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ด้วย TEM ได้แก่

2.3.1 ไมโครมิเตอร์ ความละเอียด $\pm$ 0.01 มิลลิเมตร

2.3.2 ทวิสเซอร์ (twitzer) ขนาดเล็กสำหรับจับตัวอย่างขนาดเล็ก

2.3.3 หัวตัดกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร

2.3.4 หัวตัดสี่เหลี่ยมขนาด 4×5 มิลลิเมตร

2.3.5 เครื่องตัดอัลตราโนนิก (ultrasonic disc cutter) ใช้ตัดตัวอย่าง

2.3.6 เครื่องตัดด้วยเพชร (diamon saw) ใบเลื่อยหนา 0.4 mm

2.3.7 แท่งโลหะทรงกระบอกขนาดเล็ก ใช้จับยึดตัวอย่างในการขัด

2.3.8 แท่นและจานขัด (disc grinder) ยี่ห้อ Gatan รุ่น 623

2.3.9 เครื่องขัดเว้า (dimpling grinder) ยี่ห้อ Gatan รุ่น 623

2.3.10 ล้อขัดหยาบ (grinding wheel) เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลิเมตร ใช้ขัดตัวอย่างในขั้นตอนการขัดตัวอย่างให้เป็นหลุม

2.3.10 ล้อขัดละเอียด (polishing wheel) เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลิเมตร ใช้ขัดตัวอย่างหลังจากที่ขัดตัวอย่างให้เป็นหลุมแล้วด้วยล้อขัดหยาบ

2.3.11 แท่งแก้วโปร่งแสง ใช้วางตัวอย่างในขั้นตอนการขัดตัวอย่างด้วยเครื่องขัดเว้า

2.3.12 เครื่องมือยิงผิวตัวอย่างให้บางด้วยลำอิเล็กตรอน (precision ion polishing System, PIPs) ยี่ห้อ Gatan รุ่น 691

2.4 เครื่องวัดกระแสไฟฟ้าแหล่งจ่ายไฟตรง (pA Meter/DC Voltage Source) ยี่ห้อ Hewlett packard รุ่น 6451 B ใช้วัดค่าความจุไฟฟ้า-แรงดัน

2.5 กล่องวัดยี่ห้อ Hewlett packard รุ่น 16055 A ใช้สำหรับจับตัวอย่าง เพื่อต่อกับเครื่องวัดกระแสไฟฟ้าแหล่งจ่ายไฟตรง

2.6 เครื่องระเหยสารในสุญญากาศ (vacuum evaporation) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JEE-400 ใช้ฉาบอะลูมิเนียมลงบนตัวอย่าง

2.7 เตาเผา ยี่ห้อ Cabolite รุ่น Control 201 ใช้อบให้ความร้อนตัวอย่าง

2.8 ท่อควอตท์ ใช้วางตัวอย่างในเตาเผา

2.9 เครื่องชั่งอย่างละเอียด ยี่ห้อ Deltarange รุ่น PB303-S

2.10 นาฬิกาจับเวลา

2.11 ปากคีบสำหรับจับตัวอย่าง

2.12 บีกเกอร์ จานแก้ว และช้อนตักสาร

2.13 เทอร์โมคับเปิล (thermocouple) ยี่ห้อ Hanna รุ่น HI 5757 ใช้วัดอุณหภูมิสารละลาย

2.14 เตาหน้าดำ (hot plate) ยี่ห้อ PNP รุ่น HS-2 ใช้สำหรับให้ความร้อน

3. วิธีดำเนินการ

ในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนการวิจัย 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการศึกษาจุลโครงสร้างซึ่งประกอบด้วยการเตรียมตัวอย่างเพื่อการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดและชนิดส่องผ่าน การวิเคราะห์ภาพถ่าย และขั้นตอนการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไซมอกซ์ ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง การวัด และการวิเคราะห์คุณสมบัติ ดังนี้

3.1 การศึกษาจุลโครงสร้าง แบ่งเป็นการศึกษาจุลโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดและชนิดส่องผ่าน ดังนี้

3.1.1 การศึกษาจุลโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

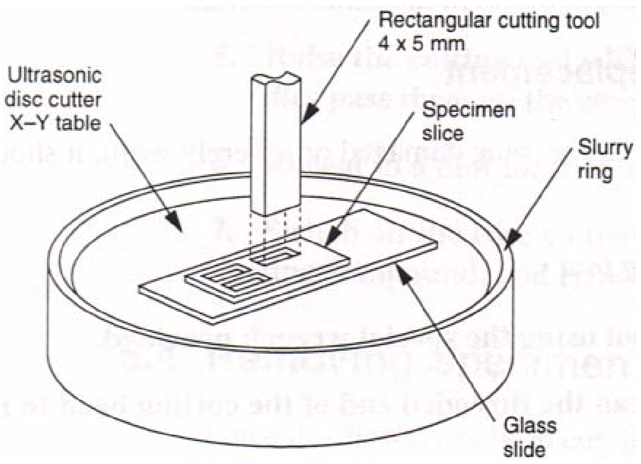
3.1.1.1 ศึกษาลักษณะภาคตัดขวางของผลึกเดี่ยวซิลิกอน โดยการตัดด้วยปากกาหัวเพชร เครื่องตัดอัลตราโซนิก นำไปขัดด้วยกระดาษทราย เบอร์ 2,500 และ 4,000 และนำไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

3.1.1.2 ศึกษาความหนาของชั้นออกไซด์บนผลึกเดี่ยวซิลิกอนด้วยการกัดด้วยสารละลายกรดไฮโดรฟลูโอริก ความเข้มข้น 40 % ที่อุณหภูมิห้อง และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 45% ที่อุณหภูมิ 70^0 C และนำไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

3.1.2 การศึกษาจุลโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน แบ่งขั้นตอนการศึกษาออกเป็น 2 ขั้นตอนได้แก่ การเตรียมตัวอย่างภาคตัดขวางเพื่อการถ่ายภาพและการวิเคราะห์ภาพถ่าย

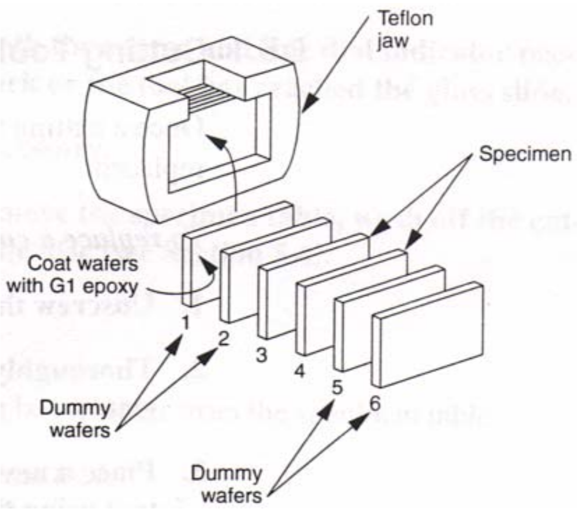
3.1.2.1 เตรียมตัวอย่างภาคตัดขวาง (crossection) มีขั้นตอนการเตรียม ดังนี้

ก. ตัดตัวอย่างเป็นแผ่นสี่เหลี่ยม ด้วยเครื่องตัดอัลตราโซนิก โดยนำแผ่นกระจกไปติดลงบนแท่นวางตัวอย่างเพื่อป้องกันการตัดลงบนแทนวางตัวอย่าง แล้วจึงนำตัวอย่างไปติดบนกระจกด้วยกาวอีกทีหนึ่ง บนเครื่องให้ความร้อนอุณหภูมิ 130 ^{o}C แล้ววางให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ภาพประกอบที่ 3.1 แสดงการตัดตัวอย่างด้วยหัวตัดสี่เหลี่ยมขนาด 4 $\times$ 5 มิลลิเมตร ในการตัดตัวอย่างให้ใส่ผงตัดซิลิกอนคาร์ไบด์ และมีน้ำช่วยในการตัดเสมอ



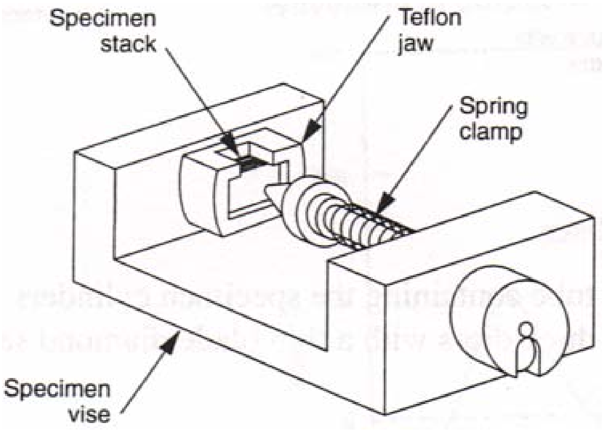
ภาพประกอบที่ 3.1 แสดงภาพลักษณะการวางตัวอย่างในการตัดตัวอย่างด้วยเครื่องตัดอัลตราโซนิค

ข. การทำชั้นตัวอย่าง โดยนำตัวอย่างที่ตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม จำนวน 6 ชิ้น มาประกบกันในช่องวางตัวอย่าง ด้วยจีวันอีพอกซี ดังภาพประกอบที่ 3.2 โดยที่ ตำแหน่งที่ 3 กับ 4 เป็นตำแหน่งของตัวอย่างที่ต้องการศึกษาและวางให้ผิวหน้าของด้านที่ต้องการศึกษาประกบกัน ส่วนชิ้นที่อยู่ด้านข้างหรือ Dummy จะเป็นตัวอย่างอื่นก็ได้



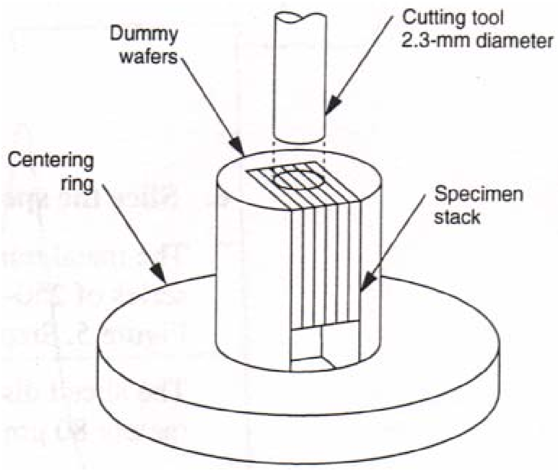
ภาพประกอบที่ 3.2 แสดงการทำชั้นตัวอย่าง

ค. กดชั้นตัวอย่าง ให้ตัวอย่างติดกันแน่นเพื่อป้องกันการแตกของตัวอย่าง ในขั้นตอนการตัดและการขัดโดยนำตัวอย่างในขั้นตอน ข ไปวางตรงที่หนีบ (specimen vise) ให้สปริงดันตัวอย่างให้อัดกันแน่นดังภาพประกอบที่ 3.3 แล้ววางบนเตาให้ความร้อน อุณหภูมิ 130 ^{0} C นาน 10 นาที หลังจากนั้นวางให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง



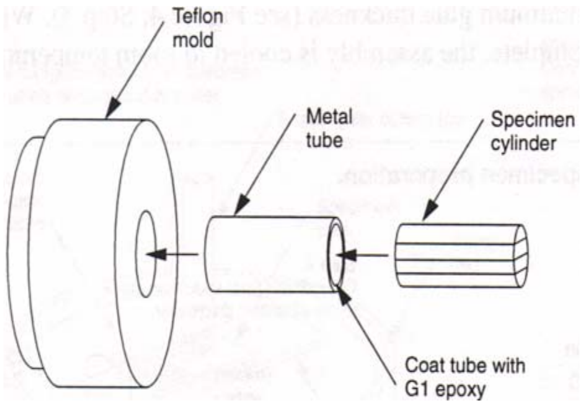
ภาพประกอบที่ 3.3 แสดงการกดชั้นตัวอย่าง

ง. ตัดตัวอย่างเป็นรูปทรงกระบอก โดยนำชิ้นตัวอย่างที่ได้ในขั้นตอน ค มายึดกับแท่นวางด้วยกาว ดังภาพประกอบที่ 3.4 แล้วตัดตัวอย่างด้วยเครื่องตัดอัลตราโซนิค ด้วยหัวตัดวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.3 มิลลิเมตร



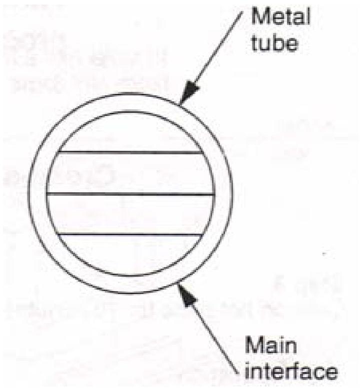
ภาพประกอบที่ 3.4 แสดงการวางตัวอย่างเพื่อตัดตัวอย่างเป็นรูปทรงกระบอก

จ. ป้องกันตัวอย่างชั้นทรงกระบอก โดยนำชิ้นตัวอย่างรูปทรงกระบอก ใส่ในท่อโลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ที่ทาจีวันอีพอกซีไว้ภายใน ดังภาพประกอบที่ 3.5 แล้วให้ความร้อนบนเตาให้ความร้อนอุณหภูมิ 130 ^{o}C นาน 10 นาที ท่อโลหะจะช่วยให้โครงสร้างภาคตัดขวางไม่แตกในระหว่างกระบวนการขัดตัวอย่างและวางตัวอย่างในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน



ภาพประกอบที่ 3.5 แสดงการป้องกันตัวอย่างด้วยท่อโลหะ

ฉ. นำท่อโลหะที่บรรจุตัวอย่างในขั้นตอน จ ไปตัดให้เป็นแผ่นบาง ขนาด 250 – 400 ไมโครเมตรด้วยเครื่องตัดแบบเพชร จะได้ตัวอย่างดังภาพประกอบ 3.6



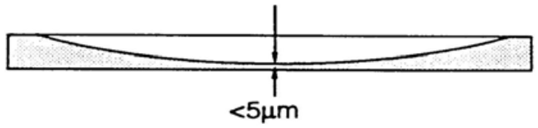
ภาพประกอบที่ 3.6 แสดงภาพตัวอย่างที่ตัดเป็นแผ่นบางขนาด 250 – 400 ไมโครเมตร

3.1.2.2 ขัดตัวอย่างให้บางลงด้วยวิธีต่อไปนี้

ก. นำตัวอย่างที่ตัดเป็นแผ่นบางแล้ว มาขัดด้วยอุปกรณ์ขัด ด้วยการนำตัวอย่างมาติดกาวบนแท่งขัดโลหะทรงกระบอกขนาดเล็ก แล้วขัดผิวด้านบนทั้งสองด้านให้เรียบขึ้นโดยใช้กระดาษทรายเบอร์ 2500 หลังจากนี้จึงขัดด้วยแท่นขัดที่ติดแผ่นขัดที่มีความละเอียดระดับ 40, 15 และ 5 ไมครอน ตามลำดับ นำตัวอย่างที่ติดบนแท่งขัดวางลงในช่องของจานขัดที่ช่วยให้ระนาบการขัดของตัวอย่างตรง และสามารถปรับความหนาของตัวอย่างที่ขัดได้ จนได้ตัวอย่างหนาประมาณ 70-100 ไมโครเมตร

ข. ขัดตัวอย่างให้เป็นหลุมบางโดยเครื่องขัดเว้า โดยการนำตัวอย่างที่ขัดได้ในขั้นตอน ก. ติดบนแท่งแก้วโปร่งแสง แล้วนำไปวางตรงฐานวางตัวอย่างที่มีล้อหมุนเป็นล้อขัดโลหะหรือล้อขัดหยาบอยู่ด้านบน โดยให้ตำแหน่งของตัวอย่างที่ต้องการศึกษาอยู่ตรงกลางของล้อหมุน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ที่ติดอยู่กับเครื่องส่องดูแล้วตั้งความหนาของตัวอย่างที่ต้องการขัด ในการขัดหน้าแรกจะต้องขัดตัวอย่างออกไปครึ่งหนึ่งซึ่งการขัดจะมี 2 ขั้นตอนคือการขัดด้วยล้อหมุนโลหะและใช้ผงขัดเพชรผสมน้ำซึ่งสามารถขัดเอาความหนาของชิ้นงานออกไปได้มาก และการขัดด้วยล้อหมุนสักหลาดหรือล้อขัดละเอียดและใช้สารขัดอะลูมินาผสมน้ำ เพื่อให้ชิ้นงานเกิดความแวววาวและสะอาด ในการขัดหน้าแรกของตัวอย่างจะต้องขัดตัวอย่างด้วยล้อขัดหยาบให้ได้ความหนาประมาณเกือบครึ่งหนึ่งของตัวอย่างทั้งหมด โดยใช้อัตราการขัดจากเร็วไปช้าเนื่องจากการขัดช้าจะไม่ทำให้เกิดแรงบนตัวอย่างมากเกินไป และทำให้ผิวของตัวอย่างละเอียด ตามด้วยการขัดด้วยล้อขัดละเอียด

ประมาณ 20 นาที แล้วจึงเปลี่ยนด้านของตัวอย่างเป็นด้านที่สอง ซึ่งด้านนี้ต้องใช้ความระมัดระวังในการขัดอย่างมาก เนื่องจากถ้าขัดเร็วเกินไปจะทำให้ตัวอย่างทะลุ ขณะขัดจะต้องสังเกตตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อยู่เสมอ เมื่อตัวอย่างเริ่มเป็นแอ่งและส่องแสงจากกล้องจุลทรรศน์จากด้านล่างของตัวอย่างแล้วเห็นแสงสีแดง ๆ เนื่องจากตัวอย่างบางมากแล้วก็ให้เปลี่ยนล้อหมุนเป็นล้อขัดละเอียด และใช้ความเร็วจากมากไปน้อยเช่นเดิม ตัวอย่างที่ขัดเสร็จแล้วจะมีจุดศูนย์กลางที่มีความบาง < 5 ไมโครเมตร ลักษณะดังภาพประกอบที่ 3.7



ภาพประกอบที่ 3.7 ลักษณะตัวอย่างที่บางน้อยกว่า 5 ไมโครเมตร หลังการขัดด้วยเครื่องขัดว้าว

ค. ทำตัวอย่างให้บางลงจนอิเล็กตรอนสามารถผ่านได้ โดยการยิงด้วยลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง ด้วยเครื่อง PIPs อิเล็กตรอนจะถูกบังคับให้ยิงไปบนผิวหน้าของตัวอย่างเพื่อกัดเซาะตัวอย่าง ในการยิงจะต้องปรับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้เร่งอิเล็กตรอน และมุมที่ใช้ยิงอิเล็กตรอนให้ตกกระทบตัวอย่างให้เหมาะสมด้วย โดยการเริ่มยิงอิเล็กตรอนด้วยค่าแรงดันและมุมในการยิงจากมาก และค่อยลดลงเรื่อย ๆ จนสังเกตเห็นว่าตัวอย่างทะลุเล็กน้อยแล้วจึงหยุดการยิงอิเล็กตรอน เนื่องจากจะทำให้ได้บริเวณตัวอย่างที่บางมากในตอนสุดท้าย คือมีความหนาประมาณ 500 นาโนเมตร ที่ลำอิเล็กตรอนของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่านสามารถผ่านได้ ค่าเริ่มต้นของแรงดันและมุมที่ใช้ยิงไอออนขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอย่างซึ่งมีความแข็งแรงไม่เท่ากัน สำหรับตัวอย่างพวกซิลิกอน มักใช้มุมเริ่มต้นประมาณ 6-7 องศา แรงดันไฟฟ้า 5 กิโลโวลต์ ซึ่งให้ค่ากระแสไอออนประมาณ 35 - 40 ไมโครแอมแปร์ และมุมสุดท้ายประมาณ 2-3 องศา แรงดันไฟฟ้า 2.5 กิโลโวลต์ และกระแสไอออนประมาณ 10 – 20 ไมโครแอมแปร์ ในการยิงอิเล็กตรอนแต่ละตัวอย่างไม่ควรใช้เวลามากกว่า 30 นาที เนื่องจากจะทำให้ตัวอย่างเกิดการเจือปน (contaminate)

3.1.2.3 ศึกษาตัวอย่างโดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่านที่ 200 kV ภาพที่ถ่ายมี 2 ลักษณะคือ ถ่ายภาพกำลังขยายต่ำ และภาพกำลังขยายสูง วิเคราะห์ภาพถ่ายโดยการสังเกตุลักษณะของภาพ วัดขนาดและความหนา ของชั้นตัวอย่างจากสเกลซึ่งบอกกำลังขยายของภาพ

3.2 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

ศึกษาสมบัติไฟฟ้าของไซมอกซ์ โดยการสร้างเป็นตัวเก็บประจุมอสแล้ววัดค่าความจุไฟฟ้า-แรงดัน แบ่งขั้นตอนนี้ออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการสร้างเป็นตัวเก็บประจุมอสและขั้นตอนการวัดค่าความจุไฟฟ้า-แรงดัน และการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ความจุไฟฟ้า-แรงดัน

3.2.1 สร้างตัวอย่าง ไซมอกซ์ เป็นตัวเก็บประจุมอส โดยขั้นตอนต่อไปนี้

3.2.1.1 ตัดตัวอย่างไซมอกซ์ทั้งหมดคือ ตัวอย่างที่ฝังออกซิเจนปริมาณ $3 – 7 \times 10^{17}$ ไอออนต่อตารางเซนติเมตร ทั้งที่ไม่มีและมีชั้นป้องกันผิว ตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ ขนาด 4×5 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องตัดอัลตราโซนิก เพื่อลดความเสียหายของตัวอย่าง

3.2.1.2 กัดชั้นซิลิกอนด้านบนออกด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยที่ที่สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10% ซึ่งมีอัตราการกัดซิลิกอน 53 นาโนเมตรต่อนาที และกัดซิลิกอนไดออกไซด์ 0.02033 นาโนเมตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30 ^{o}C (Seidel, 1990) คำนวณอัตราการกัดโดยใช้ความหนาของชั้นซิลิกอนด้านบนจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (ภาพประกอบ 4.7และ 4.8 ในบทที่ 4) จึงใช้เวลาการกัด ของช่วงอุณหภูมิ 30 ± 1^{o}C (เนื่องจากมีการแปรปรวนของอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลประมาณ 3^{o}C) ดังตาราง 3.1 ภายหลังการกัดที่สภาวะนี้สังเกตเห็นสีของผิวหน้าสารตัวอย่างไม่มีการเปลี่ยนแปลงและได้ทดสอบโดยการนำไปกัดด้วยกรดไฮโดรฟลูโอริก แสดงว่าการกัดที่อุณหภูมิ 30 ± 1^{o}C ภายในช่วงเวลาดังกล่าวไม่สามารถกัดชั้นซิลิกอนด้านบนได้หมด (ดังรายงานผลในบทที่ 4) จึงเพิ่มอุณภูมิการกัดเป็น 35 ± 1^{o}C และใช้เวลาดังตาราง 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงอุณหภูมิและเวลาในการกัดชั้นซิลิกอน

ตัวอย่าง (ปริมาณการฝังออกซิเจน: O^{+}/cm^{2})	เวลาที่ใช้ในการกัด (นาที)	
	30 ± 1^{o}C	35 ± 1^{o}C
3×10^{17}	3	9
3.5×10^{17}	2.5	8
4×10^{17}	2	6
7×10^{17}	1.5	4

3.2.1.3 ฉาบผิวหน้าของสารตัวอย่างที่กัดชั้นซิลิกอนด้านบนออกแล้วด้วยวิธีระเหิดในสุญญากาศด้วยอะลูมิเนียม รูปร่างและขนาดของการฉาบเป็นวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร

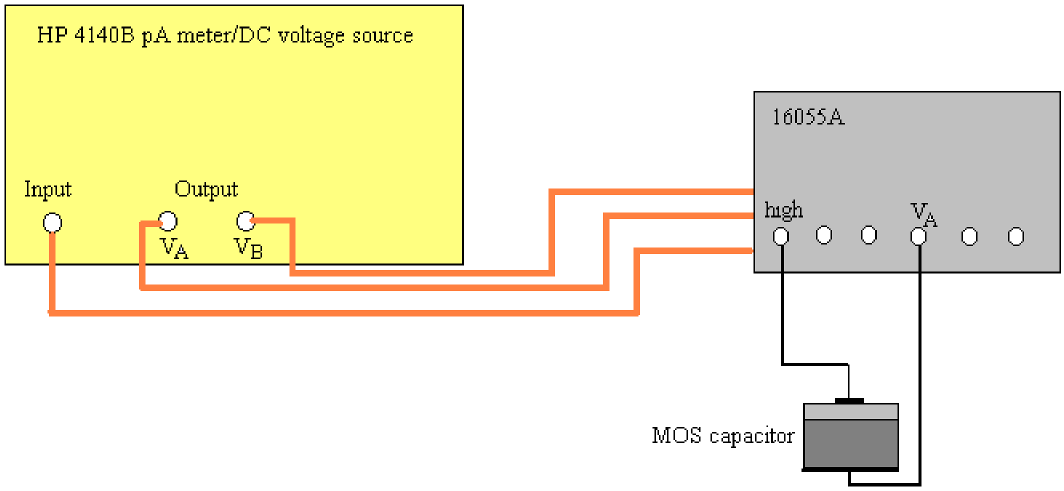
ภายใต้ความดัน 10^{-4} ปาสคาล กระแส 15 แอมแปร์ นาน 20 วินาที จุดที่ฉาบอะลูมิเนียมนี้จะเป็นขั้วโลหะสำหรับตัวเก็บประจุมอส

3.2.1.4 อบให้ความร้อนตัวอย่างทันทีหลังการฉาบในเตาเผา โดยวางตัวอย่างในท่อควอตซ์ และผ่านก๊าซในโตรเจน ที่อุณหภูมิ 450 $^{\circ}$C นาน 30 นาที

3.2.1.5 ทำผิวสัมผัสด้านล่างโดยติดตัวอย่าง เพื่อใช้เป็นขั้วในการวัดค่าความจุไฟฟ้า-แรงดัน ด้วยการยึดติดผิวหน้าของตัวอย่างกับฐานโลหะซึ่งเป็นอะลูมิเนียมด้วยกาวเงิน

3.2.2 วัดค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวอย่างไซมอกซ์ที่สร้างเป็นตัวเก็บประจุมอส ที่ความถี่ต่ำด้วยเครื่องวัด HP 4140B pA meter/DC voltage source

3.2.2.1 ต่อเครื่องวัด 4140B เข้ากับกล่องวัด 16055A เพื่อใช้กล่องวัดในการจับตัวอย่าง เลือกกดสวิทซ์ low lead connection ที่กล่องวัด แล้วนำตัวอย่างมาต่อกับขั้วของกล่องวัดขั้วด้านบนของตัวอย่างที่ฉาบอะลูมิเนียมนั้นใช้ลวดตัวนำที่มีปลายแหลมมาจิ้มลงบนขั้วของตัวอย่างโดยปลายลวดอีกด้านหนึ่งนั้นต่อกับขั้ว high ของเครื่อง ส่วนขั้วก้านล่างที่เป็นฐานอะลูมิเนียมนั้นจับได้โดยตรงกับขั้ว V_A ดังภาพประกอบที่ 3.8 เลือกช่วงแรงดันในการวัดและการเพิ่มขึ้นของค่าความจุไฟฟ้าที่เหมาะสม บันทึกค่าความจุไฟฟ้าและแรงดัน



ภาพประกอบที่ 3.8 แสดงรูปแบบการต่อเครื่องวัดกับตัวอย่างตัวเก็บประจุมอสเพื่อวัดค่าความจุไฟฟ้า-แรงดัน

3.2.2.2 เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า-แรงดัน

3.2.2.3 คำนวณค่า C_{ox} จากสมการ (2.18) โดยใช้ความหนาของชั้นออกไซด์จาก การวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน และ คำนวณค่า C_d จากสมการ (2.21) โดยที่ค่าความเข้มข้นของสารเจือ N_d หาได้จากข้อมูลสินค้าของบริษัท Ibis จากเวปไซด์ http://www.ibis.com/wafer.htm ซึ่งให้ค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนที่ใช้ทำไซมอกซ์ เท่ากับ 10-20 โอห์ม โดยเลือกใช้ค่าต่ำสุด แล้วหาค่าความเข้มข้นสารเจือจากภาพประกอบที่ 2.16 คำนวณค่าความจุไฟฟ้าที่แรงดันแถบราบ C_{FB} จากสมาร (2.19)

3.2.2.4 นำค่าความจุไฟฟ้าแถบราบมาหาค่าแรงดันไฟฟ้าแถบราบ V_{FB} จากราฟความจุไฟฟ้า-แรงดัน

3.2.2.5 คำนวณค่าความหนาแน่นประจุไฟฟ้าที่รอยต่อผิว Q_{ox} ของ ไซมอกซ์ จากสมการ (2.26) หาค่าความแตกต่างฟังก์ชันงานของอะลูมิเนียมและซิลิกอน Φ_{ms} จากภาพประกอบที่ 2.18 โดยใช้ค่า N_d จากข้อ 3.2.2.3