

บทที่ 3

เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และการวัด

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติฟิล์มโพลีซิลิคอนและอมอร์ฟัส

3.1.1 จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)[17]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดหรือ SEM (Scanning Electron Microscopy) เป็นเทคนิคที่มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางในหลายแขนงสาขาวิชาไม่ว่าจะเป็นงานด้านวัสดุศาสตร์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ธรณีวิทยา ชีววิทยา และการแพทย์

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของวัสดุ โดยอาศัยการกวาดของลำอิเล็กตรอนไปบนผิววัสดุแทนการใช้แสงธรรมดาซึ่งจะทำให้มีกำลังขยายสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ธรรมดา โดยสามารถขยายภาพได้มากกว่า 1,000 เท่า จนถึงระดับ 100,000 เท่าขึ้นไปและจุดเด่นที่สำคัญมีอยู่ 2 ประการคือ

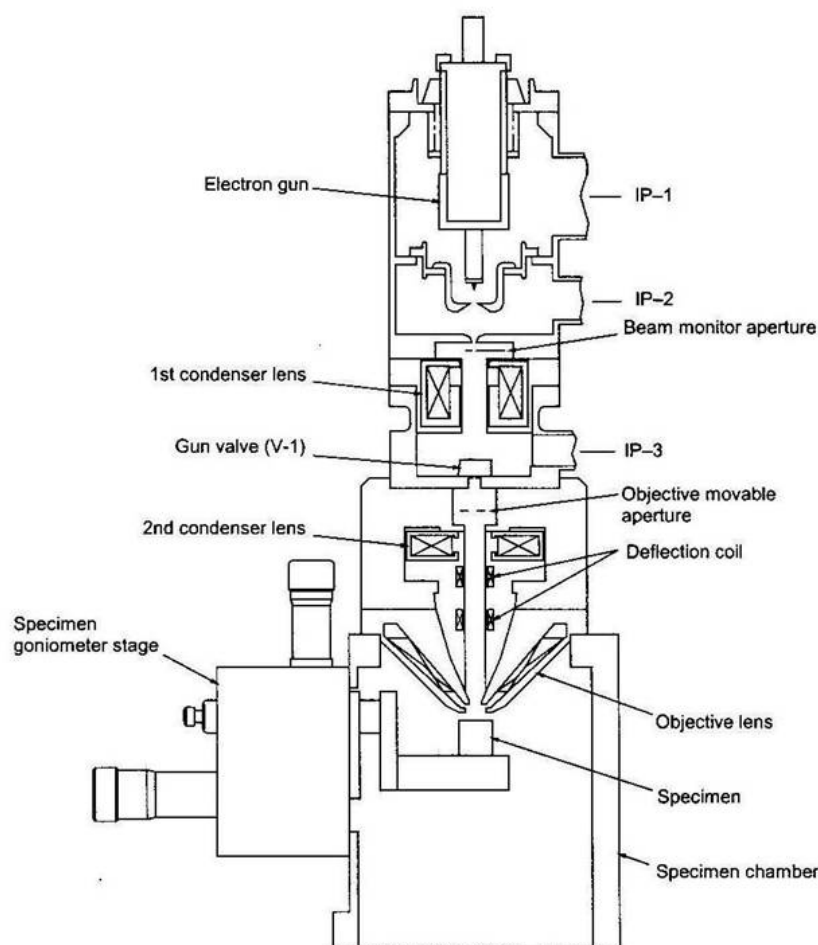
1. สามารถให้ภาพที่มีความคมชัดลึกสูง (high depth of field)
2. สามารถให้กำลังแยกแยะเชิงระยะสูง (high spatial resolution)

สำหรับโครงสร้าง พื้นฐานการทำงานของ SEM พิจารณาได้ดังรูปที่ 3.1

ในส่วนบนสุดจะเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนหรือปืนอิเล็กตรอน (electron gun) ซึ่งเป็นส่วนที่มีความสำคัญที่สุดของเครื่อง SEM โดยจะทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่สามารถผลิตกระแสจำนวนมาก โดยตัววัสดุจะต้องมีความเสถียรภาพและภาพตัดขวางของลำอิเล็กตรอนที่ส่งออกไปจะต้องเป็นจุดเล็กๆ ซึ่งปืนอิเล็กตรอนที่นิยมใช้ในปัจจุบันมี 4 ประเภทคือ

1. แบบขดลวดทั้งสเดน เป็นปืนอิเล็กตรอนที่นิยมใช้มากที่สุดเนื่องจากมีราคาถูกและไม่ต้องการสุญญากาศมากนัก
2. แบบผลึก LaB_6 (lanthanum hexaboride crystal) เป็นปืนอิเล็กตรอนที่ให้แสงสว่างสูงกว่าแบบขดลวดทั้งสเดนประมาณ 10 เท่า มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า และต้องการสภาพสุญญากาศ
3. แบบฟิลด์อิมิชชัน (cold field emission source) เป็นปืนอิเล็กตรอนที่ให้แสงสว่างสูงกว่าแบบทั้งสเดนและแบบผลึก LaB_6 นอกจากนี้ยังสามารถทำงานได้ในอุณหภูมิห้อง
4. แบบช็อตคีย์ฟิลด์อิมิชชัน (schottky filed emission source) เป็นปืนอิเล็กตรอนที่คล้ายกับ

แบบโคลด์ฟิวด์อิมิชชันแตกต่างกันตรงที่จะต้องทำงานที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,800 เคลวิน



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของเครื่อง SEM

อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนนี้จะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงตามคอลัมน์ด้วยความต่างศักย์ในช่วง 0.5- 30 กิโลโวลต์ โดยมีคอนเดนเซอร์เลนส์ตัวแรก (1st condenser lens) ซึ่งเป็นแม่เหล็กไฟฟ้าทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้ผ่านไปที่ช่องเปิดที่สามารถปรับขนาดต่างๆ กันได้ด้วย ออปเจ็คทีฟ มูฟเอเบิล แอปเพอร์เจอร์ (objective movable aperture) เพื่อควบคุมปริมาณของอิเล็กตรอน หลังจากนั้นคอนเดนเซอร์เลนส์ตัวที่สอง (2nd condenser lens) ทำหน้าที่บีบลำอิเล็กตรอนให้มีพื้นที่หน้าตัดเล็กลงและใช้เลนส์วัตถุ (objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์อันสุดท้ายทำการโฟกัสลำอิเล็กตรอนไปตกกระทบกับผิววัตถุ โดยมีดีเฟลคชันคอยล์ (deflection coil) ทำหน้าที่กวาดลำ

อิเล็กตรอนบนผิววัตถุในกรอบสี่เหลี่ยม เมื่อลำอิเล็กตรอนไปตกกระทบกับผิววัตถุจะเกิดอันตรกิริยาขึ้นภายในวัตถุ และจะให้สัญญาณต่างๆออกมาซึ่งจะถูกตรวจจับและนำไปแสดงผล

ในการวิจัยและพัฒนาได้ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมาใช้ในการสังเคราะห์โครงสร้างผิวหน้าของเนื้อฟิล์มโพลีซิลิคอน และ อมอร์ฟัสซิลิคอน โดยใช้ SEM รุ่น S-4700 จากบริษัทฮิตาชิ ใช้แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนชนิดแบบโคล์ด์ฟิวคัลอิมิชัน ซึ่งให้แสงสว่างสูงและกำลังสามารถแยกแยะระดับ 1.5 นาโนเมตร ที่ 15 กิโลโวลต์ นอกจากนี้ยังมีกำลังขยายสูงสุดถึง 500,000 เท่า แสดงดังในรูป ที่ 3.2

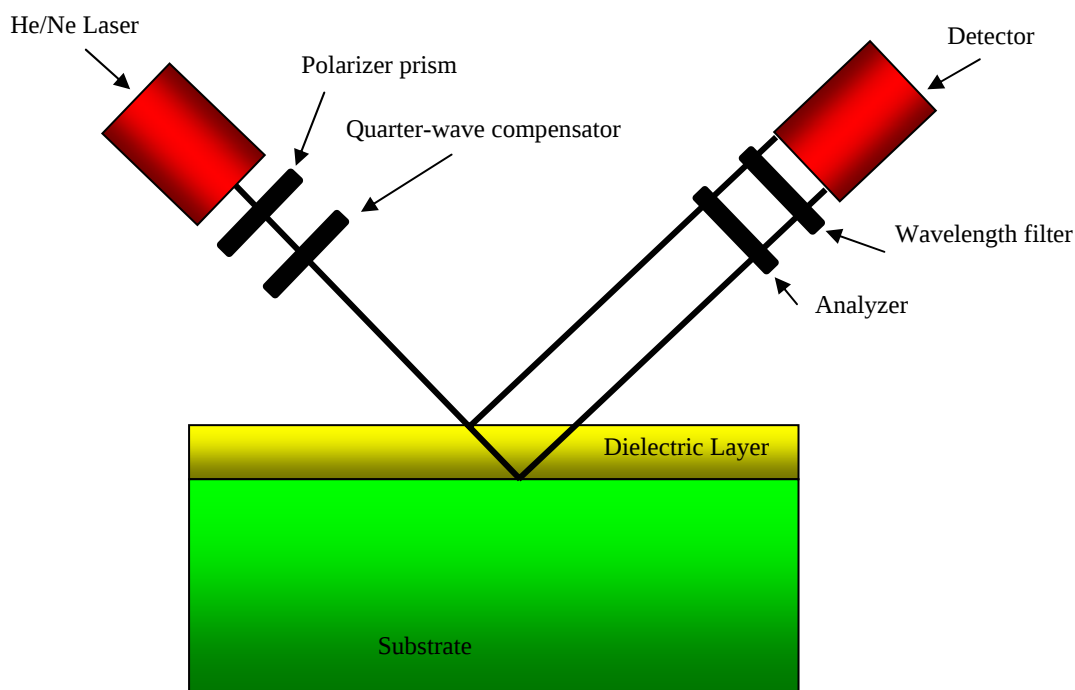


รูปที่ 3.2 เครื่อง SEM รุ่น S-4700

3.1.2 เครื่องวัดความหนา อีลิปโซมิเตอร์[18]

เครื่องอีลิปโซมิเตอร์ (Ellipsometer) มีความสามารถในการวัด และวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุชนิดฟิล์มบางหรือฟิล์มโปร่งแสง เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (k), ค่าดัชนีหักเหแสง (n), และความหนาของชั้นฟิล์ม (T) เป็นต้น โดยไม่ทำลายพื้นผิวของวัสดุที่กำลังทำการวัด อีกทั้งมีความแม่นยำในการวัดสูง หลักการทำงานของเครื่องอีลิปโซมิเตอร์ เป็นการวิเคราะห์ผลของการสะท้อน และหลักการโพลาไรเซชันของแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบผิวของวัสดุ

การทำงานของอีลิปโซมิเตอร์แสดงดังรูปที่ 3.3 คือ เครื่องอีลิปโซมิเตอร์นี้จะใช้แหล่งจ่ายแสงเลเซอร์กำลังต่ำ เป็นเลเซอร์ชนิดฮีเลียม-นีออนที่มีความยาวคลื่นเท่ากับ 632.8 nm (แสงสีแดง) แสงเลเซอร์นี้จะอยู่ในแนวเส้นทางตามแกนทางแสง (optical axis) และลำแสงจะผ่านปริซึมโพลาไรเซอร์ (polarizer prism) ในการผ่านปริซึมนี้ลำแสงโพลาไรซ์จะถูกเปลี่ยนจากวงกลมเป็นเชิงเส้น (linearly – polarized light)



รูปที่ 3.3 การทำงานของ อีลิปโซมิเตอร์

ลำแสงที่มีความเข้มคงที่ และเป็นเชิงเส้นจะถูกเปลี่ยนกลับเป็นวงกลมโพลาไรซ์ เมื่อควอเตอร์-เวฟ คอมเพนเซเตอร์ (quarter-wave compensator) ถูกแทรกเข้าไปในแนวเส้นทางเดินของแสง (หรือยังคงเป็นเส้นตรง เมื่อคอมเพนเซเตอร์ถูกดึงออกจากแนวเส้นทางเดินของแสง) การแทรกเข้าไป หรือการดึงออกไปของ $+90^\circ$ คอมเพนเซเตอร์จะเป็นโดยอัตโนมัติภายใต้การควบคุมด้วยโปรแกรมของคอมพิวเตอร์ แล้วแสงที่ได้ (ด้วยการแทรกเข้าไป หรือดึงออกมาของ $+90^\circ$ คอมเพนเซเตอร์ในแนวทางการเดินของแสง) จะถูกฉายลงบนผิวของแผ่นชิ้นงาน

แสงสะท้อน (ด้วยการโพลาไรซ์จากคุณสมบัติทางแสงของชิ้นงาน) จะผ่านไปยังอานาไลเซอร์ (analyzer) ที่หมุนอยู่แล้วจะถูกตรวจวัดด้วยตัวตรวจจับทางแสง (detector) ซึ่งเปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็นกระแสไฟฟ้า และแปรโดยตรงกับความเข้ม (intensity) ของแสงสะท้อนผ่านอานาไลเซอร์ ตัวกรอง (wavelength filter) จะป้องกันแสงอื่นๆ ที่อาจจะเกิดการแทรกสอดทางแสงขึ้นระหว่างอานาไลเซอร์ และตัวตรวจจับแสง (ยกเว้นแสงเลเซอร์) ดังนั้นจึงสามารถกำจัดผลกระทบของแสงภายนอกได้เป็นอย่างดี

ในการวิจัยและพัฒนานี้ได้ใช้เครื่องอิตลิปโซมิเตอร์ รุ่น Rudolph FEIII มีความสามารถในการวัด มีแหล่งจ่ายแสงเลเซอร์ 2 ชนิด คือ ฮีเลียม-นีออนเลเซอร์ มีความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร และไดโอดเลเซอร์มีความยาวคลื่น 780 นาโนเมตร และวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆของวัสดุแบบฟิล์มบางหรือฟิล์ม โปร่งแสง เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (k), ค่าดัชนีหักเหแสง (n), และความหนาของชั้นฟิล์ม (T) เป็นต้น รายละเอียดดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่องอิตลิปโซมิเตอร์ รุ่น Rudolph FEIII

3.2 เครื่องมือวัดคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของโพลีรีซิสเตอร์

3.2.1 เครื่องโพรบอยท์โพรบ [19]

โดยทั่วไปการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity: ρ) ของแท่งสารกึ่งตัวนำหรือตัวนำไฟฟ้า สามารถทำได้โดยง่ายกรณีที่สามารถเตรียมให้แท่งสารนั้น มีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมที่หน้าตัด A มีขนาดยาว L และที่สำคัญก็คือ ต้องทำขั้วไฟฟ้า (metal contact) ที่ปลายทั้งสองด้านของแท่งสารให้สมบูรณ์เป็นรอยสัมผัสโอห์มิก (Ohmic contact) ได้ เพื่อให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลโดยตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของแท่งสาร ซึ่งในกรณีนี้เมื่อให้ความต่างศักย์แก่แท่งสารนี้ V โวลต์ และวัดกระแสที่ไหลผ่านแท่งสารกึ่งตัวนำ I จะได้ว่า

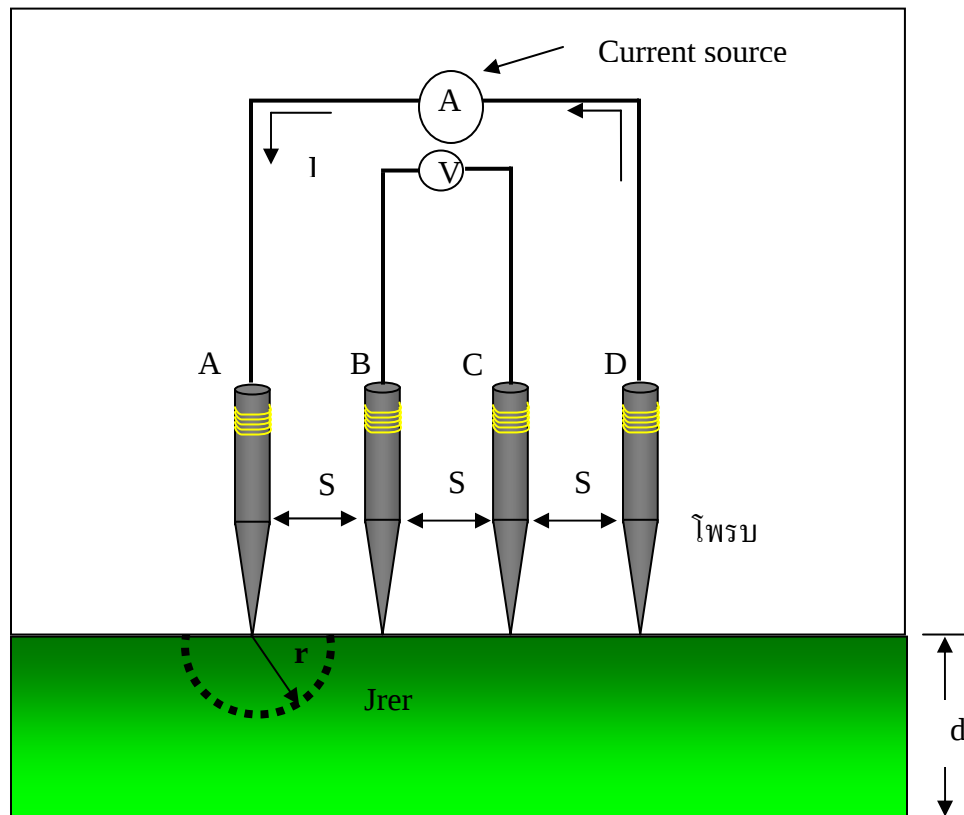
$$J = \sigma \mathcal{E} \quad (3.1)$$

$$\frac{I}{A} = \frac{1}{\rho} \frac{V}{L} \quad (3.2)$$

$$\text{ดังนั้นสภาพต้านทานไฟฟ้า} \quad \rho = \frac{AV}{IL} \quad (3.3)$$

ซึ่งเมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงไปในสมการที่ (3.3) เราสามารถคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารได้ อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปแล้วในทางปฏิบัติเราไม่สามารถแยกสารกึ่งตัวนำออกมาจากแผ่นผลึกและทำให้อยู่ในรูปสี่เหลี่ยมได้ เพราะจะทำให้แผ่นผลึกเสียหายได้และการทำจุดสัมผัสโอห์มิกที่ปลายของแท่งผลึกให้สม่ำเสมอก็ทำได้ยาก และเมื่อทำรอยสัมผัสแล้วสารกึ่งตัวนำก็ไม่สามารถนำกลับมาใช้งานได้อีก รวมทั้งการกำหนดขนาดความยาวหรือพื้นที่หน้าตัดให้แน่นอนก็ทำได้ยาก ดังนั้นการวัดด้วยวิธีนี้จึงเป็นปัญหาและไม่นิยมกัน วิธีที่ได้รับความนิยมสูงคือ วิธีโพรบอยท์โพรบ หรือ เข็ม 4 จุด ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยาก ทำได้ง่ายและสะดวก สามารถวัดได้ทุกขนาดของแท่งสารไม่ว่าจะมีรูปร่างอย่างไร โดยเฉพาะอย่างยิ่งนั้นยังเป็นวิธีการที่ไม่จำเป็นต้องทำรอยสัมผัสโอห์มิก จึงไม่สิ้นเปลืองเวลาและวัสดุด้วย

อุปกรณ์ที่ใช้ในวิธีโพรบอยท์โพรบประกอบด้วย เข็มโลหะจำนวน 4 เข็ม มีปลายแหลมและอาจมีสปริงช่วยทำให้ปลายของเข็มถูกกดและสามารถสัมผัสกับระนาบผิวหน้าด้านที่ขจัดมันของชิ้นสารกึ่งตัวนำได้เป็นอย่างดี เข็มทั้ง 4 คือ เข็ม A, B, C และเข็ม D อยู่ห่างกันเป็นระยะ S เท่ากัน ซึ่งในทางปฏิบัติทั่วไปจะมีค่าราว 0.5-1 มม. ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และอยู่ในระนาบเดียวกันในการวัดจะเริ่มปล่อยกระแสจากที่เข็มด้านนอกสุด คือเข็ม A และ D ทำให้มีกระแสไหลจากขั้ว A ผ่านเนื้อสารไปยังเข็ม D จึงเกิดมีแรงดันตกคร่อมเนื้อสารและถูกวัดออกมาที่ขั้ว B และ C นำค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ I และแรงดัน V ที่วัดได้มาคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีโพร์พอยท์โพรบ

ในการวิเคราะห์ทำได้โดยพิจารณาว่า ขนาดของขั้วสารกึ่งตัวนำมีขนาดใหญ่และมีความหนา (d) มากกว่าระยะห่างระหว่างเข็ม (s) หรือ $d \gg s$ กระแสจากขั้ว A จึงสามารถผ่านออกไปที่ขั้ว D ได้ ความหนาแน่นของกระแสขั้ว A จะกระจายออกไปยังเนื้อสารกึ่งตัวนำ ซึ่งความหนาแน่นของกระแส (J_r) รัศมี r ใดๆ ที่กระจายออกไป จากจุด A คือ

$$J_r = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (3.4)$$

โดย $2\pi r^2$ คือ ครึ่งหนึ่งของพื้นที่ผิวของทรงกลมที่มีรัศมี r จากกฎของโอห์ม สนามไฟฟ้าที่ ε_r ที่จุด r คือ

$$\varepsilon_r = \frac{J}{\sigma} = \frac{I}{2\pi r^2 \sigma} \quad (3.5)$$

โดย σ คือ สภาพนำไฟฟ้า (conductivity) ของแท่งสารนี้
และจากนิยามที่ว่า ศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่งใดๆ ในรัศมี a คือ

$$V_a = -\int_{-\infty}^a \mathcal{E}_r dr = -\frac{I}{2\pi\sigma} \int_{-\infty}^a \frac{1}{r^2} dr = \frac{I}{2\pi\sigma a} \quad (3.6)$$

ดังนั้น เมื่อมีกระแสไหลจากขั้ว A ผ่านเนื้อสารถึงตัวนำ ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้ว B และ ขั้ว C ที่เกิดเนื่องจากกระแส I ไหลผ่านคือ

$$V_{B-C} = \frac{I}{2\pi\sigma s} - \frac{I}{2\pi\sigma 2s} = \frac{I}{4\pi\sigma s} \quad (3.7)$$

และเมื่อพิจารณาว่ามีกระแสไหลออกที่ปลายเข็ม D โดยผ่านเนื้อสารถึงตัวนำและทำให้เกิดมีความแตกต่างของศักย์ที่ขั้ว B และ C อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งเหมือนกับการพิจารณาครั้งแรก ดังนั้นความต่างศักย์ไฟฟ้ารวมระหว่างขั้ว B และขั้ว C จะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า นั่นคือ

$$V_{B-C.Total} = 2\left(\frac{I}{4\pi\sigma s}\right) = \frac{I}{2\pi\sigma s} \quad (3.8)$$

ดังนั้น

$$\sigma = \frac{1}{2\pi s} \frac{I}{V_{B-C.Total}} = \frac{1}{2\pi s} \frac{I}{V} \quad (3.9)$$

ดังนั้น สภาพความต้านทานไฟฟ้า

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = 2\pi s \frac{V}{I} \quad (3.10)$$

แต่อย่างไรก็ตามในการวัดชิ้นงานที่มีขนาดความหนา d บางๆ ค่าที่วัดได้จะผิดพลาดจากความ เป็นจริง ซึ่งจะได้ว่า

$$\rho_{corrected} = \rho_{measured} \cdot F \quad (3.11)$$

โดย $\rho_{corrected}$ คือ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ถูกต้อง

$\rho_{measured}$ คือ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้ตามสมการที่ (3.11)

และ F คือ แฟกเตอร์ความถูกต้อง (correction factor)

สำหรับค่าแฟกเตอร์ความถูกต้อง F จะขึ้นอยู่กับขนาด ความหนา และรูปร่างของชิ้นสารที่ทำ การวัด โดยเฉพาะอัตราส่วนของค่า d/s

ในกรณีของการวัดชั้นสารที่มีความหนาน้อยมากๆ ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยหาได้จากสมการที่(3.12)

$$\bar{\rho} = \frac{\pi}{\ln 2} \left(\frac{V}{I} \right) x_j = 4.532 \left(\frac{V}{I} \right) x_j \quad (3.12)$$

โดย x_j คือความหนาของชั้นงานที่ทำการวัด

นอกจากนี้เรายังหาค่าความต้านทานเชิงแผ่น (sheet resistance: R_s) ซึ่งมีหน่วยเป็น $\Omega/\square$ ได้ดังสมการ

$$R_s = \frac{\bar{\rho}}{x_j} \quad (3.13)$$

ในงานวิจัยนี้เราใช้เครื่องโพรมิเท็กซ์โพรบสำหรับวัดความต้านทานเชิงแผ่นของเนื้อฟิล์มโพลีซิลิคอน และ อมอร์ฟัสซิลิคอน โดยใช้เครื่องรุ่น Prometrix Rs-30 จากบริษัทเทนคอร์ (Tencor) ที่ความสามารถวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่น $5 \text{ m}\Omega/\square$ - $5 \text{ M}\Omega/\square$ ที่แผ่นเวเฟอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว-8 นิ้ว โดยมีลักษณะดังรูปที่ 3.6

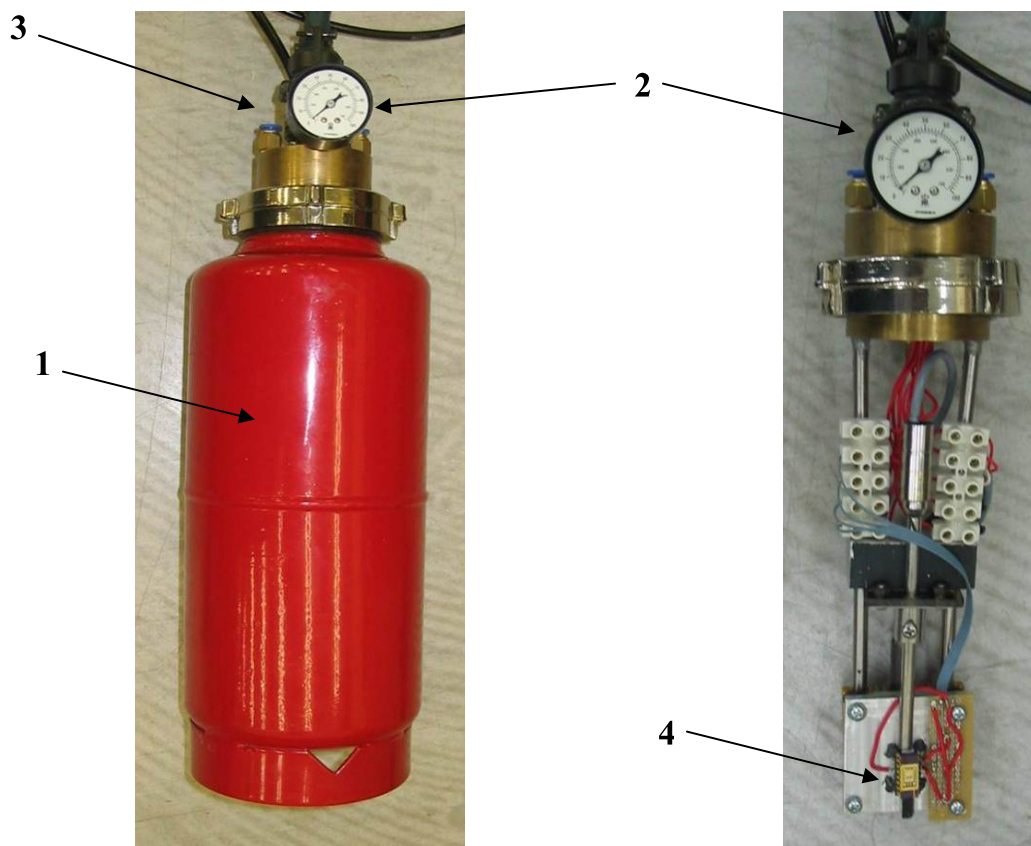


รูปที่ 3.6 เครื่องโพรมิเท็กซ์โพรบรุ่น Prometrix Rs-30

3.2.2 ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการวัดและทดสอบความดัน

ชุดเครื่องมือที่ใช้วัดความดันในงานวิจัยนี้ได้ทำการประกอบสร้างขึ้นเองซึ่งมีส่วนประกอบด้วยดังนี้

1. ถังอัดความดัน
2. เกจสำหรับวัดความดัน
3. ท่อจ่ายแรงดันไปยังถังอัดความดัน
4. อุปกรณ์ยึดจับและจับสัญญาณเซ็นเซอร์วัดความดัน



รูปที่ 3.7 ส่วนประกอบของอุปกรณ์วัดแรงดัน