

# SCPY394 Advanced Physics Laboratory II

## Four-Point-Probe Resistivity Measurement

### วัตถุประสงค์

- เพื่อศึกษาเทคนิคการวัดสภาพต้านทานของแผ่นตัวนำโดยใช้วิธี Collinear Four-Point Probe
- เพื่อศึกษาเทคนิคการวัดสภาพต้านทานของแผ่นตัวนำโดยใช้วิธี van de Pauw

### ทฤษฎีและหลักการที่จำเป็น

#### ความต้านทานแผ่น (Sheet Resistance)

เมื่อมีกระแสไฟฟ้า  $I$  ไหลผ่านแท่งตัวนำยาว  $L$  พื้นที่หน้าตัด  $A$  ความต่างศักย์  $\Delta V$  ระหว่างปลายทั้งสองแท่งตัวนำจะเป็นไปตามกฎของโอห์ม

$$\Delta V = IR \quad (1)$$

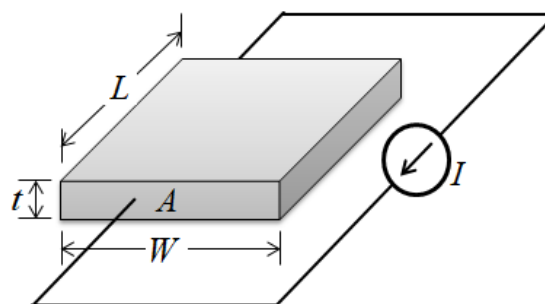
เมื่อ  $R$  คือความต้านทานของแท่งตัวนำ โดยที่

$$R = \frac{\rho L}{A} = \frac{\rho L}{tW} = \left( \frac{\rho}{t} \right) \frac{L}{W} = R_s \frac{L}{W} \quad (2)$$

สำหรับแท่งตัวนำที่กว้าง  $W$  และหนา  $t$  ปริมาณ  $\rho$  เรียกว่า สภาพต้านทานไฟฟ้า (electrical resistivity) ซึ่งเป็นปริมาณที่ขึ้นกับชนิดแต่ไม่ขึ้นกับรูปทรงของวัสดุ ปริมาณ  $R_s$  ซึ่งนิยามโดย

$$R_s = \frac{\rho}{t} \quad (3)$$

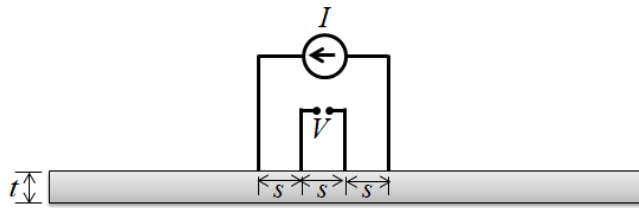
เรียกว่า **ความต้านทานแผ่น (sheet resistance)** เป็นปริมาณที่มีมิติเดียวกับความต้านทาน จึงมีหน่วยเป็นโอห์ม ( $\Omega$ ) เช่นเดียวกับความต้านทาน แต่เพื่อให้สับสนระหว่างปริมาณทั้งสอง จึงมักเรียกหน่วยของ  $R_s$  ว่า Ohms per square ( $\Omega/\text{sq}$  หรือ  $\Omega/\square$ )



รูป 1 การนำไฟฟ้าในแท่งตัวนำ

## การวัดสภาพต้านทานของแผ่นตัวนำโดยใช้วิธี Collinear Four-Point Probe

การวัดคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุแสดงในรูป 1 นั้นต้องมีการตัดชิ้นตัวอย่างให้เป็นแท่งที่มีพื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอ ต้องอาศัยอุปกรณ์และกระบวนการเตรียมชิ้นงานเพิ่มเติม การวัดโดยใช้ขั้วไฟฟ้า (probe) จำนวน 4 ขั้ววางไว้บนวัสดุตัวอย่างและทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านวัสดุตัวอย่างโดยใช้ขั้ว 2 ขั้วและวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วอีก 2 ขั้ว จึงเป็นวิธีที่สามารถทำได้โดยไม่ต้องอาศัยกระบวนการเตรียมชิ้นงานเพิ่มเติม โดยที่การวัดโดยใช้ขั้ว 4 ขั้วดังกล่าว แทนที่จะใช้ขั้วเพียง 2 ขั้วทั้งจ่ายกระแสไฟฟ้าและวัดความต่างศักย์นั้น มีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดผลของความต้านทานในสายไฟและความต้านทานที่รอยสัมผัส (contact resistance) ทำให้ความต้านทานที่วัดได้คือความต้านทานของวัสดุตัวอย่างที่ต้องการเท่านั้น [1]



รูป 2 การวัดการนำไฟฟ้าแบบ collinear four-point probe

สำหรับกรณีที่ขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ขั้วอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน (collinear four-point probe) โดยที่ระยะห่างระหว่างขั้วสม่ำเสมอ  $s$  เราสามารถคำนวณโดยใช้ทฤษฎีทางไฟฟ้าได้ว่า [2]

$$\rho = 2\pi s \frac{V}{I} \quad \text{for } t \gg s \quad (4)$$

$$\rho = \left( \frac{\pi t}{\ln 2} \right) \frac{V}{I} \quad \text{for } t \ll s \quad (5)$$

นั่นคือในกรณีของฟิล์มบาง

$$R_s = \frac{\rho}{t} = \left( \frac{\pi}{\ln 2} \right) \frac{V}{I} \quad (6)$$

## การวัดสภาพต้านทานของฟิล์มบางโดยใช้วิธี van de Pauw

วิธีนี้ใช้สำหรับวัดสภาพต้านทานของแผ่นฟิล์มบางซึ่งชิ้นงานมีรูปร่างใดๆ [3] การวัดจะประกอบไปด้วยการวัดย่อยทั้งหมด 8 รูปแบบดังแสดงใน รูป 3 และนำผลที่ได้มาคำนวณหาสภาพต้านทานโดยเฉลี่ยของแผ่นฟิล์มดังวิธีการต่อไปนี้

$$\rho_A = \frac{\pi}{\ln 2} f_A t \frac{(V_1 - V_2 + V_3 - V_4)}{4I} \quad (7)$$

$$\rho_B = \frac{\pi}{\ln 2} f_B t \frac{(V_5 - V_6 + V_7 - V_8)}{4I} \quad (8)$$

$$\rho_{av} = \frac{\rho_A + \rho_B}{2} \quad (9)$$

โดยที่  $f_A$  และ  $f_B$  เป็นค่าที่ขึ้นกับรูปร่างทางเรขาคณิตของชิ้นงาน แต่สามารถหาได้จาก

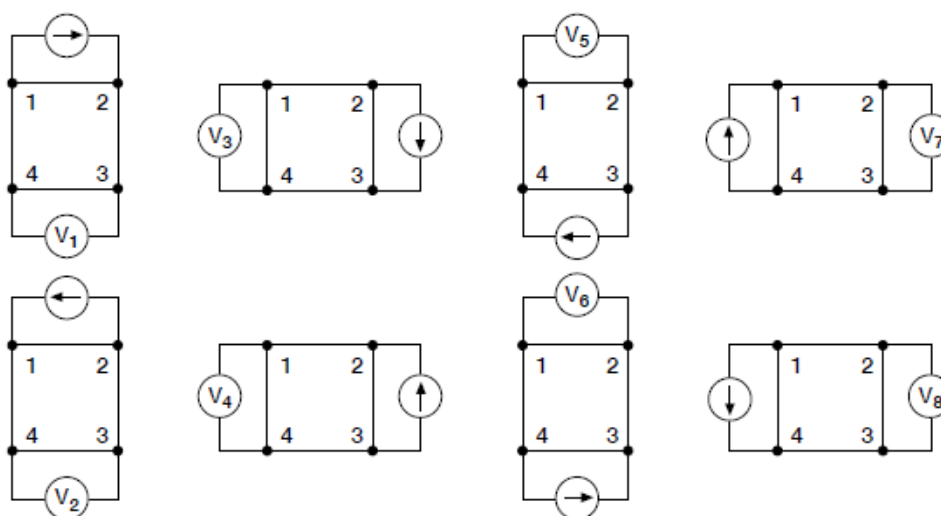
$$Q_A = \frac{V_1 - V_2}{V_3 - V_4} \quad (10)$$

$$Q_B = \frac{V_5 - V_6}{V_7 - V_8} \quad (11)$$

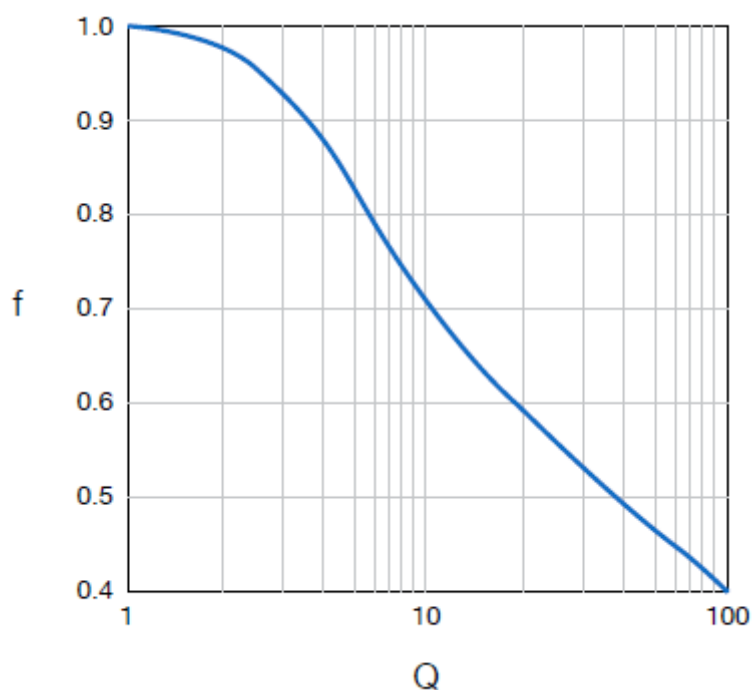
ดังนี้

$$\frac{Q-1}{Q+1} = \frac{f}{0.693} \cosh^{-1} \left( \frac{e^{0.693/f}}{2} \right) \quad (12)$$

ซึ่งความสัมพันธ์แสดงในรูป 4



รูป 3 การวัดสภาพต้านทานของแผ่นฟิล์มโดยวิธี van de Pauw



รูป 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $f$  กับ  $Q$

## การทดลอง

ให้นักศึกษาทำการทดลองเพื่อวัดสภาพต้านทานของแผ่นฟิล์มกราฟาไฟต์โดยใช้วิธี Collinear Four-Point Probe และ วิธี van de Pauw

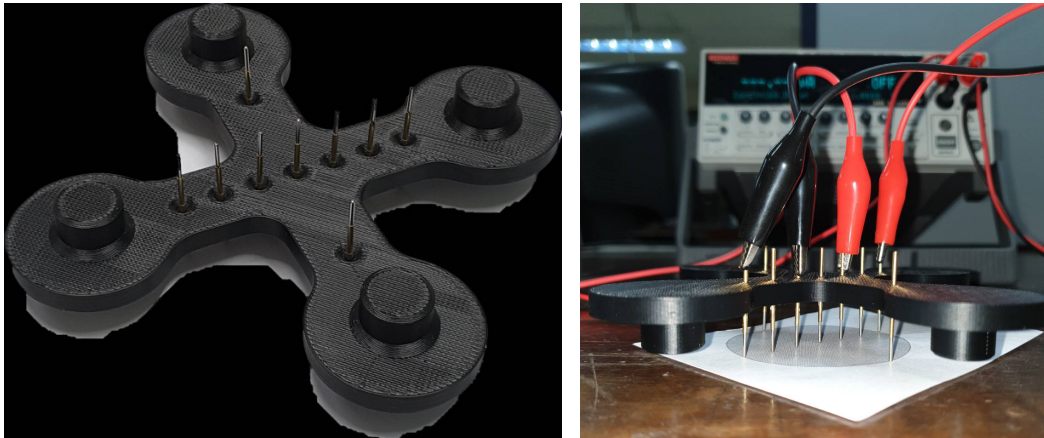
## อุปกรณ์

- |  |           |
|--|-----------|
| 1. แผ่นฟิล์มกราฟาไฟต์ (หนา 0.5 mm)<br>(แผ่นขนาดใหญ่, แผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส, แผ่นวงกลม) | 3 แผ่น    |
| 2. SourceMeter Keithley Model 2400   | 1 เครื่อง |
| 3. ชุดเข็มวัดปลายสปริง   | 1 ชุด     |
| 4. Multimeter  | 1 เครื่อง |

## ขั้นตอนการทดลอง

- ใช้ Multimeter ลองวัดค่าความต้านทานระหว่างจุดสองจุดบนแผ่นฟิล์มกราฟาไฟต์ เพื่อใช้วางแผนในการตั้งค่ากระแสที่ใช้ในการทดลองแต่ละทดลองให้เหมาะสม โดยมีข้อควรพิจารณาดังต่อไปนี้
  - ยิ่งจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านตัวอย่างมาก ยิ่งเกิดความร้อนในตัวอย่างมาก จะทำให้คุณสมบัติของตัวอย่างเปลี่ยนแปลงไป หรืออาจทำความเสียหายกับตัวอย่าง หรือกับการเชื่อมต่อสายไฟกับตัวอย่างได้
  - ถ้าจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านตัวอย่างน้อย ความต่างศักย์ที่วัดได้ก็จะมีค่าน้อย ทำให้ค่า signal-to-noise ratio มีค่าต่ำ ส่งผลต่อคุณภาพของข้อมูลที่วัดได้
  - กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เครื่อง SourceMeter Keithley Model 2400 สามารถจ่ายได้คือ 22 W (21 V @1.05 A หรือ 210 V @105 mA)
- ศึกษาวิธีการใช้งาน SourceMeter Keithley Model 2400 จากคำแนะนำการใช้งานเบื้องต้นท้ายเอกสารนี้ หรือ จากคู่มือการใช้ สำหรับการทดลองนี้ เราจะใช้ SourceMeter ในโหมด Source-Measure โดยทำการจ่ายกระแสและวัดความต่างศักย์ (Source = current, Measure = voltage) และทำการเชื่อมต่อแบบ 4-wire
- ออกแบบและทำการทดลองเพื่อวัดสภาพต้านทานของแผ่นฟิล์มกราฟาไฟต์ ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้อง แม่นยำที่สุด ด้วยวิธี Collinear Four-Point Probe โดยใช้แผ่นฟิล์มขนาดใหญ่ และ วิธี van de Pauw โดยใช้แผ่นฟิล์มสี่เหลี่ยมจัตุรัส, แผ่นฟิล์มวงกลม

4. ทำการทดลองด้วยวิธี Collinear Four-Point Probe โดยใช้แผ่นฟิล์มสี่เหลี่ยมจัตุรัส, แผ่นฟิล์มวงกลม และเปรียบเทียบค่าที่ได้กับการวัดด้วยวิธีนี้โดยใช้แผ่นฟิล์มขนาดใหญ่ พร้อมวิจารณ์ผลการเปรียบเทียบ

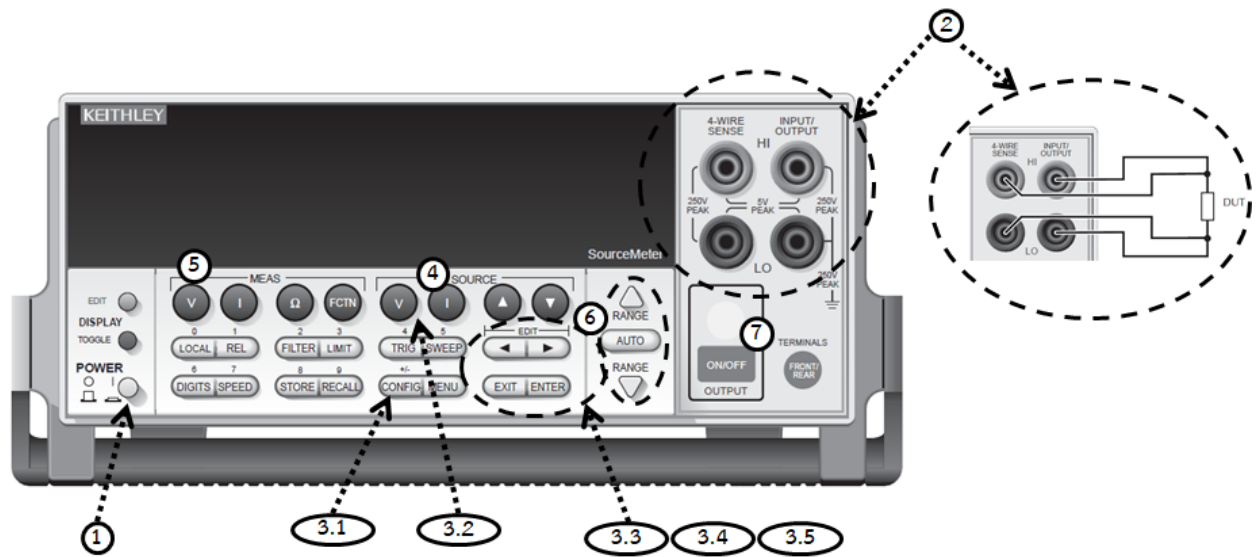


รูป 5 ชุดเข็มวัดปลายสปริง และการต่อวัดความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นบาง

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Keithley, *Low Level Measurements Handbook*, 7th ed. Tektronix, 2016.
- [2] D. J. Griffiths, *Introduction to Electrodynamics*, 4th ed. Pearson Education, 2013.
- [3] van der Pauw, L.J., "A method of measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape," *Philips Research Reports*, vol. 13, pp. 1–9, 1958.

## คำแนะนำการใช้งาน SourceMeter Keithley Model 2400 เบื้องต้น



รูป 6 SourceMeter Keithley Model 2400

1. ต่อสายจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากเต้าจ่ายไฟฟ้าเข้ากับเครื่อง เปิดสวิตช์
2. เชื่อมต่อสายไฟจาก SourceMeter เข้ากับตัวอย่างดังแผนภาพ
3. ทำการเลือกโหมดการเชื่อมต่อแบบ 4-wire โดย
  1. กดปุ่ม CONFIG      2. กดปุ่ม SOURCE V
  3. ใช้ลูกศรซ้ายขวาเลือก "SENSE MODE" แล้วกด ENTER
  4. ใช้ลูกศรซ้ายขวาเลือก "4-WIRE" แล้วกด ENTER      5. กด EXIT
4. เลือกจ่ายกระแส โดย กด SOURCE I
5. เลือกวัดความต่างศักย์ โดย กด MEAS V
6. ตั้งค่ากระแสที่ต้องการจ่าย โดยใช้ลูกศรซ้ายขวาได้ EDIT ร่วมกับการเปลี่ยนพิสัยโดยใช้ลูกศรบนล่างของ RANGE
7. ทำการจ่ายกระแสหรือหยุดจ่ายกระแส โดยกด ON/OFF OUTPUT
8. อ่านความต่างศักย์ที่วัดได้จากจอ