# บทที่ 3

# วิธีการวิจัย

การทำวิจัยการศึกษาผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับซิลิกอน ใช้วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีดำเนินการวิจัย โดยมีรายละเอียด ดังนี้

## วัสดุ

1. แว่นผลึกซิลิกอน (100) ชนิดเอ็น และชนิดพี เส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว ค่าสภาพความต้านทาน 0.1 Ω-cm.

2. โลหะบริสุทธิ์

2.1 อลูมิเนียมบริสุทธิ์ ร้อยละ 99.999 (ผลิตโดยบริษัท Goodfellow Cambridge จำกัด ประเทศอังกฤษ) ลักษณะเป็นเส้นลวดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 mm.

2.2 นิเกิลบริสุทธิ์ ร้อยละ 99.98 (ผลิตโดยบริษัท Balzers จำกัด ประเทศเยอรมัน) ลักษณะเป็นเส้นลวดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 mm.

2.3 สังกะสีบริสุทธิ์ ร้อยละ 99.999 (ผลิตโดยบริษัท Fluka จำกัด ประเทศสวิตเซอร์แลนด์) ลักษณะเป็นแท่งยาว เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.8 เซนติเมตร

3. กาวเงิน (silver paste)

4. กรดไฮโดรฟลูริก (HF) ความเข้มข้น ร้อยละ 50

5. อะซีโตน (acetone)

6. น้ำกลั่น

7. ก๊าซอาร์กอน ความบริสุทธิ์ ร้อยละ 99.99 (จัดจำหน่ายโดย บริษัท หาดใหญ่ออกซิเจน จำกัด ประเทศไทย)

8. ขดลวดความร้อน (filament) (ผลิตโดยบริษัท Edward จำกัด ประเทศอังกฤษ)

## อุปกรณ์

1. pA Meter/DC Voltage Source ยี่ห้อ Hewlett packard รุ่น HP 4104 B ใช้ประจำห้องปฏิบัติการฟิสิกส์วัสดุ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

2. กล่องทดสอบ ยี่ห้อ Hewlett packard รุ่น HP 16055A ใช้ประจำห้องปฏิบัติการฟิสิกส์วัสดุ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

3. เครื่องระเหยสารในสุญญากาศ (vacuum evaporation) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JEE-400 ผลิตภัณฑ์ประเทศญี่ปุ่น ใช้ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ อาคารบริการวิชาการ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

4. เตาแอนนีล ยี่ห้อ Linberg ใช้ประจำที่ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

5. หลอดแก้ว 2 ขนาด คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.8 เซนติเมตร

6. เทอร์โมคับเปิล (Uion 305 Type K Model PCR-1)

7. นาฬิกาจับเวลา

8. ปากคีบ สำหรับจับแผ่นซิลิกอนและวัสดุอื่น

9. คอมพิวเตอร์

**วิธีดำเนินการ**

การศึกษาวิจัยแบ่งวิธีการดำเนินการออกเป็น 2 ตอน ดังนี้

ตอนที่ 1. การเตรียมตัวอย่าง

ตอนที่ 2 การวิเคราะห์ข้อมูล

**ตอนที่ 1. การเตรียมตัวอย่าง**

การศึกษาผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับซิลิกอนภายใต้ความดันต่ำ โดยการนำแว่นผลึกซิลิกอน ตัดให้ได้ขนาด 0.5 x 0.5 เซนติเมตร นำมาทำความสะอาด โดยการชำระล้างด้วย อะซีโตน เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกและผงฝุ่น ล้างด้วยน้ำกลั่น ทำความสะอาดผิวหน้าด้วยกรดไฮโดรฟลูริก ล้างด้วยน้ำกลั่นอีกครั้งหนึ่ง นำ Si(100) ทั้งชนิดเอ็นและชนิดพีมาติดกาวเงินเพื่อทดสอบความเป็นโอห์มิก

จากนั้น นำ Si(100) ทั้งชนิดเอ็นและชนิดพีเคลือบด้วย Al Ni และ Zn ภายใต้ความดัน 6.0-8.0 x $10^{-6}$ mbar แล้วนำไปวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้า นำไปแอนนีลที่อุณหภูมิ 200 300 และ 450$^{0}$C เพื่อทำเป็นผิวสัมผัสที่ดี แล้วนำไปวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้า อีกครั้งหนึ่ง

**ตอนที่ 2 การวิเคราะห์ข้อมูล**

การวิเคราะห์ข้อมูลการวิจัยโดยการนำผลการวัดค่ากระแส-แรงดันไฟฟ้า เพื่อทราบระดับพลังงานเฟอร์มิของซิลิกอนชนิดเอ็นและชนิดพี ความสูงกำแพงศักย์ของซิลิกอนชนิดเอ็นและชนิดพี ความต้านทานผิวสัมผัส ค่าความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ และค่า n

ผิวสัมผัสระหว่างโลหะและซิลิกอน กรณีผิวสัมผัสอุดมคติสามารถระบุผิวสัมผัส

ตารางที่ 3 แสดงลักษณะผิวสัมผัสของผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัว โดยการเปรียบเทียบฟังก์ชันงานวัสดุทั้งสอง

| สารกึ่งตัวนำ | ผิวสัมผัสแบบโอห์มมิก | ผิวสัมผัสแบบเรกติไฟร์ |
|---|---|---|
| ชนิดเอ็น | $\phi_m < \phi_s$ | $\phi_m > \phi_s$ |
| ชนิดพี | $\phi_m > \phi_s$ | $\phi_m < \phi_s$ |

ที่มา Cooke, 1990.

การศึกษาครั้งนี้ผิวสัมผัสไม่เป็นแบบอุดมคติ การศึกษาผิวสัมผัสโลหะกับซิลิกอน ต้องวิเคราะห์ข้อมูลจากการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้า เพื่อทราบลักษณะผิวสัมผัส ความสูงกำแพงศักย์ ความต้านทานผิวสัมผัส และค่า n ดังนี้

1. ผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับซิลิกอนชนิดเอ็น ที่อุณหภูมิ 300 K

ผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับซิลิกอนชนิดเอ็นเป็นความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันงานโลหะและฟังก์ชันงานซิลิกอนชนิดเอ็น

ค่าฟังก์ชันงานซิลิกอนชนิดเอ็นสามารถทราบได้ โดยต้องทราบค่าระดับพลังงานเฟอร์มิซิลิกอนชนิดเอ็น ดังนี้

1.1 ระดับพลังงานเฟอร์มิของซิลิกอนบริสุทธิ์ ($E_{Fi}$) ทราบจากสมการ

$$E_{Fi} = \frac{E_g}{2} + \frac{kT}{2}(\ln \frac{N_V}{N_C}) \qquad (3\text{-}1)$$

เมื่อ $E_{Fi}$ คือ ระดับพลังงานเฟอร์มิของซิลิกอนบริสุทธิ์ หน่วย eV

$E_g$ คือ ความกว้างแถบพลังงานของซิลิกอน = 1.12 eV

k คือ ค่าคงที่ โบลซ์มานน์ (Boltzmann's constant) = $1.38 \times 10^{-23}$ J/K

T คือ อุณหภูมิขณะทดลอง = 300 K

$N_V$ คือ ความหนาแน่นของสถานะประสิทธิผลในแถบวาเลนซ์ = $1.04 \times 10^{25}$ $m^{-3}$

$N_c$ คือ ความหนาแน่นของสถานะประสิทธิผลในแถบการนำ = $2.80 \times 10^{25}$ $m^{-3}$

1.2 หาระดับพลังงานเฟอร์มิของซิลิกอนชนิดเอ็น

ผลรวมความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลในซิลิกอน

$$\rho = \frac{1}{ne\mu_e + pe\mu_p} \qquad (3\text{-}2)$$

ρ คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลในซิลิกอน $m^{-1}$

n คือ จำนวนอิเล็กตรอน ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

e คือ ประจุอิเล็กตรอน = $1.60 \times 10^{-19}$ C

$\mu_e$ คือ ค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอน = $1.35 \times 10^{-1}$ $m^2$/V-sec

$\mu_p$ คือ ค่าความคล่องตัวของโฮล = $4.80 \times 10^{-2}$ $m^2$/V-sec

ซิลิกอนชนิดเอ็นมีจำนวนอิเล็กตรอนมากกว่าจำนวนโฮลมาก (n >> p) ดังนั้น

$$\rho = \frac{1}{ne\mu_e} \qquad (3\text{-}3)$$

จำนวนอิเล็กตรอนในซิลิกอนชนิดเอ็น

$$n = \frac{1}{\rho e\mu_e} \qquad (3\text{-}4)$$

ดังนั้น ระดับพลังงานเฟอร์มิของซิลิกอนชนิดเอ็น

$$E_F = E_{Fi} + \frac{kT}{2}\ln(\frac{n^2}{n_i^2}) \qquad (3\text{-}5)$$

$E_{Fi}$ คือ ระดับพลังงานเฟอร์มิของซิลิกอนบริสุทธิ์จากสมการ (3-1) หน่วย eV

n คือ จำนวนอิเล็กตรอนในซิลิกอนชนิดเอ็นจากสมการ (3-4) หน่วย อนุภาค

$n_i$ คือ ความหนาแน่นของพาหะในซิลิกอนบริสุทธิ์ = $1.5 \times 10^{16}$ $m^{-3}$

จากสมการ (3-5) สามารถทราบค่าฟังก์ชันงานซิลิกอนชนิดเอ็น จากสมการ

$$\phi_{n\text{-}Si} = \chi + E_g - E_F \qquad (3\text{-}6)$$

เมื่อ $\phi_{n\text{-}Si}$ คือ ฟังก์ชันงานของซิลิกอนชนิดเอ็น หน่วย eV

$\chi$ คือ อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี = 4.05 eV

$E_g$ คือ ความกว้างแถบพลังงานของซิลิกอน = 1.12 eV

$E_F$ คือ ระดับพลังงานเฟอร์มิของซิลิกอนชนิดเอ็นจากสมการ (3-5) หน่วย eV

เมื่อทราบฟังก์ชันงานซิลิกอนชนิดเอ็นซึ่งมีค่าสภาพความต้านทาน 0.1 Ω-cm นำมาเปรียบเทียบกับฟังก์ชันงานของโลหะทั้ง 3 ชนิด คือ ฟังก์ชันงานโลหะอลูมิเนียม 4.28 eV ฟังก์ชันงานโลหะนิเกิล 5.15 eV ฟังก์ชันงานโลหะสังกะสี 4.33 eV สามารถระบุลักษณะผิวสัมผัสจากตารางที่ 4

2. ผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับซิลิกอนชนิดพี ที่อุณหภูมิ 300 K

ผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับซิลิกอนชนิดพีเป็นความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันงานของโลหะและของซิลิกอนชนิดพี

ค่าฟังก์ชันงานซิลิกอนชนิดพีสามารถทราบได้ต้องคำนวณค่าระดับพลังงานเฟอร์มิซิลิกอนชนิดพี ดังนี้

2.1 หาค่าระดับพลังงานเฟอร์มิของซิลิกอนบริสุทธิ์ จากสมการ (3-1)

2.2 หาค่าระดับพลังงานเฟอร์มิซิลิกอนชนิดพี

ความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนและโฮลในซิลิกอนทราบจากจากสมการ (3-2) ในซิลิกอนชนิดพีความหนาแน่นจำนวนโฮลมีค่ามากกว่าความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนมาก ($p >> n$) ดังนั้น

$$\rho = \frac{1}{pe\mu_p} \tag{3-7}$$

จำนวนโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดพี

$$p = \frac{1}{\rho e\mu_p} \tag{3-8}$$

ดังนั้น ระดับพลังงานเฟอร์มิซิลิกอนชนิดพี

$$E_F = E_{Fi} + \frac{kT}{2}\ln(\frac{p^2}{n_i^2}) \tag{3-9}$$

$E_{Fi}$ คือ ระดับพลังงานเฟอร์มิซิลิกอนบริสุทธิ์จากสมการ (3-1) หน่วย eV

p คือ จำนวนโฮลในซิลิกอนชนิดพีทราบจากสมการ (3-8) หน่วย อนุภาค

จากสมการ (3-9) สามารถทราบค่าฟังก์ชันงานซิลิกอนชนิดพี คือ

$$\phi_{p-Si} = \chi + E_g - E_F \tag{3-10}$$

$\phi_{p\text{-}Si}$ คือ ฟังก์ชันงานของซิลิกอนชนิดพี หน่วย eV

เมื่อทราบฟังก์ชันงานของซิลิกอนชนิดพีที่มีค่าสภาพความต้านทาน 0.1 Ω-cm นำมาเปรียบเทียบกับฟังก์ชันงานของโลหะทั้ง 3 ชนิด ดังกล่าว สามารถระบุลักษณะผิวสัมผัสทำนองเดียวกับการเปรียบเทียบกับซิลิกอนชนิดเอ็น

3. ความสูงกำแพงศักย์

ความสูงกำแพงศักย์ระหว่างผิวสัมผัสโลหะกับซิลิกอนชนิดเอ็น หาได้จากสมการ

$$\phi_{Bn} = \phi_m - \chi \qquad (3\text{-}11)$$

ความสูงกำแพงศักย์ระหว่างผิวสัมผัสโลหะกับซิลิกอนชนิดพี หาได้จากสมการ

$$\phi_{Bp} = E_g - \phi_m + \chi \qquad (3\text{-}12)$$

เมื่อ $\phi_{Bn}$ คือ ความสูงกำแพงศักย์ระหว่างผิวสัมผัสโลหะกับซิลิกอนชนิดเอ็น หน่วย eV

$\phi_{Bp}$ คือ ความสูงกำแพงศักย์ระหว่างผิวสัมผัสโลหะกับซิลิกอนชนิดพี หน่วย eV

$\phi_m$ คือ ฟังก์ชันงานของโลหะ หน่วย eV

$\chi$ คือ ค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี หน่วย eV

4. ความต้านทานผิวสัมผัส

จากตารางที่ 4 สามารถระบุลักษณะผิวสัมผัส ผลจากการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้า นำไปเขียนกราฟเพื่อวิเคราะห์หาลักษณะผิวสัมผัส นั่นคือ ถ้ากระแสไฟฟ้าสามารถผ่านได้เฉพาะการทำไบแอสตรง แสดงว่าเป็นผิวสัมผัสแบบเรกติไฟร์ กระแสไฟฟ้าสามารถผ่านได้ทั้งสองทาง คือ ไบแอสตรงและไบแอสกลับแสดงว่าเป็นผิวสัมผัสแบบโอห์มมิก

ผิวสัมผัสระหว่างโลหะและซิลิกอนแบบโอห์มมิก สามารถทราบค่าความต้านทานผิวสัมผัสจากส่วนกลับของอนุพันธ์ย่อยของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ V=0 ซึ่งหมายถึงค่าความชันของกราฟที่ปรากฏ ในที่นี้ พิจารณาช่วงแรงดันไฟฟ้า –1.00-1.00 V จากสมการ (2-38)

$$R_C = \left(\frac{\partial J}{\partial V}\right)^{-1}\Big|_{V=0}$$

เมื่อ $R_C$ คือ ความต้านทานผิวสัมผัส หน่วย $\Omega/m^2$

$\frac{\partial J}{\partial V}$ คือ อนุพันธ์ย่อยของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเทียบกับแรงดันไฟฟ้า

หน่วย $A\ V^{-1}m^{-2}$

และค่าความต้านทานผิวสัมผัสน้อยที่สุดทำให้เกิดเทอร์มิโอนิกอิมิสชัน จากสมการ (2-39)

$$R_C = \frac{\left(\frac{kT}{q}\right)\exp\left(\frac{+q\phi_B}{kT}\right)}{A^{**}T^2}$$

5. ค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ

สำหรับผิวสัมผัสระหว่างโลหะและซิลิกอนแบบเรกติไฟร์เขียนกราฟเซมิลอกการิทึมระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้า กำหนดค่าเพื่อหาค่า $I_0$ โดยการลากเส้นกราฟดังกล่าว จากสมการ

$$I = I_0(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1)$$

เมื่อ I คือ กระแสไฟฟ้า หน่วย A

$I_0$ คือ กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ(reverse saturation current) หน่วย A

หรือ

$$J_0 = A^{**}T^2 \exp(\frac{-q\phi_B}{kT})$$

เมื่อ $J_0$ คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ หน่วย $A/m^2$

A** คือ ค่าคงที่ริชาร์ดสัน หน่วย $A.m^{-2}k^{-2}$

T คือ อุณหภูมิ หน่วย K

K คือ ค่าคงที่โบลซ์มานน์ หน่วย J/K

q คือ ประจุไฟฟ้า หน่วย C

$\phi_B$ คือ ความสูงกำแพงศักย์ของผิวสัมผัส หน่วย eV

สำหรับค่าคงที่ริชาร์ดสันทราบค่าจากการคำนวณหลังจากทราบค่า $J_0$

6. ค่า n

การเขียนกราฟเซมิลอกการิทึมและลากเส้นกราฟ สำหรับผิวสัมผัสระหว่างโลหะและซิลิกอน เป็นแบบเรกติไฟร์ สามารถหาค่า n จากลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า จากสมการ (2-34)

$$n \equiv \frac{q}{kT}\frac{\partial V}{\partial(\ln J)}$$

เมื่อ $\frac{\partial V}{\partial \ln J}$ เป็นส่วนกลับของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง lnJ กับ V พิจารณาที่ V= 0