



วิธีการวิเคราะห์ผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำแบบต่างๆ

5.1 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของผิวสัมผัสต่างๆ แบบเรกติฟายอิง

ลักษณะสมบัติของผิวสัมผัสแบบเรกติฟายอิงแสดงได้ด้วยค่า Ideality factor และ Barrier Height ซึ่งสามารถวัดหาได้ 3 วิธีดังนี้

5.1.1 วัดหาความสัมพันธ์ระหว่าง Current density กับแรงดันไบอัส

จากหัวข้อ 3.1.1 ค่า current density สัมพันธ์กับแรงดันไบอัสตามสมการ

(3.17) ดังนี้

กรณี Series resistance มีค่าต่ำมาก แรงดันไบอัสทั้งหมดตกคร่อมที่ผิวสัมผัส จะได้

$$J = J_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \{1 - \exp\left(\frac{-qV}{kT}\right)\}$$

$$\frac{J}{J_0 \{1 - \exp\left(\frac{-qV}{kT}\right)\}} = \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right)$$

$$\log\left\{\frac{J}{1 - \exp\left(\frac{-qV}{kT}\right)}\right\} - \log J_0 = \frac{qV}{nkT} \log(2.712) \quad (5.1)$$

จากสมการ (5.1) ถ้าทำการ Plot ค่า $\log\left\{\frac{J}{1 - \exp\left(\frac{-qV}{kT}\right)}\right\}$ กับค่า V จะได้กราฟเส้นตรง มีค่า slope เท่ากับ $\frac{q \log(2.712)}{nkT}$ และจุดตัดแกนตั้ง [แกน $\log\left\{\frac{J}{1 - \exp\left(\frac{-qV}{kT}\right)}\right\}$] มีค่าเท่ากับ $\log J_0$ จากค่า slope และจุดตัดดังกล่าวเราสามารถนำไปหาค่า n และ J_0 ได้ตามลำดับ

ค่า J_0 ที่หาได้สามารถนำไปหาค่า Effective Barrier Height ได้จากสมการ (3.15)

$$J_0 = A^{**} T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_e}{kT}\right) \quad (5.2)$$

$$A^{**} \approx 120 \text{ amp. cm.}^{-2} \text{ } ^\circ\text{K}^{-2}$$

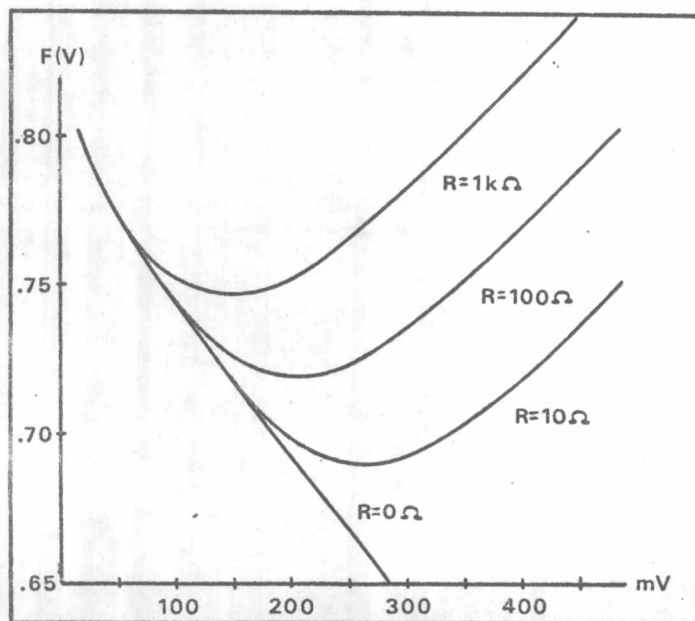
A^{**} มีค่าไม่คงที่แต่ขึ้นกับสนามไฟฟ้า อย่างไรก็ตามถ้ากำหนดค่า A^{**} ผิดพลาดไปถึง 2 เท่า ค่า ϕ_e ที่คำนวณได้จากสมการ (5.2) ผิดพลาดไปน้อยกว่า $\frac{kT}{q}$ ซึ่งน้อยมาก (9) การกำหนดค่า A^{**} จึงไม่จำเป็นต้องให้ถูกต้องทีเดียว ซึ่งในการคำนวณเราสามารถให้ $A^{**} = 120$ ได้ (57)

ในบางกรณีถ้าค่า Series resistance มีค่าสูงหรือ Back contact ของผิวสัมผัส เป็น ผิวสัมผัสแบบเรกติฟายอิง (คล้ายกับไดโอด 2 ตัวต่อสวนทางกัน) กราฟที่ Plot โดยอาศัยสมการ (5.1) จะไม่เป็นเส้นตรง ทำให้ค่าจุดตัดไม่เท่ากับ $\log J_0$ Norde (58) ได้เสนอให้ Plot ค่า $F(V)$ กับ V แทน โดยที่

$$F(V) = \frac{V}{2} - \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{J}{A^{**} T^2}\right) \quad \text{โดยที่ } \beta = \frac{q}{kT} = \frac{11600}{T} \quad (5.3)$$

กราฟที่ได้จะมีจุดที่ $F(V)$ มีค่าต่ำสุด ดังรูปที่ 5.1 จากค่า $F(V)$ ต่ำสุด [เท่ากับ $F(V_L)$] นำไปหา ϕ_e ได้จาก

$$\phi_e = F(V_L) + \frac{V_L}{2} - \frac{kT}{q} \ln 2 \quad (5.4)$$



รูปที่ 5.1

ผลการคำนวณ (53) หาค่า $F(V)$

เมื่อกำหนด contact area = 1 ซม.²

$$A^{**} = 120 \text{ Amp. cm.}^{-2} \text{ } ^\circ\text{K}^{-2}$$

$T = 20^\circ$ เซลเซียส และ

$$\phi_e = 0.79 \text{ eV}$$

5.1.2 วัดหาความสัมพันธ์ระหว่าง Photocurrent กับความถี่ของแสง

เมื่อแสงที่มีพลังงานสูงกว่า Effective Barrier Height ตกกระทบผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนบริเวณระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะจะถูกกระตุ้นข้าม Barrier เข้าไปในเนื้อโลหะ เป็นผลทำให้เกิด Photovoltaic e.m.f. ซึ่งเมื่อต่อกับวงจรภายนอกจะให้ค่ากระแสเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของแสงที่ตกกระทบผิวสัมผัสดังกล่าว Fowler (59) ได้เสนอสมการ

$$\frac{\gamma}{T^2} = B \left[\frac{\pi^2}{6} + \frac{\mu^2}{2} - \left(e^{-\mu} - \frac{e^{-2\mu}}{2^2} + \frac{e^{-3\mu}}{3^2} \dots \dots \dots \right) \right] \quad (5.5)$$

เมื่อ γ = Photocurrent ต่อพลังงาน Photon (hf)

B = ค่าคงที่

$$\mu = \frac{h}{kT}(f - f_0)$$

กรณีค่า $\mu \gg 1$ γ แปรผันโดยตรงกับ $[h(f - f_0)]^2$

ถ้าทำการ plot $\gamma^{\frac{1}{2}}$ กับ hf จะได้กราฟเส้นตรงตัดแกน hf ที่ hf_0 ค่า Effective - Barrier Height มีค่าเท่ากับ hf_0 รายละเอียดในการหา ϕ_e ด้วยวิธีนี้ได้จากผลการทดลองของ Anderson, Crowell และ Kao (1975) (60)

5.1.3 วัดหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Capacitance กับแรงดันไบอัสขณะผิวสัมผัสถูกไบอัสย้อน

ถ้าผิวสัมผัสแบบเรกติฟายอิงระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิด N มีลักษณะสมบัติใกล้เคียงอุดมคติ และค่า N_d คงที่สม่ำเสมอตลอดเนื้อสารกึ่งตัวนำ จะได้ค่า differential capacitance ($C = \frac{dQ}{dV}$) ขณะผิวสัมผัสถูกไบอัสย้อนด้วยแรงดัน V_r ดังนี้

$$C = A(qN_d\epsilon_s/2)^{\frac{1}{2}} (\phi_{bn} - \xi + V_r - \frac{kT}{q})^{-\frac{1}{2}} \quad (5.6)$$

เมื่อ A = พื้นที่หน้าตัดของผิวสัมผัส

N_d มีค่าไม่มาก (สารกึ่งตัวนำเป็นแบบ non - degenerate)

$$\text{จาก (5.6)} \quad C^{-2} = \left(\frac{2}{qN_d\epsilon_s A^2} \right) (\phi_{bn} - \xi + V_r - \frac{kT}{q}) \quad (5.7)$$

ถ้า ϕ_{bn} คงที่ไม่ขึ้นกับ V_r (ความหนาของ Interfacial layer มีค่าน้อยมาก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C^{-2} กับ V_r จะได้กราฟเส้นตรงตัดแกน V_r ที่ $-V_I$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $-(\phi_{bn} - \xi - \frac{kT}{q})$

$$\therefore \phi_{bn} = V_I + \xi + \frac{kT}{q} \quad (5.8)$$

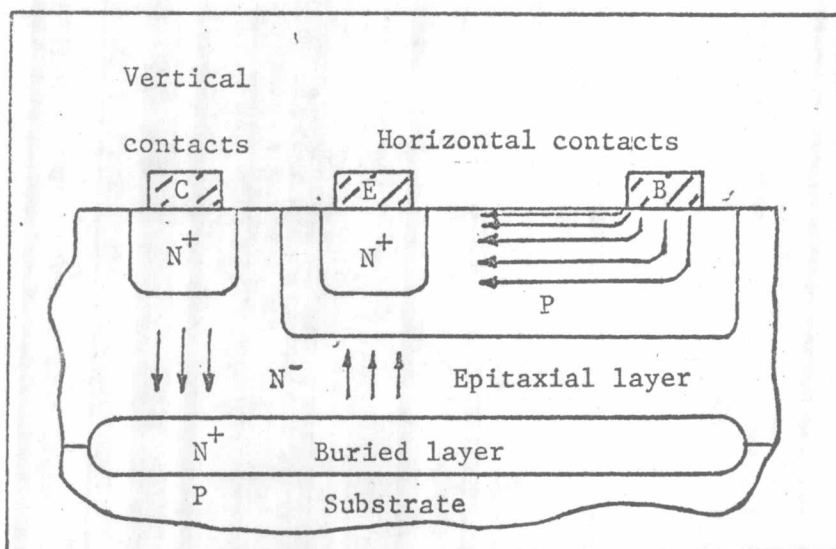
ในการหา ϕ_{bn} ด้วยวิธีนี้ต้องใช้ความระมัดระวังขณะทำการวัดค่า C ซึ่งอาจจะทำให้เกิดความผิดพลาดได้ รายละเอียดในการวัดหา ϕ_{bn} ดูได้จากผลการทดลองของ Good man (11)

วิธีการทั้งสามที่กล่าวมาแล้ว วิธีการแรก (5.1.1) เหมาะสมที่จะใช้ในการวิจัยมากที่สุด ด้วยเหตุผลดังนี้

1. สามารถหาค่า n และ Barrier Height ได้ทั้งสองค่า ส่วนวิธีที่สองและสามใช้หาค่า Barrier Height ได้เพียงค่าเดียว
2. ความเที่ยงตรงของอุปกรณ์วัดและสภาวะการจำเป็นในการวัดไม่ซับซ้อนยุ่งยากเหมือนวิธีการที่สองและสาม เนื่องจากค่า Photocurrent และ Capacitance ที่ต้องวัดในการทดลองที่สองและสามนั้นมีค่าน้อยมาก (60,61) ในการวัดต้องใช้อุปกรณ์ที่มีความเที่ยงตรงสูงและผลจาก Noise อาจจะทำให้การวัดผิดพลาดได้ง่าย
3. วิธีการแรกเป็นวิธีที่ใช้อย่างแพร่หลายทำให้ผลการทดลองที่ได้จากการวิจัยสามารถนำไปใช้เปรียบเทียบกับผลการทดลองอื่นๆได้โดยง่าย

5.2 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของผิวสัมผัส แบบโอห์มมิด

ผิวสัมผัสแบบโอห์มมิดอาจจะแบ่งตามลักษณะการไหลของกระแสเป็น 2 แบบ คือ ผิวสัมผัสแนวตั้ง (Vertical contact) และผิวสัมผัสแนวนอน (Horizontal contact) ดังรูปที่ 5.2

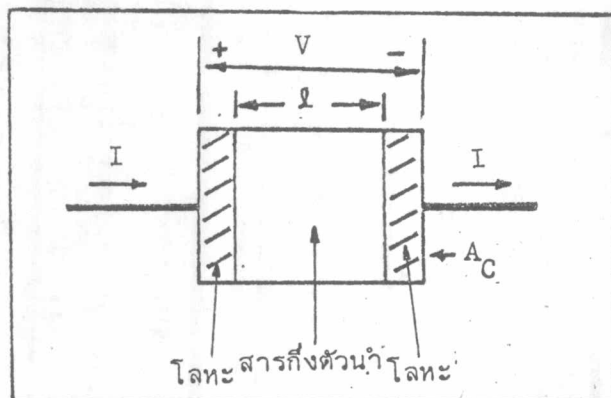


รูปที่ 5.2

โครงสร้างของทรานซิสเตอร์แบบ npn ซึ่งประกอบด้วยผิวสัมผัสแนวตั้งและผิวสัมผัสแนวนอน

วิธีการวัดหาค่า Contact resistivity ของผิวสัมผัสแบบโอห์มมิกมี 5 วิธี ดังนี้

5.2.1 Twin contact method (62) วิธีการทดลองแสดงได้ด้วยรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3

แสดงโครงสร้างของตัวอย่างในการทดลองแบบ Twin - contact method

จากรูปและสมการ (4.3)

$$2R_C = \frac{V}{I} - \bar{\rho}_s \frac{l}{A_C} \tag{5.9}$$

เมื่อ $\bar{\rho}_s$ = Bulk resistivity ของสารกึ่งตัวนำ

A_C = ผิวสัมผัสภาคตัดขวางของผิวสัมผัส

$$\therefore R_C = \frac{1}{2} \left(\frac{V}{I} - \bar{\rho}_s \frac{l}{A_C} \right) \tag{5.10}$$

จากสมการ (4.4)

$$\rho_c = \frac{1}{2} \left(\frac{V}{I} A_c - \bar{\rho}_s l \right) \tag{5.11}$$

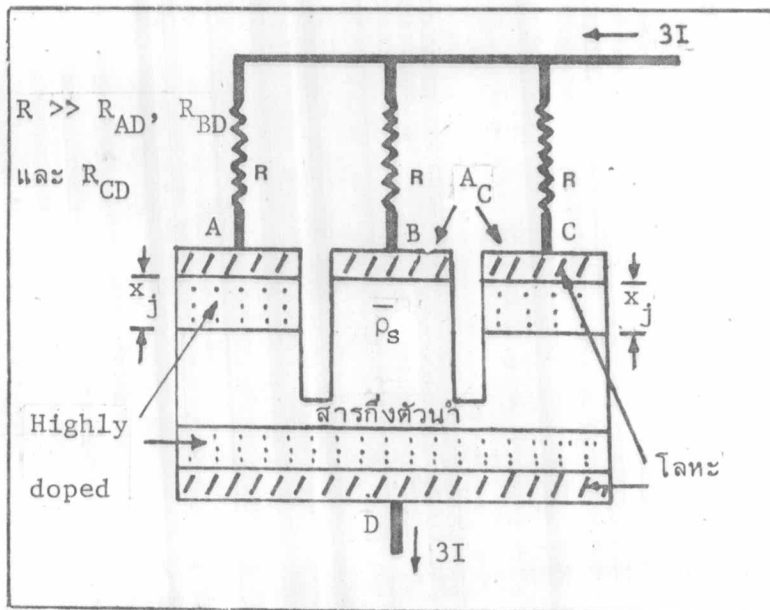
$$\left| \frac{\Delta \rho_c}{\rho_c} \right| \approx \frac{\bar{\rho}_s}{\rho_c} \left| \Delta l_{\text{eff.}} \right| \tag{5.12} \quad (63)$$

เมื่อ $\Delta \rho_c$ = Error ในการวัด ρ_c

Δl_{eff} = Error ในการวัด l

จากสมการ (5.12) จะพบว่าค่าความผิดพลาดในการวัดค่า ρ_c ขึ้นอยู่กับความเที่ยงตรงในการวัดค่า l เนื่องจากเป็นการยากที่จะกำหนดขอบเขตที่แน่นอนของผิวสัมผัส

5.2.2 Differential method (63) วิธีการทดลองแสดงได้ด้วยรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4

แสดงโครงสร้างของตัวอย่างในการทดลองแบบ Differential method

สารกึ่งตัวนำบริเวณผิวสัมผัส A และ C ถูก doped ให้มีค่าความหนาแน่นของพาหะสูงมาก จนค่า Contact resistance ที่ผิวสัมผัสทั้งสองมีค่าใกล้เคียงศูนย์

$$(R_c)_B = \frac{V_{BA} + V_{BC}}{2I} - R_d \tag{5.13}$$

เมื่อ $(R_c)_B$ = Contact resistance ที่ผิวสัมผัส B

R_d = ความต้านทานของสารกึ่งตัวนำที่ผิวสัมผัส B มีความยาวเท่ากับ x_j

$$R_d \approx \bar{\rho}_B \cdot \frac{x_j}{A_c} \quad (5.14)$$

จาก (5.13), (5.14)

$$(R_c)_B = \frac{V_{BA} + V_{BC}}{2I} - \bar{\rho}_B \cdot \frac{x_j}{A_c} \quad (5.15)$$

จาก (4.4)

$$\rho_c = A_c \left(\frac{V_{BA} + V_{BC}}{2I} \right) - \bar{\rho}_B \cdot x_j \quad (5.16)$$

$$\left| \frac{\Delta \rho_c}{\rho_c} \right| \approx \frac{\bar{\rho}_B}{\rho_c} \left| \Delta x_j \right| \quad (5.16) \quad (63)$$

Δx_j = Error ในการวัดหา x_j

การวัดหา x_j ทำได้โดยการใช้แวนผลึกสารกึ่งตัวนำชนิดตรงข้ามกับแวนผลึกที่จะทำตัวอย่าง สำหรับการทดลอง diffuse พร้อมๆกันกับตัวอย่างขณะทำการ dope ผิวสัมผัส A และ C ให้มีค่าความหนาแน่นของพาหะสูงๆ แวนผลึกสารกึ่งตัวนำชนิดตรงกับตัวอย่างดังกล่าวข้างต้นจะกลายเป็นหัวต่อ P-N ซึ่งสามารถนำไปย้อมสีหาค่า x_j ได้ ความผิดพลาดในการหา x_j เกิดขึ้นได้จากอัตราการ diffuse ของ Impurity ในแวนผลึกทั้งสองมีค่าไม่เท่ากัน

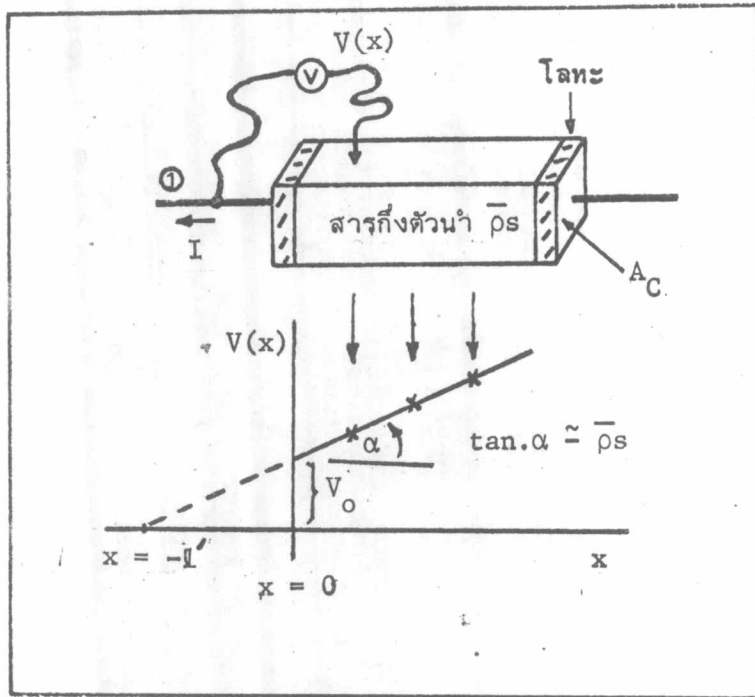
5.2.3 Extrapolation method (53) วิธีการทดลองแสดงได้ด้วยรูปที่ 5.5

แรงดัน $V(x)$ เป็นแรงดันระหว่างขั้ว 1 กับเข็มโพรบที่ห่างจากผิวสัมผัสเป็นระยะทาง x นำค่า $V(x)$ ที่ระยะห่าง x ต่างๆกันไป plot จะได้กราฟเส้นตรงตัดแกน $V(x)$ ที่ V_0 V_0 มีค่าเท่ากับแรงดันคร่อมผิวสัมผัส

$$V_0 = IR_c$$

$$R_c = \frac{V_0}{I}$$

(5.17)



รูปที่ 5.5

แสดงโครงสร้างของตัวอย่าง
และวิธีหาค่า V_0 ในการทดลอง
แบบ Extrapolation method

จาก (4.4)

$$\rho_c = A_c \frac{V_0}{I} \quad (5.18)$$

จากรูปที่ 5.5 จะสามารถหาค่า V_0 ในรูปของ $\bar{\rho}_s$ และ l' ได้ดังนี้

$$V_0 = I \cdot \bar{\rho}_s \frac{l'}{A_c}$$

แทนค่าในสมการ (5.18) จะได้

$$\rho_c = \bar{\rho}_s l'$$

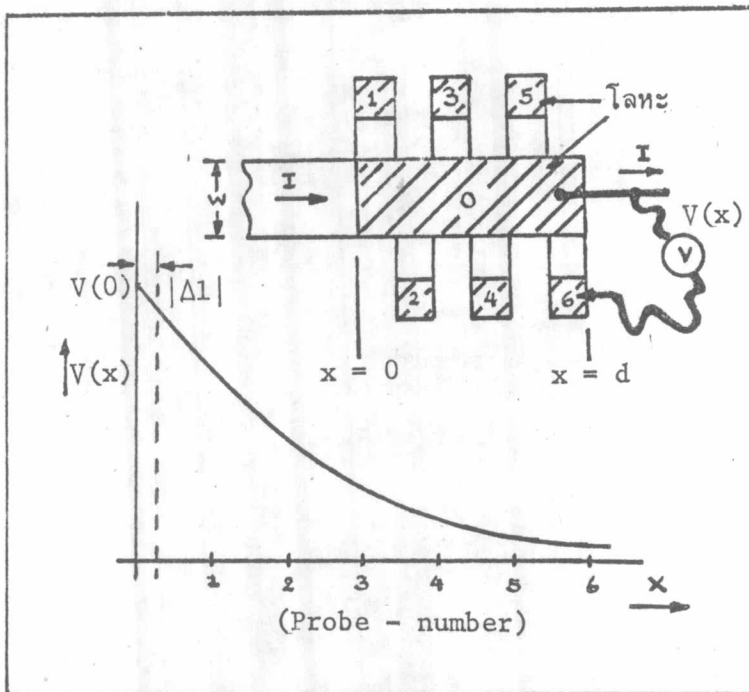
$$\therefore \frac{\Delta \rho_c}{\rho_c} = \frac{\bar{\rho}_s}{\rho_c} \Delta l' \quad (5.19)$$

เมื่อสารกึ่งตัวนำมีค่า $\bar{\rho}_s$ คงที่ตลอดชิ้นสาร

$\Delta l'$ เป็น Error ที่เกิดในการวัดระยะทางซึ่งถ้าไม่เกิด Error และ $\bar{\rho}_s$ คงที่ตลอด

ชิ้นสาร กราฟที่ได้จะเป็นเส้นตรงมีค่า slope = $\bar{\rho}_s$

5.2.4 Interface probing method (64) วิธีการทดลองแสดงได้ด้วยรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6

แสดงโครงสร้างของตัวอย่าง และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $V(x)$ กับระยะทาง x ในการทดลองแบบ Interface probing method

ถ้าแรงดันตกคร่อมเนื้อสารกึ่งตัวนำระหว่างขั้ว 0 กับขั้ว 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับแรงดันตกคร่อมผิวสัมผัสระหว่างโลหะที่ขั้ว 0 กับสารกึ่งตัวนำ ค่า $V(x)$ ซึ่งเป็นแรงดันระหว่างขั้ว 0 กับขั้วใดๆขั้วหนึ่ง (เช่นขั้ว 6 ดังในรูปที่ 5.6) จะมีค่าเท่ากับแรงดันตกคร่อมผิวสัมผัสที่ระยะทาง x

$$V(x) = j(x) \rho_c$$

$$j(x) = \frac{V(x)}{\rho_c} \quad (5.20)$$

แต่ $I = w \int_0^d j(x) dx$

นำค่า $j(x)$ จากสมการ (5.20) แทนค่าจะได้

$$I = w \int_0^d \frac{V(x)}{\rho_c} dx$$

ถ้าค่า ρ_c คงที่ตลอดผิวสัมผัส

$$\rho_c = \frac{w}{I} \int_0^d V(x) dx$$

ในการวัดหาระยะห่างระหว่างขั้วสามารถวัดได้อย่างแม่นยำ แต่การกำหนดตำแหน่ง $x = 0$ อาจเกิดความผิดพลาดได้ (สมมติว่ามีค่า $= \Delta l$) เนื่องจากส่วนเนื้อสารกึ่งตัวนำที่ต่อมาเพื่อทำขั้ว (เช่น ขั้ว 2) มีความหนา (63)

$$\Delta \rho_c = \frac{W}{l} V(0) \Delta l \quad (5.21)$$

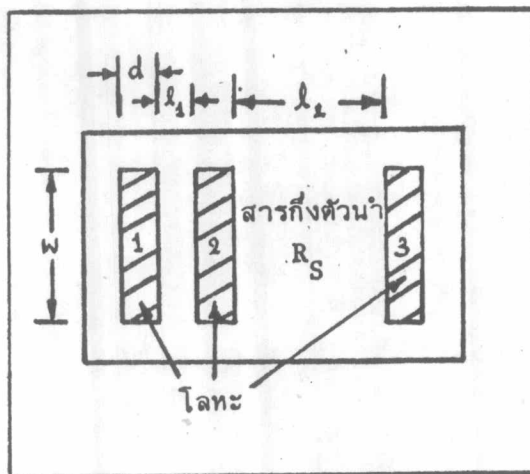
จากทฤษฎี Transmission Line Model (65)

$$V(0) \approx \rho_c \cdot \alpha \cdot \frac{l}{W}$$

นำไปแทนค่าในสมการ (5.21) จะได้

$$\frac{\Delta \rho_c}{\rho_c} \approx \alpha \cdot \Delta l \quad (5.22)$$

5.2.5 Transmission Line Model (TLM) method



รูปที่ 5.7

แสดงโครงสร้างของตัวอย่างในการทดลอง
แบบ Transmission Line Model method

ทำการวัดหาค่าความต้านทานระหว่างขั้วต่อ 1 และ 2 (R_{12}) และระหว่างขั้วต่อ 2 และ 3 (R_{23})

จากสมการ (4.2) และกรณิค่า R_c ของผิวสัมผัสสี่ขั้วต่อ 1, 2, และ 3 มีค่าเท่ากันจะได้

$$R_{12} = 2R_c + R_s \frac{l_1}{W} \quad (5.23)$$

$$R_{23} = 2R_c + R_s \frac{l_2}{w} \quad (5.24)$$

จากสมการ (5.23) และ (5.24) จะได้

$$R_c = \frac{R_{12}l_2 - R_{23}l_1}{2(l_2 - l_1)} \quad (5.25)$$

$$R_s = \frac{w(R_{23} - R_{12})}{l_2 - l_1} \quad (5.26)$$

ป้อนกระแส I ระหว่างขั้วต่อ 2 และ 3 แล้วทำการวัดแรงดันคร่อมขั้วต่อ 1 และ 2 (V_T)

กำหนด $R_T = \frac{V_T}{I} \quad (5.27)$

จาก Transmission Line Model สามารถนำเอาค่า R_c และ R_T ไปคำนวณหาค่า Characteristic impedance (Z) และ Attenuation Constant (α) (57) จากสมการ

$$Z = (R_c^2 - R_T^2)^{1/2} \quad (5.28)$$

$$\alpha = \frac{1}{d} \text{arc cosh} \left(\frac{R_c}{R_T} \right) \quad (5.29)$$

และ $\rho_c = \frac{Zw}{\alpha} \quad (5.30)$

$$R'_s = Zw\alpha \quad (5.31)$$

เมื่อ R'_s เป็นค่า Sheet resistance ของสารกึ่งตัวนำที่ผิวสัมผัสได้ขั้วต่อ 1, 2 และ 3

$$\frac{\Delta\rho_c}{\rho_c} = 1.4 \left(\frac{\bar{\rho}_s}{\rho_c} \right) \Delta d \quad (5.32) \quad (63)$$

Δd เป็นค่า Error ในการวัดความหนาของขั้วต่อ 1, 2 และ 3 ซึ่งเกิดจาก Over หรือ Under Cut ขณะทำการ Etch โลหะเพื่อทำ Pattern ของขั้วต่อ

	Twin Contact	Extra-polation	Differ-ential	Interface probing	TLM
Linearity	No	Yes	Yes	Yes	Yes
Error $ \Delta l _{\text{eff}} (\mu\text{m})$	5	5	0.2	0.6	0.4
Homogeneity	No	No	No	Yes	Yes
$\frac{(A_c)_{\text{sample}}}{(A_c)_{\text{device}}}$	$\geq 10^4$	$\geq 10^4$	$\geq 10^4$	≥ 1	≥ 1

ตารางที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบวิธีการทดลองทั้ง 5 แบบ (63)

วิธีการทั้งห้าที่กล่าวมาแล้ว วิธีการสุดท้าย (TLM.) เหมาะสมที่จะใช้ในการวิจัยมากที่สุด
ด้วยเหตุผลดังนี้ (ดูตารางที่ 5.1 ประกอบ)

1. ลักษณะสมบัติของผิวสัมผัสที่วัดโดย TLM มี Linearity ดี
2. ผิวสัมผัสมีความเป็นเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอตลอดผิวสัมผัส
3. ความผิดพลาดที่เกิดน้อยกว่าทุกวิธียกเว้น Differential method
4. พื้นที่ภาคตัดขวางของผิวสัมผัสของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง สามารถสร้างให้เท่ากับของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทั่วๆไปได้
5. ลักษณะโครงสร้างคล้ายกับโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต้องการข้อมูลในการวิจัยมากกว่าทุกแบบ