

บทที่ 4

วิธีการวัดค่าความต้านทานจำเพาะผิวสัมผัส

วิธีการวัดค่าความต้านทานจำเพาะผิวสัมผัส (r_c) มีอยู่หลายวิธีสำหรับผิวสัมผัสที่เป็นแบบโฮโมจีเนียส (Homogenous) ที่มีผิวสัมผัสพื้นที่ A และมีกระแสไหลด้วยค่าความหนาแน่นกระแสคงที่ ค่าความต้านทานจำเพาะผิวสัมผัสมีค่า

$$R_c = r_c / A \quad (4.1)$$

ซึ่ง R_c เป็นค่าความต้านทานของผิวสัมผัสมีหน่วยเป็น โอห์ม
 r_c เป็นค่าความต้านทานจำเพาะผิวสัมผัสมีหน่วยเป็น โอห์ม-ตร.ซม.
 A เป็นค่าพื้นที่ผิวสัมผัสมีหน่วยเป็น ตร.ซม.

โดยปกติค่าความต้านทานที่วัดได้นั้นจะติดอยู่ในรูปของผลรวมของค่า R_c อันเป็นค่าความต้านทานของผิวสัมผัส ค่า R_b อันเป็นค่าความต้านทาน Spreading resistance ในเนื้อสารกึ่งตัวนำ และค่า R_o เป็นค่าความต้านทานของเนื้อสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นค่าความต้านทานที่ได้ R จะมีค่าตามสมการที่ (4.2)

$$R = R_c + R_b + R_o \quad (4.2)$$

ในปัจจุบันวิธีการวัดค่าความต้านทานจำเพาะผิวสัมผัสที่นิยมใช้มีอยู่ 4 วิธีดังนี้

4.1 วิธีของ Cox และ Strack^(๒)

วิธีของ Cox และ Strack ได้แสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งให้ผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำ มีรูปร่างเป็นวงกลมที่มีรัศมีค่า a อยู่บนชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหรือชนิดพี ที่มีค่าสภาพต้านทาน

ρ และความหนา t ซึ่งอาจจะเป็นชั้นของเอพิแทกซีหรือเป็นเนื้อเดียว (bulk) และด้านล่างมีผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำเช่นกัน ถ้าหากเป็นชั้นของเอพิแทกซีแล้วชั้นสเตรต (Substrate) นั้นจะเป็นชนิดเอ็นหรือชนิดพี ซึ่งอาจจะเป็นชนิดต่างกันหรือเหมือนกันก็ได้ แต่ในรูปที่ 4.1 ให้ตัวอย่างเป็นชั้นเอพิแทกซีชนิดเอ็นอยู่บนชั้นสเตรตชนิดเอ็น เราจะได้ค่าความต้านทานรวมมีค่า

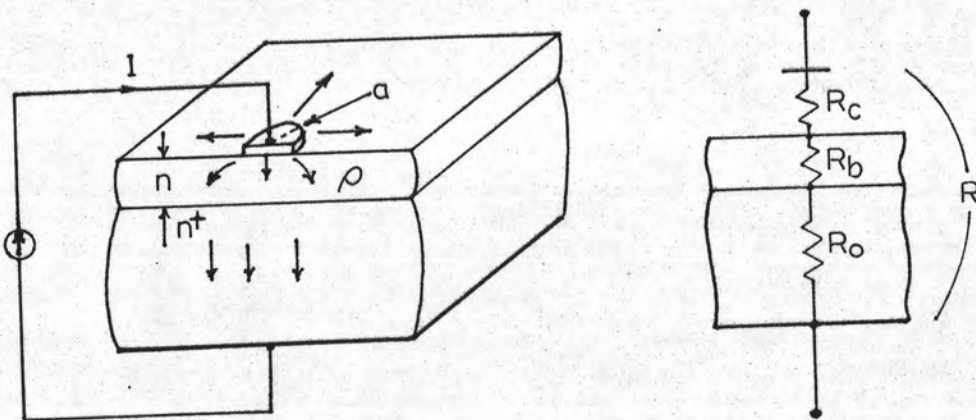
$$R = R_c + R_b + R_o \quad (4.3)$$

- ซึ่ง R_c คือ ค่าความต้านทานผิวสัมผัส
- R_o คือ ค่าความต้านทานของชั้นสเตรตและความต้านทานผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำด้านล่าง
- R_b คือ ค่า Spreading resistance สามารถหาได้จากสมการที่ (4.4)

$$R_b = \frac{\rho}{a} F \quad (4.4)$$

โดย F เป็นค่าฟังก์ชันของ a/t ตามสมการที่ (4.5)

$$F(a/t) = \frac{1}{\pi} \arctan(2t/a) \quad (4.5)$$

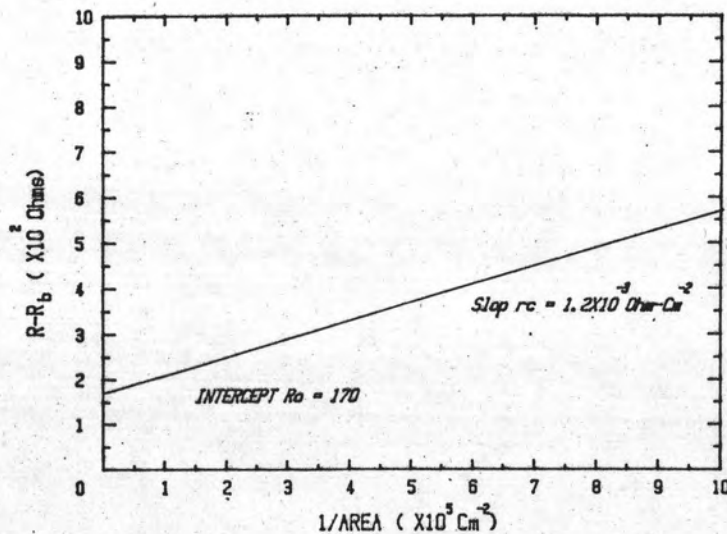


รูปที่ 4.1 วิธีการวัดค่าความต้านทานจำเพาะผิวสัมผัสของ Cox และ Strack

ดังนั้น จากสมการข้างต้นสามารถหาค่าความต้านทานจำเพาะผิวสัมผัสจากสมการที่ (4.6)

$$R = \frac{r_c}{\pi a^2} + \frac{\rho}{a} F + R_o \quad (4.6)$$

จากนั้นทำการวัดค่า $R - R_o$ และ $1/a^2$ ที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสต่างกันนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของ $R - R_o$ และ $1/a^2$ ซึ่งปกติมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง จุดตัดแกน Y นั้นเป็นค่า R_o และ ความชันจะเป็นค่า r_c ตามตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างของผลที่ได้จาก (9) แสดงความสัมพันธ์ของ $R - R_o$ และ $1/a^2$ จากวิธีการวัดค่าสภาพต้านทานผิวสัมผัสจำเพาะของ Cox และ Strack

4.2 วิธี Four-Point contacts (10) (11)

วิธี Four-Point contacts ตามรูปที่ 4.3 ชิปสเตรตเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีความหนา t และสภาพต้านทาน ρ ซึ่งมีผิวสัมผัสเป็นรูปวงกลมมีรัศมี a จำนวน 4 จุดเรียงอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน โดยมีระยะห่างกันของแต่ละจุดมีค่า s ทำการบ่อนกระแสไฟฟ้าค่า

I ผ่านขั้ว A ไปสู่ขั้ว B จากนั้นวัดค่าความต่างศักย์ที่ขั้ว 1 และขั้ว 2 ได้ค่า V_1 และ V_2 ตามลำดับ จะได้ค่าตามสมการที่ (4.7)

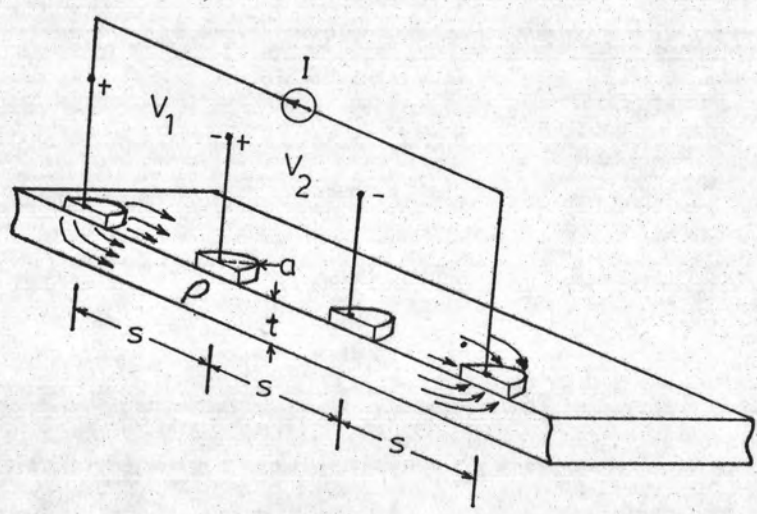
$$V_1 - V_2 = I(R_c + R_b) \tag{4.7}$$

หรือ
$$r_c = \pi a^2 \left[\frac{V_1}{I} - \frac{V_2}{I} - R_b \right] \tag{4.8}$$

แต่อย่างไรก็ดี กระแสที่กระจายในสารกึ่งตัวนำมิได้ทำให้ Potential distribution ที่กระจายนั้นเป็นแบบเชิงเส้น เราจะได้ค่า r_c ที่ถูกต้องคือ

$$r_c = \pi a^2 \left[\frac{V_1}{I} - \frac{V_2}{I} \frac{\ln[(3S/2a) - 1/2]}{2 \ln 2} - R_b \right] \tag{4.9}$$

ถ้า $a \ll s$ และ $t \ll s$ สมการที่ (4.8) ถูกต้อง และ $\rho a^2 \ll r_c t$ ค่า R_b อาจจะสามารถตัดออกจากสมการที่ (4.9) ได้



รูปที่ 4.3 วิธีการวัดค่าความต้านทานจำเพาะผิวสัมผัสด้วยวิธี Four-point contacts

4.3 วิธี Schöckley technique ^{(3) (4)}

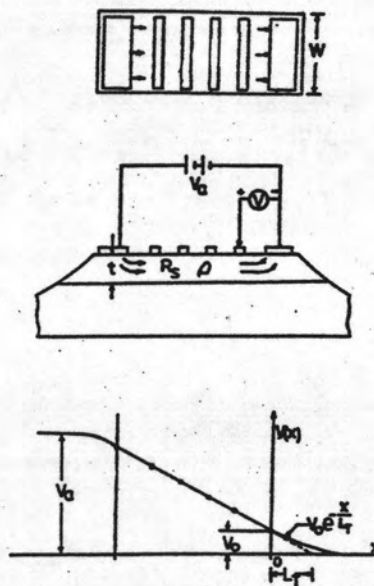
วิธี Schöckley technique ถูกแสดงในรูปที่ 4.4 ด้วยการวัดค่า $V(X)$ ซึ่งเป็นความต่างศักย์ระหว่างขั้ว 1 และเข็มโพรบที่ห่างจากผิวสัมผัสเป็นระยะทาง X นำค่า $V(X)$ ที่ระยะ X ต่างๆ มาเขียนกราฟของความสัมพันธ์ $V(X)$ และ X จะได้กราฟเส้นตรงตัดแกน $V(X)$ ที่ V_0 มีค่าเท่ากับแรงดันคร่อมผิวสัมผัส จากนั้นเราสามารถคำนวณหาค่า r_c จากสมการที่ (4.10)

$$r_c = R_s L_T^2 \quad (4.10)$$

ซึ่ง L_T คือค่า Transfer length สามารถหาได้จากสมการ

$$V(X) = V_0 \text{Exp}(-X/L_T) \quad (4.11)$$

R_s คือค่า Sheet resistance ของสารกึ่งตัวนำมีหน่วยโอห์ม/□



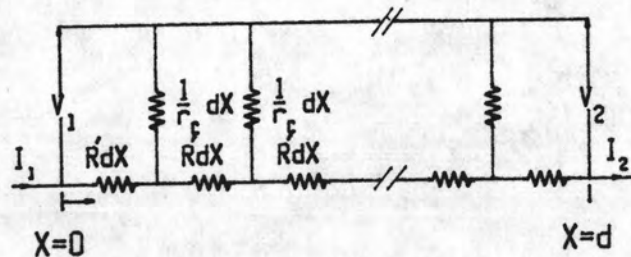
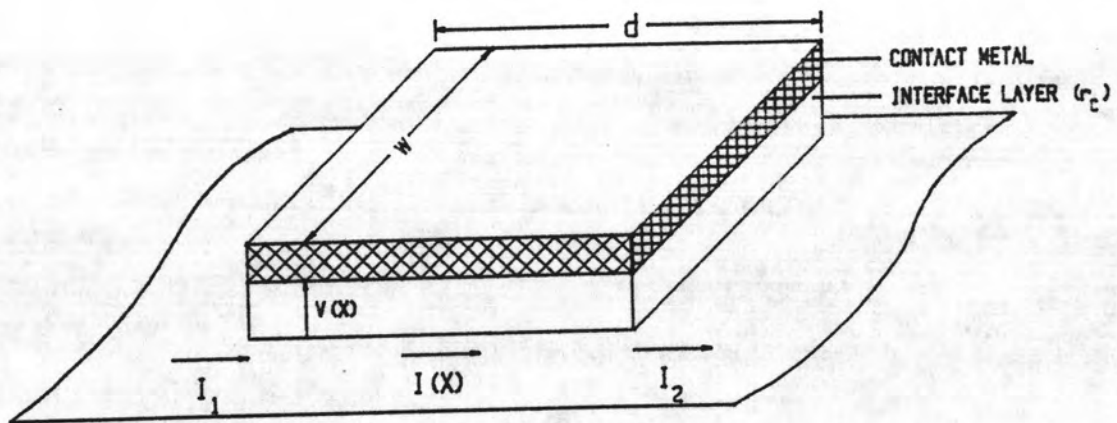
รูปที่ 4.4 วิธีการวัดค่าความต้านทานจำเพาะผิวสัมผัสด้วยวิธี Schöckley technique

4.4 วิธี Transmission line model (TLM) ⁽¹²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾

วิธี Transmission line model (TLM) สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองของการเปรียบเทียบผิวสัมผัสกับสายส่ง (Transmission line) ที่แสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่กระจายอยู่ใต้ผิวสัมผัสกับแรงดันขาเข้า V_1 และกระแสขาเข้า I_1 ดังนี้

$$V(x) = V_1 \cosh(\alpha x) - I_1 \cdot Z \sinh(\alpha x) \quad (4.12)$$

$$I(x) = I_1 \cosh(\alpha x) - \frac{V_1}{Z} \sinh(\alpha x) \quad (4.13)$$



รูปที่ 4.5 แบบจำลองที่ใช้ในอธิบายการวัดค่าความต้านทานจำเพาะผิวสัมผัสของวิธี Transmission line model (TLM) โดยค่า $R' = R_s / w$

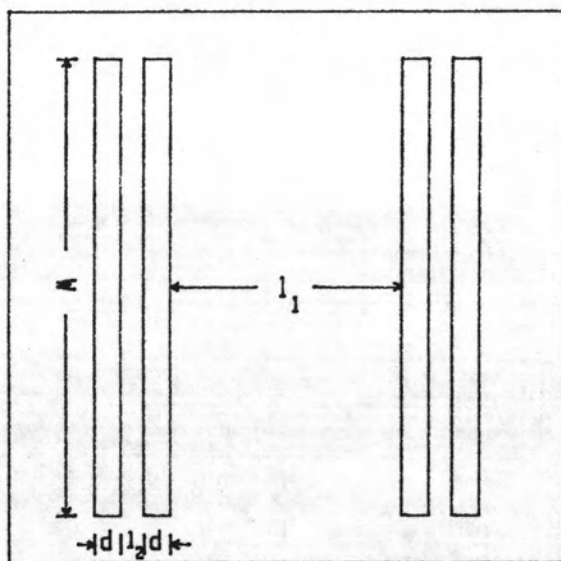
โดย Z คือ Characteristic impedance มีค่าตามสมการที่ (4.14)

$$Z = (r_c R_s)^{1/2} / w \quad (4.14)$$

w ค่า ความกว้างของผิวสัมผัสตามแสดงในรูปที่ 4.6

และ α คือ Propagation constant มีค่าตามสมการที่ (4.15)

$$\alpha = (R_s / r_c)^{1/2} \quad (4.15)$$



รูปที่ 4.6 แบบตัวอย่างที่ใช้ในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะผิวสัมผัสด้วยวิธี
Transmission Line Model (TLM)

หากกำหนดให้ค่า R_c และ R_T มีค่าตามสมการที่ (4.16) และ (4.17)

$$R_c = \left. \frac{V_1}{I_1} \right|_{I_2=0} = Z \coth(\alpha d) \quad (4.16)$$

$$R_T = \left. \frac{V_2}{I_2} \right|_{I_1=0} = Z / \sinh(\alpha d) \quad (4.17)$$

จากสมการที่ (4.16) และ (4.17) จะได้สมการที่ (4.18)

$$Z = \sqrt{\frac{R_c^2 - R_T^2}{}} \quad (4.18)$$

จากสมการที่ (4.16) แทนค่า V_1 ลงในสมการที่ (4.14) จะได้สมการที่ (4.19)

$$V(x) = \frac{I \cdot Z \cdot 2 \sinh(\alpha d/2 - \alpha x) \sinh(\alpha d/2)}{\sinh(\alpha d)} \quad (4.19)$$

ดังนั้น ค่าผลต่างของความต้านทานที่ตำแหน่ง $x=0$ และ $x=d$ จะมีค่าตามสมการที่ (4.20)

$$\frac{V(0)}{I} - \frac{V(d)}{I} = 2\Delta R_c = 2Z \tanh(\alpha d/2) \quad (4.20)$$

จากสมการที่ (4.18) และ (4.20) จะได้สมการที่ (4.21)

$$\alpha d = \operatorname{arctanh} \left[\frac{R_c}{R_T} \right] \quad (4.21)$$

จากสมการที่ (4.14) (4.15) และ (4.21) จะได้ค่า r_c ตามสมการที่ (4.22)

$$r_c = \frac{Z \cdot w \cdot d}{\alpha d} = \frac{\sqrt{R_c^2 - R_T^2} \cdot w \cdot d}{\operatorname{arctanh} \left[\frac{R_c}{R_T} \right]} \quad (4.22)$$

จากสมการที่ (4.22) ในการคำนวณหาค่า r_c นั้นยังขาดค่า R_c และ R_T ที่ยังหาค่าไม่ได้ แต่สามารถใช้วิธีการวัดเพื่อหาค่าได้จากรูปที่ 4.7 การวัดค่า V_1 ทำให้สามารถหาค่าที่สัมพันธ์กับตัวแปรอื่นๆตามสมการที่ (4.23)

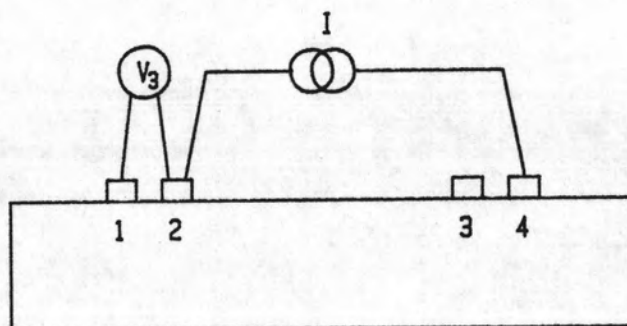
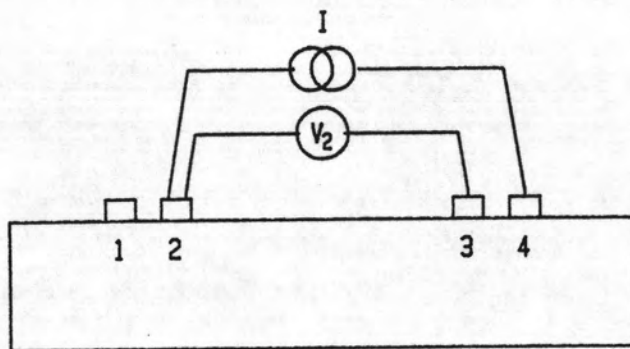
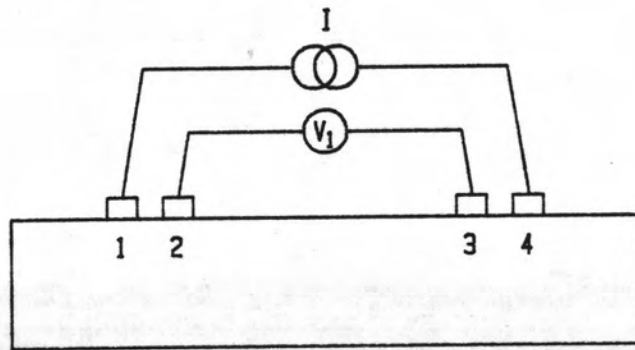
$$\frac{V_1}{I} = \frac{R_s \cdot I_1}{w} + \frac{2 \cdot Z \cdot \tanh \alpha d}{2} \quad (4.23)$$

หรือ
$$\frac{V_1}{I} = \frac{R_s(1+d)}{w} \quad (4.24)$$

การวัดค่า V_2 ทำให้สามารถหาค่าที่สัมพันธ์กับตัวแปรอื่นตามสมการที่ (4.25)

$$\frac{V_2}{I} = R_c + \frac{R_s \cdot l_1}{w} + Z \cdot \frac{\tanh \alpha d}{2} \quad (4.25)$$

หรือ
$$\frac{V_2}{I} = R_c + \frac{R_s(1+d)}{w} \quad (4.26)$$



รูปที่ 4.7 วิธีการวัดที่ใช้ในการคำนวณหา R_c และ R_T เพื่อใช้ในการวัดค่า r_c

จากสมการที่ (4.24) แทนค่า R_s ลงในสมการที่ (4.26) จะสามารถหาค่า R_c ตามสมการที่ (4.27)

$$R_c = \frac{V_2}{I} - \left[\frac{l_1 + d/2}{l_2 + d} \right] \frac{V_1}{I} \quad (4.27)$$

การวัดค่า V_3 ทำให้สามารถหาค่าที่สัมพันธ์กับตัวแปรอื่น ๆ ตามสมการที่ (4.28)

$$\frac{V_3}{I} = R_T \quad (4.28)$$