

บทที่ 7

สมบัติเชิงไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

ดังที่ได้เคยกล่าวแล้วว่าทฤษฎีแถบพลังงานของอิเล็กทรอนิกส์มีความสำคัญต่อความเข้าใจสมบัติของสาร กล่าวคือสามารถใช้โครงสร้างแถบพลังงานของอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อแบ่งชนิดของสารในเชิงไฟฟ้าออกเป็นโลหะ กึ่งโลหะ กึ่งตัวนำ และฉนวนไฟฟ้า ความสำคัญสำหรับสารกึ่งตัวนำ โครงสร้างแถบพลังงานมีลักษณะพิเศษแตกต่างจากสารชนิดอื่น กล่าวคือที่อุณหภูมิห้องจะมีอิเล็กตรอนเพียงเล็กน้อยอยู่ในแถบนำหรือมีโฮลจำนวนน้อยในแถบวาเลนซ์ และมีช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 3 eV ซึ่งทำให้ไม่นำไฟฟ้าได้ไม่สะดวก นอกจากนี้ระดับพลังงานสูงสุดของอิเล็กตรอนที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน (49,50) (thermal equilibrium) ซึ่งกำหนดโดยระดับเฟอร์มี (Fermi level) นั้นสามารถปรับระดับได้โดยการเติมสิ่งเจือปนทำให้เกิดพาหะอิสระ (carriers) สามารถนำไฟฟ้าได้ อันได้แก่อิเล็กตรอนในแถบนำและโฮลในแถบวาเลนซ์

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความหนาแน่นของพาหะอิสระ (carrier concentration) ดังกล่าวที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน สภาพนำไฟฟ้าและวิธีวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าซึ่งใช้กันโดยทั่วไปในสารกึ่งตัวนำ

7.1 ความหนาแน่นของพาหะอิสระที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน

การนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำขึ้นอยู่กับจำนวนของพาหะอิสระ เป็นประการสำคัญ กล่าวคือถ้าอิเล็กตรอนในแถบนำหรือจำนวนโฮลในแถบวาเลนซ์เพิ่มขึ้น สารกึ่งตัวนำนั้นจะนำไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้น สภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเนื่องจากอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์และ/หรือจากคู่อิเล็กตรอน-โฮล (donor) จะถูกกระตุ้นด้วยพลังงานความร้อน (Thermal energy) ให้ขึ้นไปยังแถบนำ และทิ้งที่ว่างไว้ในแถบวาเลนซ์ที่ว่างดังกล่าว เรียกว่า โฮล โอกาสที่อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นด้วยพลังงานเป็นไปตาม

ฟังก์ชันการแจกแจงของเฟอร์มี-ไดแรก (Fermi-Dirac distribution function) ดังนั้นถ้าอุณหภูมิยิ่งสูงขึ้นโอกาสที่จะมีอิเล็กตรอนอยู่ในแถบนำจะมากขึ้นตามลำดับ

ถ้ากำหนดให้ $N_C(E)dE$ เป็นจำนวนสถานะพลังงานในแถบนำต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่มีค่าพลังงานอยู่ระหว่าง E และ $E + dE$ ดังนั้น ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง E และ $E + dE$ ที่อุณหภูมิ T ใดๆ จะเท่ากับ^{8,51}

$$n(E)dE = N_C(E)f(E)dE \quad (7.1)$$

โดยที่

$$f(E) = \frac{1}{\exp[(E-E_F)/kT] + 1}$$

E_F คือ ระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi energy level)

k คือ ค่าคงที่โบลซ์มานน์ (Boltzmann constant)

T คือ อุณหภูมิในหน่วยของค่าเคลวิน (K)

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำคือ

$$n = \int_{E_C}^{\infty} n(E)dE = \int_{E_C}^{\infty} N_C(E)f(E)dE \quad (7.2)$$

เมื่อ E_C คือ สถานะพลังงานที่ขอบล่างสุดของแถบนำ

E_V คือ สถานะพลังงานที่ขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์ซึ่งในที่นี้ใช้เป็นระดับอ้างอิง

และ $N_C(E)$ คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงาน (density of states) ของแถบนำซึ่งแสดงด้วยสมการ

$$N_C(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_e}{\hbar^2}\right)^{3/2} (E - E_C)^{1/2} \quad (7.3)$$

เมื่อ m_e คือมวลยังผล (effective mass) ของอิเล็กตรอนในแถบนำแทนสมการที่ (7.3) ลงในสมการที่ (7.2) จะได้

$$n = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{2m_e}{\hbar^2} \right)^{3/2} \int_{E_C}^{\infty} \frac{(E - E_C)^{1/2}}{\exp[(E - E_F)/kT] + 1} dE \quad (7.4)$$

ถ้า $(E - E_F)/kT \gg 1$ แล้ว

$$n = 2 \left(\frac{m_e kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right)$$

$$n = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right) \quad (7.5)$$

เมื่อ $N_C = 2 \left(\frac{m_e kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2}$

ในทำนองเดียวกัน เราจะได้ความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์ดังสมการ

$$p = 2 \left(\frac{m_h kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{kT}\right)$$

$$p = N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{kT}\right) \quad (7.6)$$

โดยที่ $N_V = 2 \left(\frac{m_h kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2}$

m_h คือมวลยั้งผลของโฮลในแถบวาเลนซ์

ถ้าเอาสมการที่ (7.5) กับ (7.6) คูณกันจะได้

$$np = N_C N_V \exp(-E_g/kT) \quad (7.7)$$

สมการ (7.7) นี้เรียกว่า กฎของกิริยาเชิงมวล (mass action law) ซึ่งหมายถึงผลคูณของความหนาแน่นของพาหะอิสระทั้งสองชนิดมีค่าคงที่ที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง และไม่ขึ้นกับระดับพลังงานเฟอร์มี ถ้าความหนาแน่นของพาหะชนิดใดเพิ่มขึ้น พาหะอีกชนิดหนึ่งจะต้องลดลงคั้งนั้นในสารกึ่งตัวนำที่เป็นจริง (real crystal) จึงมีทั้งพาหะข้างมาก (majority carriers) และพาหะข้างน้อย (minority carriers)

7.1.1 สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินสิก (Intrinsic semiconductor)

สารกึ่งตัวนำที่เป็นผลึกสมบูรณ์ (perfect crystal) และไม่มีสิ่งเจือปน ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำจะเท่ากับความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์ นั่นคือ $n = p$ คั้งนั้นจากสมการที่ (7.7) เราจะได้

$$np = n_i^2 = N_C N_V \exp(-E_g/kT)$$

$$n_i = (N_C N_V)^{1/2} \exp(-E_g/2kT) \quad (7.8)$$

และระดับพลังงานเฟอร์มีจะเป็นไปตามความสัมพันธ์

$$E_F = E_{F_i} = \frac{1}{2} E_g + \frac{1}{2} kT \ln\left(\frac{N_V}{N_C}\right) \quad (7.9)$$

$$\text{หรือ} \quad E_{F_i} = \frac{1}{2} E_g + \frac{3}{4} kT \ln\left(\frac{m_h}{m_e}\right) \quad (7.10)$$

นั่นคือ ระดับพลังงานเฟอร์มี (E_{F_i}) ของสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินสิกจะอยู่ที่จุดกึ่งกลางของช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) และจะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิไม่มากนัก

7.1.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กซ์ทรินสิค (Extrinsic semiconductor)

เมื่อมีการเติมสิ่งเจือปนลงไปในผลึกสมบูรณ์ ความเป็นคาบหรือความเป็นระเบียบของผลึกจะถูกทำลาย อะตอมของสิ่งเจือปนนี้จะก่อให้เกิดระดับสิ่งเจือปน (impurity level) ขึ้นในช่องว่างแถบพลังงาน การเติมสิ่งเจือปนลงในสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดสารกึ่งตัวนำสองชนิดโดยขึ้นอยู่กับชนิดของสิ่งเจือปน ถ้าสิ่งเจือปนเป็นชนิดผู้รับ (acceptor impurity) ผลึกที่มีสิ่งเจือปนชนิดนี้เรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor) แต่ถ้าหากสิ่งเจือปนที่เติมลงไปเป็นชนิดผู้ให้ (donor impurity) ผลึกไม่สมบูรณ์ดังกล่าวนี้เรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) ถ้าสิ่งเจือปนที่ปรากฏในสารกึ่งตัวนำมีทั้งชนิดผู้ให้และผู้รับ สารกึ่งตัวนำนี้จะแสดงชนิดการนำไฟฟ้า (conductivity type) แบบใดขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพาหะข้างมาก (majority carrier concentrations) ว่าเกิดจากสิ่งเจือปนชนิดใด เมื่อมีการเติมสิ่งเจือปนลงไประดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำจะปรับระดับเพื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล ซึ่งความร้อน จากเงื่อนไขความเป็นกลางทางไฟฟ้าของระบบประจุทั้งหมดที่เกิดจากอิเล็กตรอนกับผู้รับที่ถูกไอออไนซ์ (ionized acceptors, N_A^-) จะต้องเท่ากับประจุบวกทั้งหมดที่เกิดจากโฮลและผู้ให้ที่ถูกไอออไนซ์ (ionized donors, N_D^+) ดังสมการ (48, 49, 50, 52)

$$n + N_A^- = p + N_D^+ \quad (7.11)$$

โดยที่ N_A^- คือความหนาแน่นของผู้รับที่ถูกไอออไนซ์

N_D^+ คือความหนาแน่นของผู้ให้ที่ถูกไอออไนซ์

จากสมการที่ (7.5), (7.6) และ (7.11) ถ้าความหนาแน่นของผู้ให้ (N_D) มากกว่าของผู้รับ (N_A) เราจะได้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำ (ดังรายละเอียดในภาคผนวก ก.) โดยประมาณคือ

$$n \approx \frac{(N_D - N_A)}{2N_A} N_C \exp(-E_d/kT) \quad (7.12)$$

เมื่อ $E_d = E_C - E_D$

ถ้าในกรณี $N_A \gg \frac{1}{2} N_C \exp(-E_d/kT)$ และ $N_D \gg N_A$ สมการที่ (7.12) จะกลายเป็น

$$n \approx \frac{1}{2} (N_D N_C)^{1/2} \exp(-E_d/2kT) \quad (7.13)$$

ในทำนองเดียวกัน ถ้าความหนาแน่นของผู้รับ (N_A) มากกว่าของผู้ให้ (N_D) ความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์โดยประมาณคือ

$$p \approx \left(\frac{N_A - N_D}{2N_D} \right) N_V \exp(-E_a/kT) \quad (7.14)$$

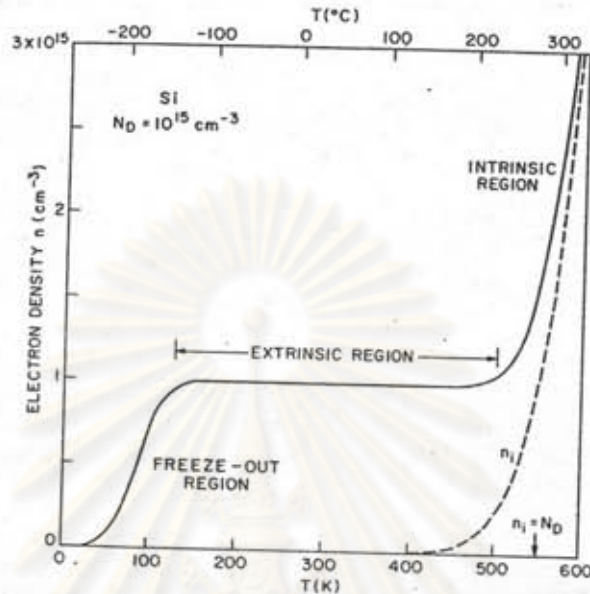
เมื่อ $E = E_A - E_V$

ถ้าในกรณี $N_D \gg \frac{1}{2} N_V \exp(-E_a/kT)$ และ $N_A \gg N_D$ สมการที่ (7.14) จะกลายเป็น

$$p \approx \frac{1}{2} (N_A N_V)^{1/2} \exp(-E_a/2kT) \quad (7.15)$$

จากรูปที่ 7.1 ที่อุณหภูมิค่า ๆ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำจะน้อยกว่าความหนาแน่นของสิ่งเจือปนชนิดผู้ให้ (N_D) เนื่องจากโอกาสที่อิเล็กตรอนจะถูกไอออไนซ์ด้วยพลังงานความร้อน (kT) มีค่าน้อย และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิช่วงนี้เรียกว่า ช่วงฟรีซ เอาท์ (freeze-out region) สำหรับช่วงอุณหภูมิปานกลาง (ประมาณ 100 - 500 K) ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนได้มาจากอะตอมของสิ่งเจือปนที่ถูกไอออไนซ์หมด ($n = N_D$) เรียกช่วงนี้ว่า ช่วงเอ็กซ์ทรินสิค (extrinsic region) และในช่วงอุณหภูมิสูง ๆ อิเล็กตรอนส่วนใหญ่เป็นของสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินสิคเองและเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ เรียกช่วงนี้ว่า

ช่วงอินทริสิก 48, 49, 50 (intrinsic region)



รูปที่ 7.1 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนกับส่วนกลับของอุณหภูมิของ Si ที่มีความหนาแน่นของสิ่งเจือปนชนิดผู้ให้เท่ากับ 10^{15} cm^{-3}

7.2 สภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮล

อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำจะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าที่ใส่เข้าไป เกิดการเคลื่อนที่กลายเป็นกระแสไฟฟ้า จากกฎของโอห์มสภาพนำไฟฟ้า (σ) คืออัตราส่วนของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อสนามไฟฟ้าที่ใส่เข้าไปดังสมการ

$$\sigma = \frac{J}{E} \quad (7.16)$$

โดยที่

$$J = nev \quad (7.17)$$

เมื่อ v คือความเร็วลอยเลื่อน (drift velocity) ของอิเล็กตรอน ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเนื่องจากอิเล็กตรอนในแถบนำคือ

$$\sigma = ne\mu_e \quad (7.18)$$

เมื่อ $\mu_e = \frac{v}{E}$ เรียกว่า สภาพเคลื่อนได้ (mobility) ของอิเล็กตรอน

สภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากโฮลในแถบวาเลนซ์คือ

$$\sigma = p\mu_h \quad (7.19)$$

เมื่อ μ_h คือสภาพเคลื่อนได้ของโฮล

ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำอื่นเนื่องมาจากอิเล็กตรอนและโฮลคือ

$$\sigma = ne\mu_e + p\mu_h \quad (7.20)$$

ในกรณีที่ เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนสิกสภาพนำไฟฟ้าจะเป็นไปตามสมการ

$$\sigma = N_c e (\mu_e + \mu_h) \exp(-E_g/2kT) \quad (7.21)$$

$$\text{หรือ } \ln \sigma = \ln [N_c e (\mu_e + \mu_h)] - \frac{E_g}{2k} \left(\frac{1}{T} \right) \quad (7.22)$$

จากสมการที่ (7.22) สภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนสิกจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิซึ่งเป็นสมบัติของสารกึ่งตัวนำที่ต่างไปจากสารชนิดอื่น ๆ ถ้าเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \sigma$ กับ $\frac{1}{T}$ จะได้เส้นตรงที่มีค่าความชัน (slope) เท่ากับ $-\frac{E_g}{2k}$ ดังนั้นจึงสามารถรู้ค่าของว่างแถบพลังงานได้โดยง่าย

สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นพาหะข้างมากจะเป็นอิเล็กตรอนในแถบนำ ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าโดยประมาณคือ

$$\sigma \approx ne\mu_e \quad (7.23)$$

แทนค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำ (n) จากสมการที่ (7.12) และ (7.13) ลงในสมการที่ (7.23) จะกลายเป็นสมการที่ (7.24) และ (7.25) ตามลำดับ

$$\sigma \approx e\mu_e \frac{(N_D - N_A)}{2N_A} \exp(-Ed/kT) \quad (7.24)$$

$$\text{และ } \sigma \approx e\mu_e \frac{(N_D N_C)^{1/2}}{\sqrt{2}} \exp(-Ed/2kT) \quad (7.25)$$

ถ้าเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \sigma$ กับ $\frac{1}{T}$ จะได้เส้นตรงที่มีค่าความชันเท่ากับ $\frac{Ed}{k}$ หรือ $\frac{Ed}{2k}$ ทำให้สามารถรู้ค่าพลังงานไอออไนซ์ของระดับพลังงานสิ่งเจือปนได้^{49,50} สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดที่สามารถที่จะหาค่าพลังงานไอออไนซ์ของระดับพลังงานสิ่งเจือปนได้ในตัวเองเดียวกัน

7.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า (51)

วิธีวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำกระทำได้หลายวิธีทั้งวิธีที่ใช้ส่วนของอุปกรณ์เข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่างและวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรง สำหรับวิธีที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็นวิธีที่ใช้การสัมผัสโดยผ่านกระแสเข้าไปในชิ้นสารตัวอย่างแล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุดบนชิ้นสารตัวอย่างนั้น วิธีต่าง ๆ เหล่านี้เป็นวิธีมาตรฐานที่ใช้กันอยู่ทั่วไปทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิด ขนาดและรูปร่างของสารตัวอย่าง สามารถจำแนกวิธีการต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้

7.3.1 วิธีวัดโดยตรง (Direct method)

วิธีนี้เป็นวิธีที่เก่าแก่ที่สุดที่ใช้วัดกับสารตัวอย่างรูปทรงกระบอกที่ทราบขนาดแน่นอนเมื่อวัดค่าความต้านทาน (R) ได้แล้วจึงคำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) ได้จาก

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad (7.26)$$

โดยที่ L คือความยาวของสวรตัวอย่าง

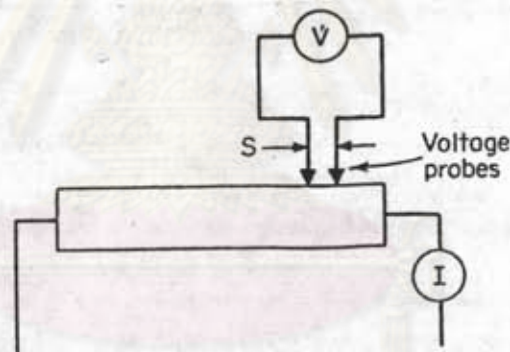
และ A คือพื้นที่หน้าตัดของสารตัวอย่าง

แต่ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้นี้จะรวมเอาค่าความต้านทานของรอยต่อ (contact

resistance) ระหว่างสารกึ่งตัวนำกับขั้วสัมผัส (probe) ที่ใช้เข้าไปด้วย ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้จึงไม่ถูกต้อง แต่เราสามารถที่จะลดผลของความต้านทานที่รอยต่อได้โดยเขียนกราฟระหว่างค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ากับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า จะพบว่าสภาพต้านทานไฟฟ้าค่อย ๆ ลดลงในขณะที่ความต่างศักย์เพิ่มขึ้นจนในที่สุดมีค่าคงที่ ค่าคงที่นี้คือสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่แท้จริง

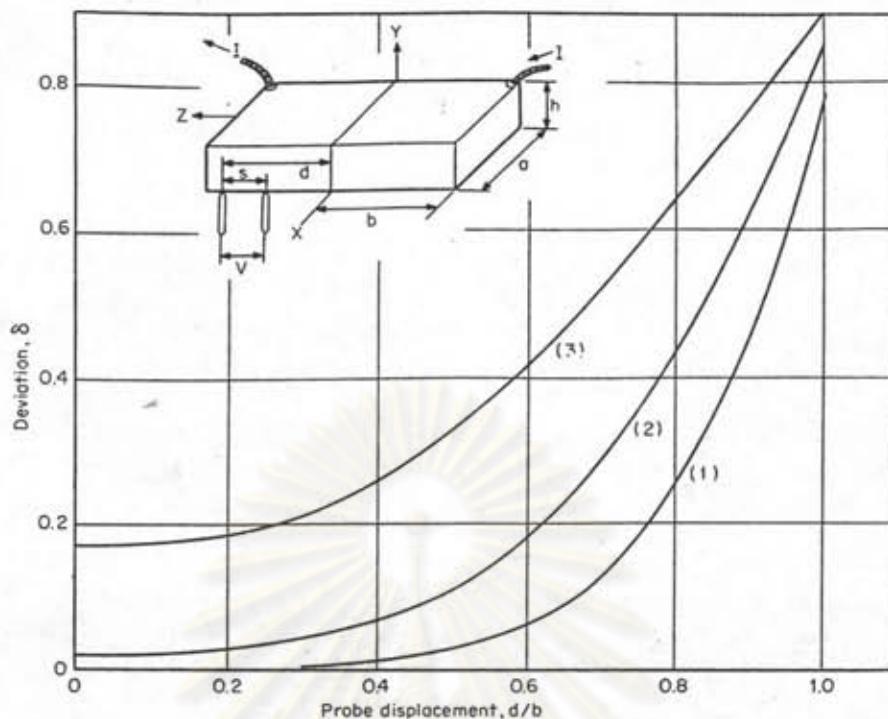
73.2. วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้ว (Two Points Probe method)

วิธีนี้จะขจัดปัญหาเรื่องความต้านทานที่รอยต่อออกไปได้จากพื้นที่หน้าตัดของสารกึ่งตัวนำที่ใช้วัดมีค่าคงที่และกระแสไฟฟ้าที่ใช้มีค่าไม่สูงนัก เพื่อป้องกันไม่ให้สารกึ่งตัวนำร้อนขึ้นซึ่งจะเป็นเหตุให้สภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าเปลี่ยนไป และโวลต์มิเตอร์ต้องมีค่าอิมพีแดนซ์สูง (high impedance) ดังปรากฏในรูปที่ 7.2



รูปที่ 7.2 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีขั้วปลายแหลมสองขั้ว

วิธีวัดจะกระทำโดยการวางขั้วสัมผัสของโวลต์มิเตอร์ไปบนแท่งสารกึ่งตัวนำที่ตำแหน่งต่าง ๆ โดยให้ห่างจากรอยต่อของโลหะ (ที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า) กับสารกึ่งตัวนำพอสมควร ถ้ารอยต่อมีสมบัติไม่คั่นกัน เส้นสัมผัสศักย์ (equipotential lines) จะบิดเบี้ยว (distorted) ณ บริเวณปลายทั้งสองข้างของแท่งสารกึ่งตัวนำ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวจึงเพิ่มความยาวของแท่งสารกึ่งตัวนำให้มากกว่าสามเท่าของความยาวของคานที่ยาวที่สุดที่ประกอบเป็นพื้นที่หน้าตัดของแท่งสารกึ่งตัวนำ ดังกราฟในรูปที่ 7.3



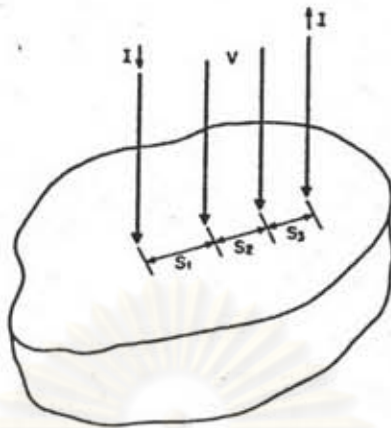
รูปที่ 7.3 กราฟแสดงการเบี่ยงเบน (δ) เนื่องจากสาเหตุของรอยตอ
กับระยะทางระหว่างหัวสัมผัส

7.3.3 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วตามแนวเส้นตรง (Linear Four-Point Probe method)

วิธีนี้ใช้กันอย่างกว้างขวางในโรงงานอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำ เพราะเป็นวิธีที่ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายให้กับชิ้นสารตัวอย่างที่นำมาวัด ยกเว้นกรณีออกแรงกดหัวสัมผัสมากเกินไป อาจจะเป็นเหตุให้ผิวหน้าของสารตัวอย่างเสียหาย วิธีนี้ใช้หัวสัมผัสสี่ขั้ววางเรียงอยู่ในแนวเส้นตรงเส้นเดียวกันให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านหัวสัมผัสคู่บน ส่วนหัวสัมผัสคู่ในทำหน้าที่วัดความต่างศักย์ที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 7.4

ถ้าคิดวสารตัวอย่างเป็นแบบเซมิ-อินฟินิต (semi-infinite) จะได้อาสมิตานทานไฟฟ้าเป็น

$$\rho = \frac{2\pi(V/I)}{[1/S_1 + 1/S_3 - 1/(S_1 + S_2) - 1/(S_2 + S_3)]} \quad (7.27)$$



รูปที่ 7.4 แสดงตำแหน่งของข้อสัมผัสตามวิธีวัดด้วยข้อปลายแหลมสี่ข้อในแนวเส้นตรง

เมื่อ V คือความต่างศักย์

และ I คือกระแสไฟฟ้า

ถ้าระยะห่างระหว่างข้อสัมผัสมีค่าเท่ากัน ($S_1 = S_2 = S_3$)

สมการที่ (7.27) จะกลายเป็น

$$\rho = 2\pi S \frac{V}{I} \quad (7.28)$$

นอกจากจะใช้กับสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบาง (sheet) โดยที่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมหรือวงกลมได้แล้วยังใช้กับสารตัวอย่างที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกตันหรือครึ่งทรงกระบอกตันอีกด้วย

7.3.4 วิธีวัดด้วยหัวสัมผัสที่ไม่อยู่ในแนวเส้นตรงเส้นเดียวกัน (Non-collinear Probe Spacing method)

วิธีนี้จะต่างกับวิธีที่ได้อธิบายมาแล้วตั้งแต่ต้นตรงที่การจัดวางตำแหน่งของหัวสัมผัสไม่อยู่ในแนวเดียวกันแต่จะเป็นรูปสี่เหลี่ยมแบบต่าง ๆ ตามลักษณะชิ้นสารตัวอย่าง หรือตามความเหมาะสมที่ผู้วัดเห็นสมควรดังรายละเอียดดังนี้

7.3.4.1 รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square Array) วิธีนี้ได้มีการค้นคว้าหาแฟกเตอร์ค่าแก้ที่เหมาะสมมากมายหลายวิธีเพื่อใช้กับสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางรูปร่างต่าง ๆ ถึงแม้ว่าจะไม่แพร่หลายเท่ากับวิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วในแนวเส้นตรงก็ตามที่ แต่ค่าที่วัดได้ก็ยังเป็นที่ยอมรับกันได้ สมการพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณคือ

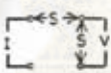



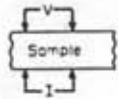
$$\rho = \frac{2\pi S}{2 - \sqrt{2}} \frac{V}{I} \quad (7.29)$$

7.3.4.2 รูปสี่เหลี่ยมคางหมู (Delta Four-Point Probe) เป็นวิธีหาสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่เป็นชั้นบาง ๆ (thin layer) ซึ่งมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าฐานรอง (substrate) ช่วงของสภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้จะขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นบาง ๆ นั้นและระยะห่างระหว่างหัวสัมผัสรวมทั้งความหนาและค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฐานรอง

4.3 หัวสัมผัสอยู่ด้านบน-ด้านล่าง (Over-Under Probe) วิธีนี้การวางตำแหน่งของหัวสัมผัสระหว่างขั้วที่โทกระแสไฟฟ้ากับขั้วที่วัดความต่างศักย์จะอยู่คนละด้านของสารกึ่งตัวนำที่เป็นชั้นบาง ๆ สมการที่ใช้ในการคำนวณค่อนข้างซับซ้อน ตัวอย่างของช่วงที่วัดได้คือ ถ้าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของชั้นบาง ๆ นี้อยู่ในขนาด 0.1 Ω -cm. ระยะห่างระหว่างหัวสัมผัสจะต้องน้อยกว่า 50 μ m. ถ้าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าสูงระยะห่างระหว่างหัวสัมผัสก็สามารถที่จะเพิ่มขึ้นได้

7.3.4.4 วิธีแวนเคอเพาว์ (Van der Pauw method) วิธีนี้ใช้กับสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางรูปร่างไม่แน่นอนแต่หนาสม่ำเสมอ โดยการวางขั้วสัมผัสที่อยู่ขอบของชิ้นสารตัวอย่างดังกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

จากวิธีการวัดทั้งหมดนี้แพคเกจที่สำคัญที่สุดที่จะเห็นเหตุให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้ผิดไปจากความเป็นจริงคือรอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าและออกจากสารกึ่งตัวนำซึ่งจะต้องเป็นรอยต่อที่ไม่ขัดขวางการไหลของกระแส (nonblocking contact) เพื่อให้ได้รอยตอดังกล่าวนี้นี้จะต้องเตรียมผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำให้เหมาะสมรวมทั้งชนิดและรูปร่างของขั้วสัมผัสจะต้องทำขึ้นจากวัสดุที่แข็งแรงปลายแหลมสามารถที่จะเจาะเข้าไปในเนื้อของสารกึ่งตัวนำได้โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายที่ผิวหน้าของชิ้นสารกึ่งตัวนำนั้น

Description	Geometry	Resistivity given by	Advantages
Square array		$\rho = \frac{2\pi S}{2 - \sqrt{2}} \frac{V}{I}$ $= 10.7 S \frac{V}{I}$	Given probe spacing will fit in smaller area
Square array		$R_s = \frac{2\pi}{\ln 2} \frac{V}{I}$ $= 9.06 \frac{V}{I}$	Given probe spacing will fit in smaller area
Rectangular		$\rho = \frac{2\pi S}{2 - (2/\sqrt{1 + n^2})} \frac{V}{I}$	
Random placement at periphery of uniform-thickness plate		See van der Pauw	Irregularly shaped samples can be measured without precalculated correction factors
Delta		See Delta	Can be used to measure thin high-resistivity layers on low-resistivity layers
Over-under		See Over-under	Can be used to measure thin high-resistivity layers on low-resistivity layers

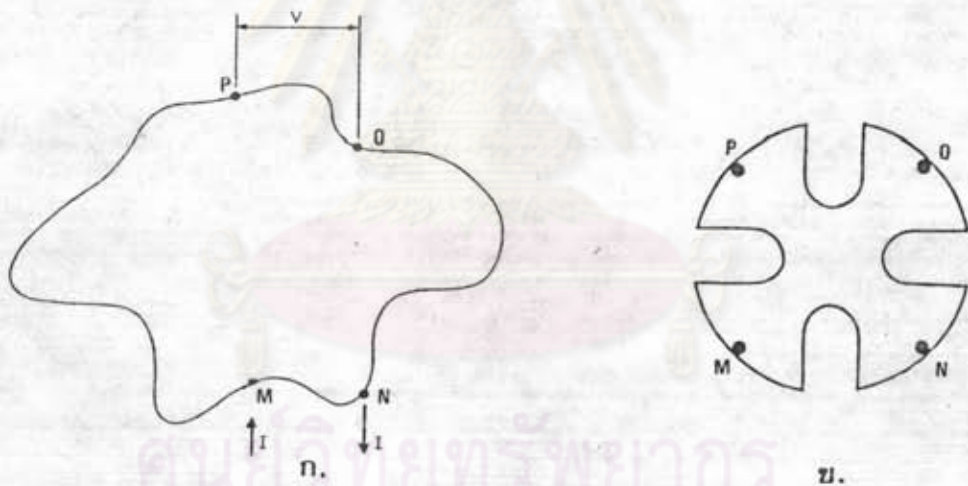
ตารางที่ 7.1 แสดงรายละเอียดในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีขั้วสัมผัสที่ไม่อยู่ในแนวเส้นตรงเส้นเดียวกัน

7.2.5 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีแวนเคอเพาว์ (53, 54)

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีของแวนเคอเพาว์นี้จะให้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำ ต้องเป็นไปตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. ขั้วสัมผัสจะต้องอยู่ที่ขอบของสารกึ่งตัวนำ
2. จุดสัมผัสต้องมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับขนาดของเส้นรอบรูปของสารตัวอย่าง
3. สารตัวอย่างต้องมีความหนาเท่ากันตลอด
4. เนื้อของสารตัวอย่างจะต้องสม่ำเสมอไม่มีรูหรือรอยแยกใด ๆ

การเพิ่มความยาวของเส้นรอบรูปของสารตัวอย่างจะช่วยลดความคลาดเคลื่อนของการวัดได้ ดังรูปที่ 7.5



รูปที่ 7.5 ก. แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่าง

ข. การเพิ่มความยาวของเส้นรอบรูปเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการวัด

จากรูปที่ 7.5 ถ้าให้กระแสไฟฟ้า I_{MN} ผ่านเข้าทางจุด M ออกทางจุด N เราสามารถที่จะวัดความต่างศักย์ $V_{PO} = V_P - V_O$ ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$R_{MN,OP} = \frac{V_P - V_O}{I_{MN}} \quad (7.30)$$

ถ้าเปลี่ยนให้กระแสไฟฟ้าเข้าทางจุด N และออกจากจุด O ก็จะได้ความสัมพันธ์คล้ายกับสมการที่ (7.30) คือ

$$R_{NO,PM} = \frac{V_M - V_P}{I_{NO}} \quad (7.31)$$

ทั้งสมการที่ (7.30) และ (7.31) จะปรากฏอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ดังนี้คือ

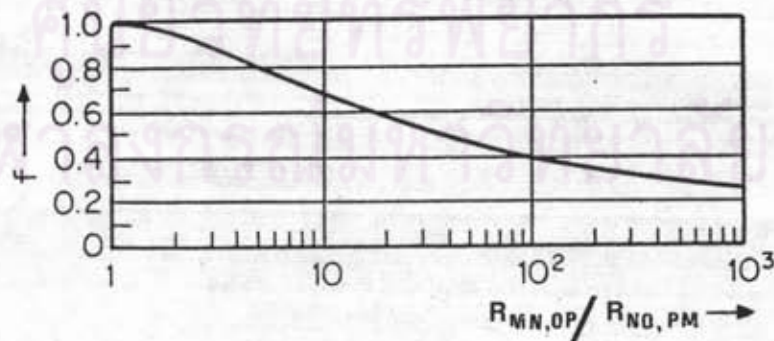
$$\exp\left(-\frac{\pi d}{\rho} R_{MN,OP}\right) + \exp\left(-\frac{\pi d}{\rho} R_{NO,PM}\right) = 1 \quad (7.32)$$

ซึ่ง d คือความหนาของชั้นสารตัวอย่าง

เพื่อให้ง่ายขึ้นสมการที่ (7.32) จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูป

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \frac{(R_{MN,OP} + R_{NO,PM})}{2} f\left(\frac{R_{MN,OP}}{R_{NO,PM}}\right) \quad (7.33)$$

โดยที่ f เป็นฟังก์ชันของ $(R_{MN,OP}/R_{NO,PM})$ เรียกว่า แฟกเตอร์ค่าแก้ (correcting factor) ดังปรากฏอยู่ในรูปที่ 7.6 ดังนั้นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจะหาได้โดยง่ายตามสมการที่ (7.33) ดังกล่าว



รูปที่ 7.6 แสดงแฟกเตอร์ค่าแก้ของการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธี

แวนเดอเพาว์