หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5
สมบัติเชิงไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

ที่อุณหภูมิต่ำมาก ๆ ผลึกสารกึ่งตัวนำจะประพฤติตัวเป็นฉนวน เพราะว่าแถบพลังงานมีลักษณะที่ว่าแถบวาเลนซ์มีอิเล็กตรอนประจุอยู่เต็ม แถบนำว่างเปล่า ดังนั้นจึงไม่มีอิเล็กตรอนอิสระสำหรับนำกระแสไฟฟ้า ตามทฤษฎีพันธะ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นพลังงานเนื่องจากความร้อนที่ผลึกได้รับจะทำให้พันธะโควาเลนซ์บางพันธะของอะตอมแยกออก อิเล็กตรอนที่อยู่ร่วมในพันธะจะหนีหลุดออกมาเป็นอิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่ไปได้ทั่วผลึก การขาดอิเล็กตรอนไปของพันธะโควาเลนซ์จะทำให้เกิดมีที่ว่างขึ้น ซึ่งเราเรียกว่าโฮลอะตอมขณะนี้จะมีสภาวะทางไฟฟ้าเป็นประจุบวก และจะพยายามดึงอิเล็กตรอนจากพันธะใกล้เคียงมาเติมลงในที่ว่างที่เกิดขึ้น ดังนั้นตำแหน่งที่ว่างนี้จึงเปรียบเสมือนประจุบวก เราจึงเห็นได้ว่าโฮลไม่ใช่ประจุบวก แต่เป็นช่องว่างที่ประพฤติตัวคล้ายประจุบวก โฮลจะพยายามรวมกับอิเล็กตรอน เพื่อให้อะตอมเป็นกลาง การรวมกันนี้เรียกว่า "เกิดรีคอมไบเนชัน (recombination)"

ทฤษฎีแถบพลังงานของอิเล็กตรอนมีความสำคัญต่อความเข้าใจสมบัติของสารสำหรับสารกึ่งตัวนำโครงสร้างแถบพลังงาน มีลักษณะนิเศษแตกต่างจากสารชนิดอื่นคือ ที่อุณหภูมิสูงขึ้นอิเล็กตรอนในแถบนำหรือจำนวนโฮลในแถบวาเลนซ์ จะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์และ/หรือจากผู้ให้ (donor) ในระดับพลังงานผู้ให้ที่เกิดจากความไม่สมบูรณ์ของผลึกถูกกระตุ้นด้วยพลังงานความร้อนย้ายสถานะพลังงานไปยังแถบนำแล้วทิ้งที่ว่างไว้ในแถบพลังงานเดิม ที่ว่างดังกล่าวนี้คือ โฮลนั่นเอง โอกาสที่อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นด้วยพลังงานความร้อนแล้วย้ายสถานะพลังงานจะเป็นไปตามฟังค์ชันการแจกของ เฟอร์มิ-ไดแรก (Fermi-Dirac distribution function) โดยทั่วไป การนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำขึ้นกับจำนวนของพาหะอิสระเป็นสำคัญ เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ไหล เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน และ/หรือ โฮลอิสระที่อยู่ในตัวนำนั้น ซึ่งกระแสไฟฟ้านี้มีอยู่สองแบบคือ กระแสที่เกิดจากการพัดพา (drift current) และกระแสที่เกิดจากการแพร่กระจาย (diffusion current) เป็นต้น กระแสที่เกิดจากการพัดพาเป็นกระแสที่ไหลในสารกึ่งตัวนำเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่ให้กับสารกึ่งตัวนำ จะบังคับให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปทางเดียวกัน และเช่นเดียวกัน โฮลจะเคลื่อนที่ในทิศตรงข้ามกับอิเล็กตรอน ค่ากระแสไฟฟ้าสุทธิจะเป็นผลรวมของกระแสอิเล็กตรอนกับกระแสโฮล ส่วนกระแสที่เกิดจากการแพร่กระจาย เกิดจากพาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำได้รับพลังงานความร้อน พลังงานที่เพิ่มขึ้นทำให้พาหะอิสระเคลื่อนที่แพร่กระจายออก กระแสที่เกิดจากการแพร่นี้สามารถตรวจวัดได้โดยวิธีขั้วความร้อน (hot-probe experiment) ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจึงเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ

ในบทนี้จะกล่าวถึง ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความไม่สมบูรณ์ของผลึก พาหะข้างมากและพาหะข้างน้อย สภาพนำไฟฟ้าและสภาพเคลื่อนได้ วิธีวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าซึ่งเน้นเฉพาะวิธีแวนเดอเพาว์ เพื่อนำไปใช้เป็นหลักการพื้นฐานในขั้นตอนวิธีทำการทดลอง และอธิบายผลการทดลองต่อไป

5.1 ความไม่สมบูรณ์ของผลึก [44,45]

ในทางทฤษฎี ผลึกทั่วไปจะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมหรือไอออนอยู่ภายในโครงผลึกมีลักษณะเป็นคาบ เพื่อให้มีค่าของพลังงานภายในโครงผลึกต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรน้อยที่สุด เพื่อรักษาสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า เพื่อให้สอดคล้องกับเรื่องทิศทางของผันธะ เพื่อให้แรงผลักระหว่างไอออนมีค่าสมดุล และเพื่อให้ การเรียงตัวของอะตอมหรือไอออนอยู่อย่างใกล้ชิดกันมากที่สุด เรื่องโครงสร้างผลึกที่กล่าวมาแล้วนี้เป็นกรณีของผลึกในอุดมคติที่สมบูรณ์ แต่ในโครงสร้างผลึกจริงตามธรรมชาติหรือผลึกที่มีการโด๊ปหรือผลึกที่มีสารอสุทธิปนอยู่นั้นมักมี การจัดเรียงตัวของอะตอมผิดไปจากตำแหน่งที่ควรจะอยู่หรือมีบางอะตอมหายไป จึงถือว่าผลึกนั้นเป็นผลึกไม่สมบูรณ์ซึ่งสามารถจำแนกเรื่องความไม่สมบูรณ์ของผลึก ตามลักษณะทางเรขาคณิตได้ดังนี้

5.1.1 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกในศูนย์มิติ

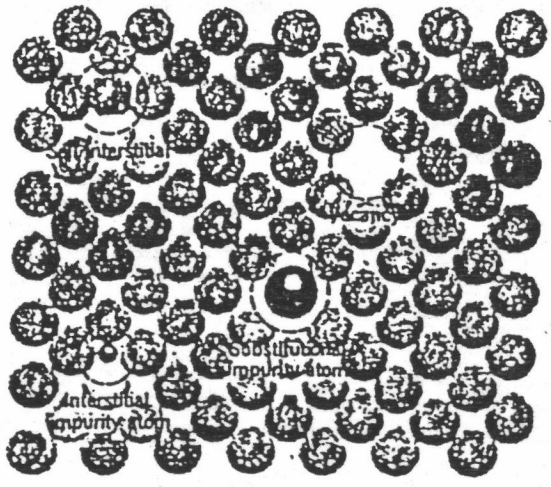
คือความไม่สมบูรณ์ในลักษณะเป็นจุด (point defect) ที่พบในผลึก โดยทั่ว ๆ ไป มีสาเหตุอยู่ 4 อย่าง ดังในรูปที่ 5.1

ก. มีอะตอมหายไปจากตำแหน่งที่ควรมีอะตอมอยู่เรียกว่า "เวเค็นซี (vacancy)"

ข. มีอะตอมเข้าไปอยู่ผิดที่คือ มีอะตอมเข้าไปอยู่ในตำแหน่งที่ควรจะเป็นที่ว่างแทนที่จะอยู่ ณ ตำแหน่งที่ควรอยู่ เรียกว่า "เซ็ลฟ์ อินเทอร์สทิเทียล (self interstitial)"

ค. มีอะตอมชนิดอื่นเข้าไปอยู่แทนที่ตำแหน่งอะตอมเดิม เรียกว่า "ซับสทิทูชันนัล อิมเพียวริตีอะตอม (substitutional impurity atom)"

ง. มีอะตอมชนิดอื่นเข้าไปแทรกอยู่ในตำแหน่งที่ควรเป็นที่ว่าง เรียกว่า "อินเทอร์สทิเทียล อิมเพียวริตีอะตอม (interstitial impurity atom)"

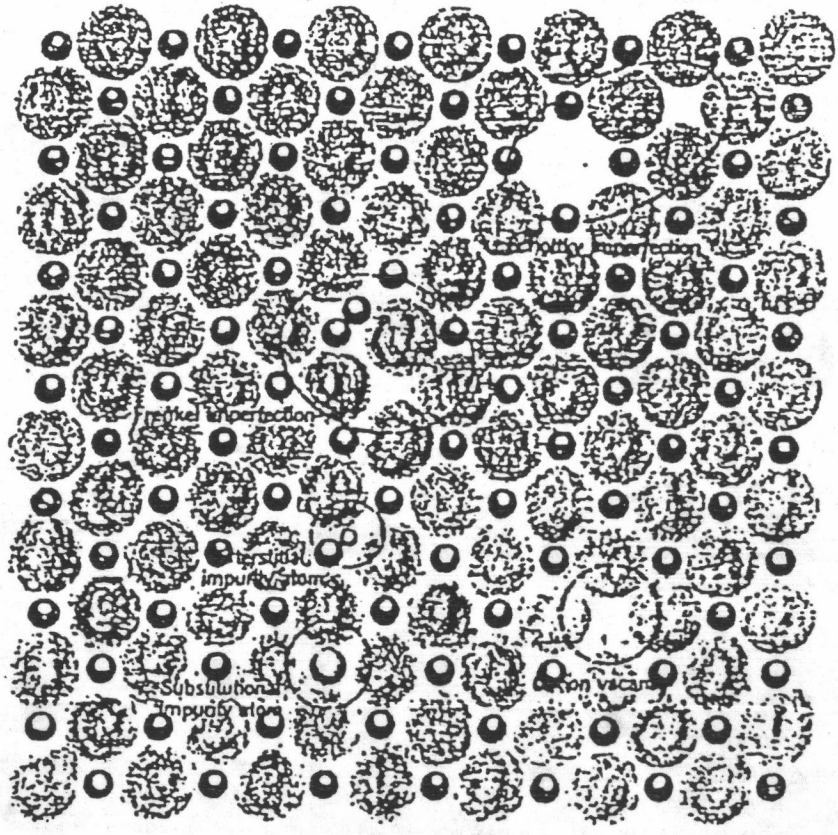


รูปที่ 5.1 แสดงลักษณะผลึกใน 2 มิติ ที่มีความไม่สมบูรณ์ในลักษณะเป็นจุด

สำหรับในผลึกแบบไอโอนิค (ionic crystal) ก็มีลักษณะความไม่สมบูรณ์ในลักษณะเป็นจุดมีสาเหตุอยู่ 2 อย่าง ดังในรูป 5.2

ก. มีไอออนเข้าไปอยู่ผิดที่ โดยเข้าไปอยู่ในตำแหน่งที่ควรเป็นที่ว่างแทนที่จะอยู่ ณ ตำแหน่งที่ควรอยู่ จึงเกิด 2 เหตุการณ์ร่วมกันคือ เกิดมีเวแคนซีร่วมกับอินเทอร์สทิเทียลอะตอม (interstitial atom) ซึ่งเรียกว่า "ความไม่สมบูรณ์แบบเฟรนเคล (Frenkel imperfection)" จากสาเหตุนี้ จึงทำให้โครงสร้างบิดเบี้ยวไปจากรูปแบบเดิม เพราะแรงทางไฟฟ้า

ข. มีไอออนบวกกับไอออนลบ หายไปจากตำแหน่งที่ควรมีไอออนพวกนี้อยู่จำนวนเท่า ๆ กัน เรียกว่า "ความไม่สมบูรณ์แบบชอตต์กี (Schottky imperfection)" จากสาเหตุนี้ก็ทำให้โครงสร้างบิดเบี้ยวได้อีกเช่นกัน



รูปที่ 5.2 แสดงลักษณะผลึกแบบไอโอนิคใน 2 มิติ ที่มีความไม่สมบูรณ์ในลักษณะจุดโดยที่

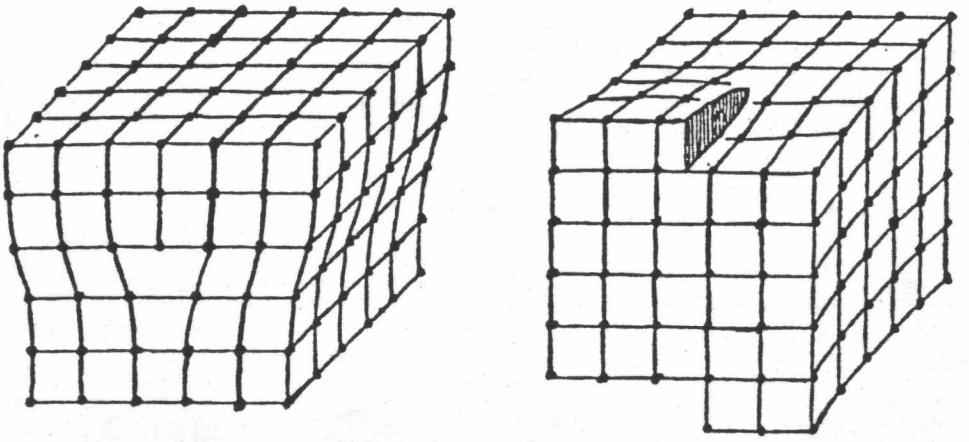
● แทนไอออนบวก ● แทนไอออนลบ

5.1.2 <u>ความไม่สมบูรณ์ของผลึกในหนึ่งมิติ</u>

คือความไม่สมบูรณ์ในลักษณะเป็นเส้น (line imperfection) เป็นความไม่สมบูรณ์ที่เกิดจากอะตอมของโครงผลึก ณ ที่จุดต่าง ๆ ที่อยู่ในแนวหรือแถวเดียวกัน ไม่อยู่ตามตำแหน่งที่ถูกต้อง ความไม่สมบูรณ์แบบนี้มี 2 แบบคือ

ก. การเคลื่อนของขอบ (edge dislocation) เกิดเมื่ออะตอมในแถวใดแถวหนึ่งของระนาบหายไปหรือแทรกเข้ามาอยู่ผิดปกติ ก็ทำให้บริเวณขอบของผลึกถูกอัดเข้ามาหรือดันออกไปจากแนวปกติซึ่งเกิดเนื่องมาจากลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกดังกล่าว ดังรูปที่ 5.3 ก

ข. การเคลื่อนแบบสกรู (screw dislocation) แบบนี้เกิดในลักษณะเหมือนถูกเฉือน แล้วดันส่วนหนึ่งให้ขึ้นไปด้านบน และกดอีกส่วนหนึ่งให้ต่ำลงมา ทำให้ขอบของผลึกมีแนวไม่ตรงกัน ดังรูปที่ 5.3 ข

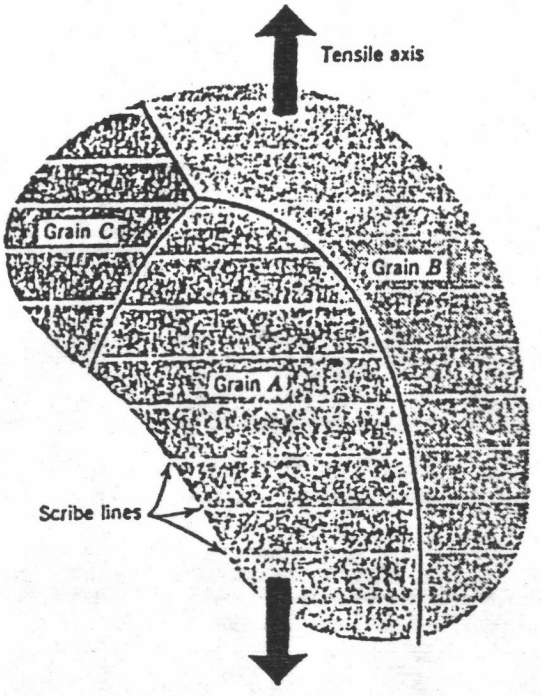


ก. ข.

รูปที่ 5.3 ก. แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกในลักษณะเป็นเส้นในแบบการเคลื่อนของขอบ
ข. แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกในลักษณะเป็นเส้นในแบบการเคลื่อนแบบสกรู

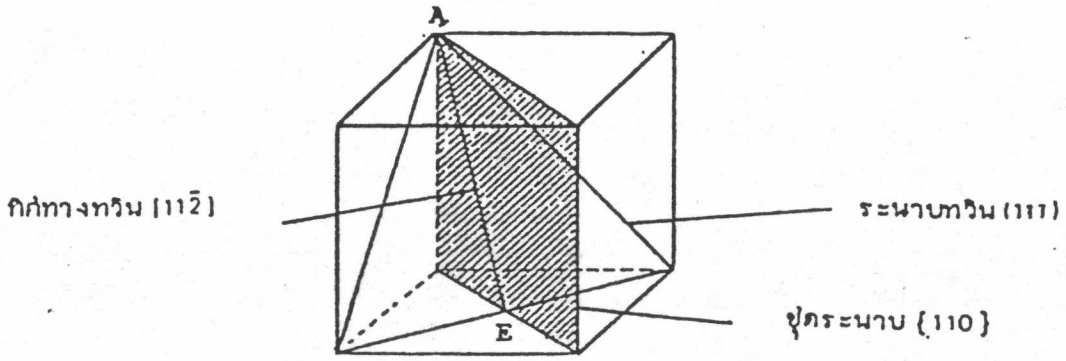
5.1.3 <u>ความไม่สมบูรณ์ของผลึกในสองมิติ</u>

คือความไม่สมบูรณ์บนพื้นผิว (surface imperfection) ความไม่สมบูรณ์บนพื้นผิวของโครงสร้างผลึกตามธรรมชาติ เกิดขึ้นเนื่องจากอะตอมมีการจัดเรียงตัวเปลี่ยนจากรูปแบบหนึ่งไปสู่อีกรูปแบบหนึ่งโดยผ่านเส้นขอบเขต (boundary) แต่ใน 3 มิติ พวกเส้นขอบเขตที่แบ่งรูปแบบการจัดเรียงตัวของอะตอมจากรูปแบบหนึ่งไปสู่อีกรูปแบบหนึ่งในผลึกก้อนเดียวกัน จะถูกเรียกว่า "เกรนบาวน์ดารี (grain boundary)" ดังรูปที่ 5.4 ซึ่งเป็นการแสดงภาพใน 2 มิติของความไม่สมบูรณ์บนพื้นผิว พร้อมทั้งแสดง เกรนบาวน์ดารี กับความไม่สมบูรณ์ของผลึกอื่น ๆ

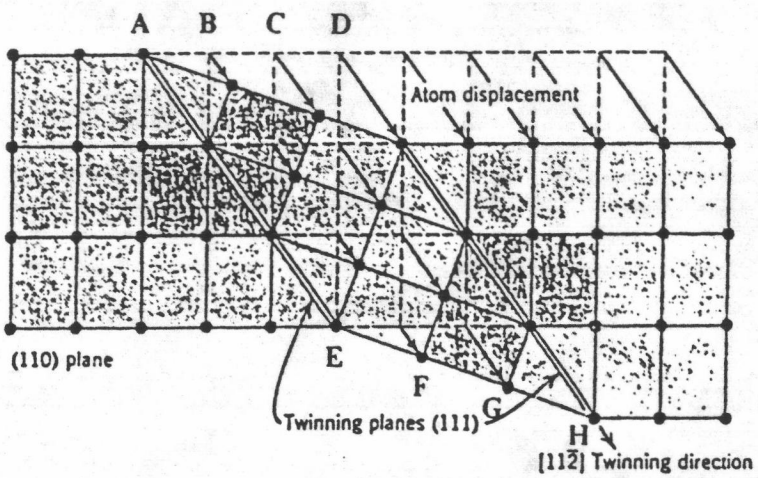


รูปที่ 5.4 ภาพแสดงความไม่สมบูรณ์ของผิวหน้าผลึก ที่แสดงให้เห็น
เกรนบาวน์ดารี และทิศทางการเลื่อนไปของเกรนบาวน์ดารี

จากความไม่สมบูรณ์บนพื้นผิวจึงมีระนาบที่แบ่งการเรียงตัวของอะตอมในผลึกเป็น 2 บริเวณ โดยมีสมมาตรแบบกระจก ลักษณะนี้จึงทำให้ผลึกมีลักษณะเป็น "ทวิน (twin)" ส่วนระนาบที่แบ่งการเรียงตัวของอะตอมในผลึก เรียกว่า "ระนาบทวิน (twin plane)" จึงมีลักษณะการเกิดในผลึกแบบ เฟสเซนเตอร์ คิวบิค ดังรูปที่ 5.5



ก

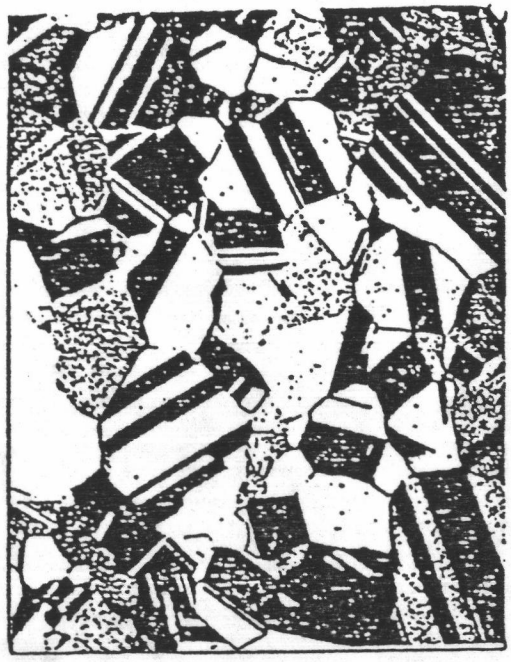


ข

รูปที่ 5.5 ก. แสดงระนาบทวิน และทิศทางของทวินในเฟสเซ็นเตอร์ คิวบิค แลททิส
ข. แสดงขบวนการการเกิดทวินในระนาบ (110) ในเฟสเซ็นเตอร์ คิวบิค แลททิส

ในขบวนการเกิดทวิน ในระนาบ (110) ซึ่งในที่นี้ให้เป็นระนาบของกระดาษ โดยจุดแลททิสบนระนาบ (111) ในบริเวณทวินมีการเคลื่อนในลักษณะที่มีแรงเฉือน (shear) มากระทำในทิศทาง [112] แล้วอะตอมตัวแรกจาก B ถึง F มีการเคลื่อนที่ 1/3 ของระยะทางระหว่าง

อะตอมในแนวตั้งและแนวนอน อะตอมตัวที่ 2 จาก C ถึง G มีการเคลื่อนที่ 2/3 ของระยะทางระหว่างอะตอมในแนวตั้ง และแนวนอน อะตอมตัวที่ 3 จาก D ถึง H มีการเคลื่อนที่เต็มหนึ่งหน่วยของค่าคงที่ โครงสร้างผลึกทั้งแนวตั้งและแนวนอนพอดี ถ้ามองในเนื้อของสารตรงบริเวณที่เป็นทวินจะเห็นเป็นแถบ ซึ่งเกิดจากการมีการเรียงตัวของอะตอมผิดจากบริเวณที่ล้อมรอบอยู่ ดังรูปที่ 5.6

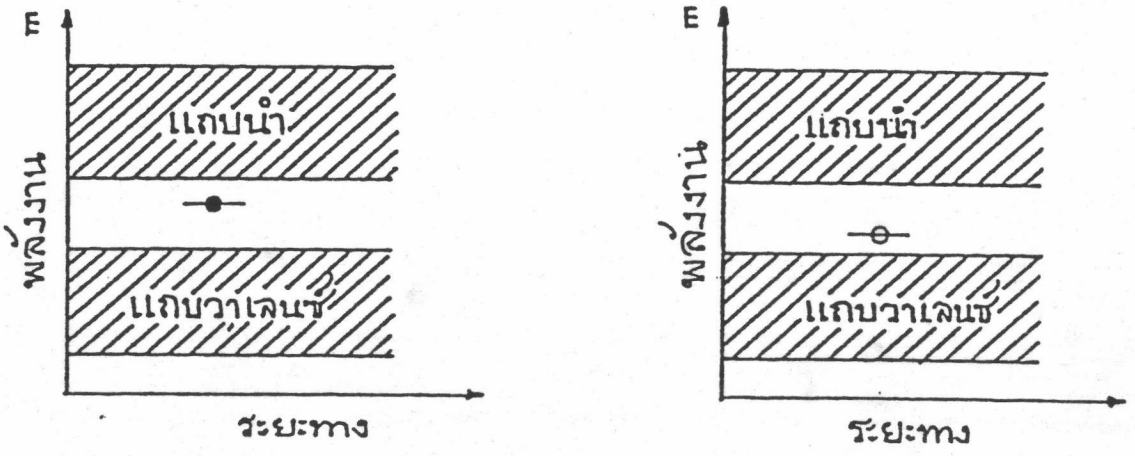


รูปที่ 5.6 แสดงภาพถ่ายของโลหะผสม 70% Cu, 30% Zn
แสดงให้เห็นแถบของการเกิดทวินในเกรนของผลึก

5.2 พาหะข้างมาก และพาหะข้างน้อย [5,12]

ตามปรกติแล้วจำนวนโฮล และอิเล็กตรอนที่เกิดจากพลังงานความร้อน จะมีจำนวนน้อยเกินกว่าที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างจริงจัง วิธีการทำให้จำนวนอิเล็กตรอนอิสระ และโฮลเพิ่มขึ้นอย่างมากเรียกว่า การโด๊ป (doping) ซึ่งหมายถึง การเติมอะตอมของสารอสุทธิ (impurity) ลงในผลึกสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ สารกึ่งตัวนำที่ถูกโด๊ปแล้วเรียกว่า สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ (extrinsic semiconductor) ลักษณะของการโด๊ปนั้นอาจแบ่งออกเป็นสามแบบคือ ถ้าการโด๊ปที่ต้องใช้สารอสุทธิน้อย เราเรียกว่า การโด๊ปต่ำ (low doping) ถ้าจำนวนสารอสุทธิมากพอสมควรการโด๊ปก็จะเป็นแบบปานกลาง (intermediate doping) และถ้า

จำนวนสารอสุทธิมาก การโด๊ปก็จะเข้าสู่การโด๊ปอย่างหนัก (heavy doping) สารกึ่งตัวนำที่ถูกโด๊ปด้วยสารอสุทธิมากเช่นนี้เรียกว่า สารกึ่งตัวที่ถูกโด๊ปอย่างหนัก เมื่อเรานำสารอสุทธิเติมเข้าไปในผลึกสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ สารอสุทธินี้จะเข้าไปแทนที่ตำแหน่งของอะตอมของโครงผลึก (lattice) อย่างไม่เป็นระเบียบหรือแบบสุ่ม (random) ความเป็นคาบหรือความเป็นระเบียบของผลึกจะถูกทำลายหรือหมดไป อะตอมของสารอสุทธิที่ใส่เข้าไปจะทำให้เกิดระดับสารอสุทธิ (impurity level) ในแถบพลังงานต้องห้าม การเติมสารอสุทธิลงในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ทำให้เกิด สารกึ่งตัวนำสองชนิด โดยขึ้นอยู่กับชนิดของสารอสุทธิ ถ้าสารอสุทธิเป็นชนิดรับ (acceptor impurity) ผลึกที่มีสารอสุทธิดังกล่าวเรียกว่า "สารกึ่งตัวนำชนิดพี" ถ้าหากสารอสุทธิที่เติมลงไปเป็นชนิดให้ (donor impurity) ผลึกที่มีสารอสุทธิดังกล่าวเรียกว่า "สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น" ตัวอย่างเช่น เมื่อเติมสารอสุทธิฟอสฟอรัส (P) ซึ่งเป็นธาตุกลุ่ม V มีอิเล็กตรอนวาเลนซ์ 5 ตัว ลงในสารกึ่งตัวบริสุทธิ์ Si สี่อิเล็กตรอนที่อยู่ใน P จะถูกนำไปใช้ทำให้เกิดพันธะซึ่งเป็นพันธะวาเลนซ์ (valence bond) ส่วนอิเล็กตรอนตัวที่เหลือจะหลุดออกจาก P เคลื่อนที่อยู่ภายในผลึก เราเรียกสารอสุทธิ P ว่าเป็น "ผู้ให้" เนื่องจากกระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอนที่หลุดจากสารอสุทธิ P เป็นประจุลบ เราจึงเรียกผลึกที่มีสารอสุทธิดังกล่าวว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ระดับพลังงานที่เกิดเนื่องจากสารอสุทธิ P ในสารกึ่งตัวนำชนิดนี้นั้นสามารถแสดงได้ด้วย ระดับพลังงานที่อยู่ต่ำกว่าแถบนำ ดังรูป 5.7 ก ทำนองเดียวกัน ถ้าเติมสารอสุทธิที่เป็นธาตุกลุ่ม III เช่น โบรอน (B) ลงใน Si โบรอนมีอิเล็กตรอนวาเลนซ์สามตัว ดังนั้นจึงขาดอิเล็กตรอนอีกหนึ่งตัวเพื่อนำไปทำพันธะวาเลนซ์เพื่อชดเชยการขาดแคลนดังกล่าว B จะต้องรับอิเล็กตรอนจากที่หนึ่งที่ใดในผลึก ผลของการกระทำดังกล่าวจะทำให้ผลึกเกิดโฮลขึ้น ด้วยเหตุนี้เราจึงเรียกสารอสุทธิ B ว่าเป็น "ผู้รับ" เนื่องจากกระแสที่ได้เกิดจากการเคลื่อนที่ของโฮล ซึ่งเป็นประจุบวก ออกจากอะตอม B เราจึงเรียกสารกึ่งตัวนำที่มีสารอสุทธิดังกล่าวว่าสารกึ่งตัวนำชนิดพี ระดับพลังงานของสารอสุทธิชนิดนี้ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.7 ข ซึ่งปรากฏเป็นระดับพลังงานที่อยู่เหนือแถบวาเลนซ์

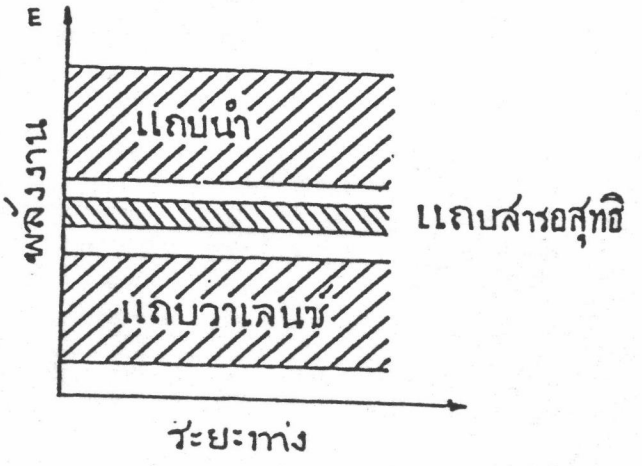


รูปที่ 5.7 ก. แสดงระดับพลังงานของสารอสุทธิแบบเอ็น ระดับพลังงานดังกล่าวจะอยู่ต่ำกว่าแถบนำ

ข. แสดงระดับพลังงานของสารอสุทธิแบบพี ซึ่งมีระดับพลังงานเหนือแถบวาเลนซ์

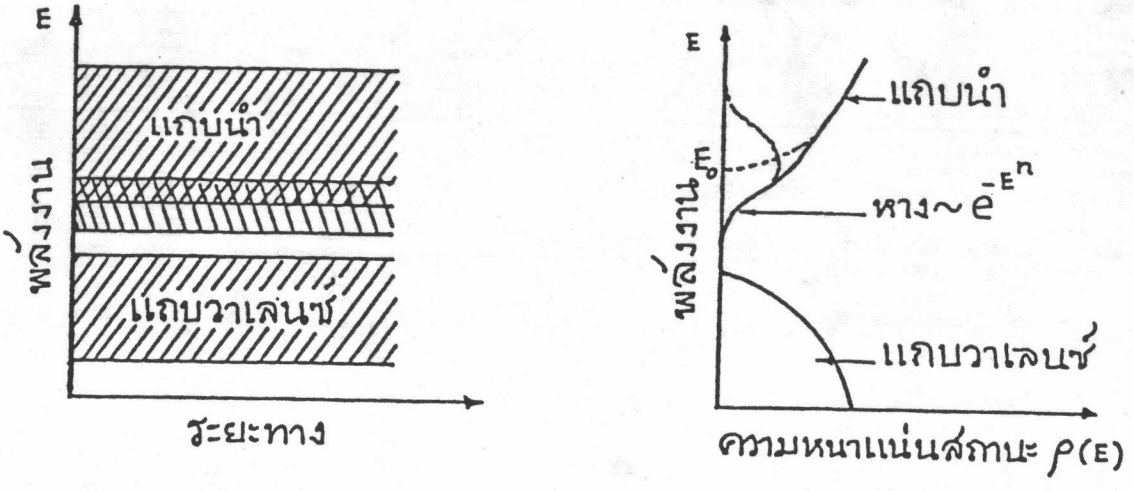
ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี โฮลซึ่งมีจำนวนมากกว่าจะเรียกว่า พาหะข้างมาก (majority carrier) ส่วนอิเล็กตรอนซึ่งมีจำนวนน้อยกว่า จะเรียกว่า พาหะข้างน้อย (minority carrier) ส่วนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น อิเล็กตรอนซึ่งมีจำนวนมากกว่า จะเป็นพาหะข้างมากและโฮล ซึ่งมีจำนวนน้อยกว่าจะเป็นพาหะข้างน้อย

การอธิบายที่ผ่านมาเราพิจารณาเฉพาะสารอสุทธิที่มีความเข้มข้นน้อย ดังนั้นไอออนของสารอสุทธิจะอยู่ห่างกันมาก จึงไม่กระทบกระเทือนหรือเกิดอันตรกิริยา (interaction) ซึ่งกันและกัน ระดับพลังงานของสารอสุทธิ จึงไม่เปลี่ยนแปลง ในกรณีนี้เราอาจสมมุติว่าไอออนของตัวรับและตัวให้ต่างก็อยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อนซึ่งกันและกัน ระดับพลังงานของสารอสุทธิในผลึกกึ่งตัวนำจึงมีลักษณะคล้ายกับระดับพลังงานของอะตอมไฮโดรเจน แต่จะแทรกอยู่ภายในแถบพลังงานต้องห้าม เมื่อเราเพิ่มความเข้มข้นของสารอสุทธิต่อไป จนกระทั่งสารอสุทธิเหล่านี้เริ่มกระทบกระเทือนซึ่งกันและกัน ในสถานะการณ์เช่นนี้ ระดับพลังงานของสารอสุทธิจะขยายกว้างออกกลายเป็นแถบสารอสุทธิ (impurity band) ดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 แสดงการปรากฏแถบสารอสุทธิแทรกอยู่ระหว่างแถบนำและแถบวาเลนซ์

ถ้าหากเราเพิ่มสารอสุทธิต่อไป แถบสารอสุทธิจะกว้างขึ้นไปอีก และจะเลื่อนเข้าใกล้แถบนำหรือแถบวาเลนซ์ ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารอสุทธิ สมมุติว่า เราพิจารณาเฉพาะแถบสารอสุทธิที่เกิดจากสารอสุทธิแบบเอ็น ถ้าศูนย์กลางของแถบสารอสุทธิเริ่มเคลื่อนเข้าไปในแถบนำ เราเรียกสารกึ่งตัวนำที่มีความเข้มข้นสารอสุทธิดังกล่าวว่า สารกึ่งตัวนำที่ถูกโด๊ปอย่างหนัก เนื่องจากแถบสารอสุทธิมีความกว้างขึ้น แถบสารอสุทธิที่อยู่นอกแถบนำจึงมีลักษณะคล้ายหาง (tail) ดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 ก. แสดงแถบสารอสุทธิเคลื่อนทับแถบนำ

ข. แสดงการเกิดหางขึ้นที่แถบนำ

ในการเติมสารอสุทธิทั้งสองดังกล่าว นอกจากจะเป็นวิธีการลดสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำให้น้อยลงแล้ว ยังเป็นการสร้างชนิดของสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำให้เป็นไปตามที่ต้องการอีกด้วย อันเป็นแนวทางที่สำคัญต่อการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

5.3 สภาพนำไฟฟ้าและสภาพเคลื่อนได้ [13,46]

จากกฎของโอห์ม (Ohm's law) กระแสไฟฟ้า I ที่ไหลในเส้นลวดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความต่างศักย์ที่ตกคร่อมความต้านทานซึ่งเขียนได้ดังสมการ

$$V = IR \tag{5.1}$$

เมื่อ R คือค่าความต้านทานของเส้นลวด ซึ่งขึ้นกับลักษณะรูปทรงของเส้นลวด เพื่อตัดการพิจารณาว่า ค่าความต้านทานของเส้นลวดขึ้นกับลักษณะรูปทรงของเส้นลวดทิ้ง จึงนิยามปริมาณหนึ่งที่ใช้แทนสมบัติของเส้นลวดนี้ขึ้นมาว่าเป็นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity; ρ) โดยมีนิยามว่า ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะเป็นอัตราส่วนของค่าสนามไฟฟ้าที่ใส่เข้าไปในโลหะต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามสมการ

$$\rho = \frac{E}{J} \tag{5.2}$$

โดยทั่วไปเรานิยามค่าสภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลว่าเป็นส่วนกลับของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ดังสมการ

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \tag{5.3}$$

เมื่อ σ คือสภาพนำไฟฟ้า เนื่องจากอิเล็กตรอนหรือโฮล

จากสมการ (5.2) และ (5.3) จะเขียนอีกแบบหนึ่งได้เป็น

$$\sigma = \frac{J}{E} \tag{5.4}$$

แต่สภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ก็ยังไม่สามารถวัดอัตราการชนกันของพาหะ (collision rate) ได้ถูกต้องนัก เนื่องจากอัตราการชนกันของพาหะขึ้นกับค่าอุณหภูมิ ดังนั้นจึงนิยามสภาพเคลื่อนได้ (mobility; μ) ของพาหะว่าเป็นอัตราส่วนของความเร็วลอยเลื่อน (drift velocity; v) ของอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำตอบสนองต่อค่าสนามไฟฟ้าที่ใส่เข้าไป แล้วเกิดการเคลื่อนที่กลายเป็นกระแสไฟฟ้าต่อค่าสนามไฟฟ้าที่ใส่เข้าไป ซึ่งเขียนได้ดังสมการ

$$\mu = \frac{v}{E} \qquad (5.5)$$

เมื่อ E คือค่าสนามไฟฟ้าที่ใส่เข้าไป

ถ้าพาหะมีความหนาแน่นเท่ากับ n, มีประจุเท่ากับ e แล้วค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (current density) จะมีค่าเป็น

$$J = nev \qquad (5.6)$$

ดังนั้นค่าสภาพนำไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์กับสภาพเคลื่อนได้ตามสมการ

$$\sigma = ne\mu \qquad (5.7)$$

สภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเนื่องจากอิเล็กตรอนในแถบนำคือ

$$\sigma = ne\mu_e \qquad (5.8)$$

เมื่อ $\mu_e = \frac{v}{E}$ คือสภาพเคลื่อนได้ของอิเล็กตรอน

สภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากโฮลในแถบวาเลนซ์คือ

$$\sigma = pe\mu_h \qquad (5.9)$$

เมื่อ μ_h คือสภาพเคลื่อนได้ของโฮล

เพราะฉะนั้นสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลคือ

$$\sigma = ne\mu_e + pe\mu_h \qquad (5.10)$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น พาหะข้างมากจะเป็นอิเล็กตรอนในแถบนำ ดังนั้น สภาพนำไฟฟ้าโดยประมาณคือ

$$\sigma \simeq ne\mu_e \qquad (5.11)$$

ทำนองเดียวกัน สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดพีพาหะข้างมากจะเป็นโฮลในแถบวาเลนซ์ ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าโดยประมาณคือ

$$\sigma \simeq pe\mu_h \qquad (5.12)$$

ค่าสภาพเคลื่อนได้ จะมีค่าลดลงเมื่อ ความหนาแน่นของพาหะ (doping concentration) เพิ่มขึ้นเนื่องจากจะมีการชนกันของประจุของสารอสุทธิ (charge impurities) มากขึ้น นอกจากนี้ค่าสภาพเคลื่อนได้ของพาหะจะลดลง เมื่ออุหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากการสั่นของแลททิสที่เกิดจากพลังงานความร้อน (thermal vibration of the lattice) จะทำให้พาหะเกิดการกระเจิงมากขึ้นด้วย ซึ่งจะไม่กล่าวถึงรายละเอียดสำหรับงานวิจัยนี้ เนื่องจากเราพิจารณาหาค่าสภาพนำไฟฟ้า และสภาพเคลื่อนได้จากค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดโดยวิธีแวนเดอเพาว์ ด้วยการใช้สมการที่ (5.3), (5.11) และ (5.12) เท่านั้น

5.4 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า [47]

วิธีวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสามารถทำให้ได้หลายวิธีทั้งวิธีที่ใช้ส่วนของอุปกรณ์เข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง และวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรง แต่ข้อเสียของวิธีที่ใช้ส่วนของอุปกรณ์เข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่างก็คือ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้นี้จะรวมเอาค่าความต้านทานของรอยต่อ (contact resistance) ระหว่างสารกึ่งตัวนำกับขั้วสัมผัส (probe) ที่ใช้เข้าไปด้วย ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้จึงไม่ถูกต้อง ด้วยเหตุนี้เองงานวิจัยของเราที่จะกล่าวถึงต่อไปจึงเลือกใช้วิธีที่ไม่ต้องใช้ส่วนของอุปกรณ์สัมผัสกับชิ้นสารกึ่งตัวนำโดยตรง ด้วยการสร้างขั้วสัมผัสโลหะ ขึ้นบนผิวหน้าของชิ้นสารกึ่งตัวนำที่อาจมีลักษณะเป็นแท่ง (bar) ทรงกระบอก แผ่นวงกลม แผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือผืนผ้า หรือแผ่นบาง ๆ รูปร่างใด ๆ ก็ได้ ตามความเหมาะสมของวิธีการวัด แต่อย่างไรก็ตาม สิ่งสำคัญที่สุดก็คือ รอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสโลหะ กับสารกึ่งตัวนำจะต้องเป็น

รอยต่อที่ไม่ขัดขวางการไหลของกระแส (nonblocking contact) ด้วย ซึ่งทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิด ขนาด และตำแหน่งของขั้วสัมผัสบนสารกึ่งตัวนำ รวมทั้งขนาด และรูปร่างของสารกึ่งตัวนำอีกด้วย สำหรับวิธีวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้ใช้หลักการที่ว่า เมื่อผ่านกระแสเข้าไปในชิ้นสารตัวอย่างแล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุดบนชิ้นสารตัวอย่างนั้นที่อุณหภูมิห้อง และวัดค่าความหนาของสารตัวอย่าง ต่อจากนั้นจึงนำผลที่ได้มาคำนวณหาค่า สภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำนั้นต่อไป

เราสามารถจำแนกวิธีการ วัดสภาพต้านทานไฟฟ้าได้หลายวิธีดังนี้

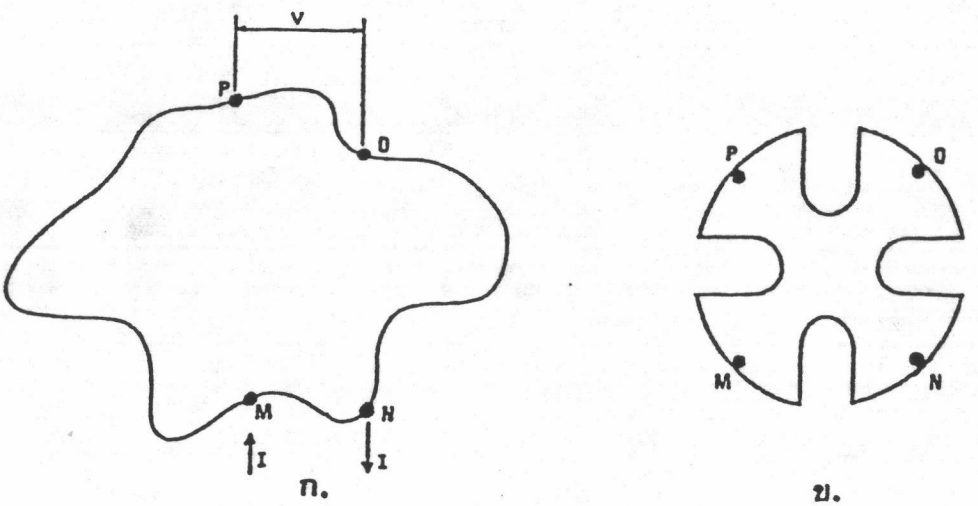
1. วิธีวัดโดยตรง (Direct method)
2. วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้ว (Two points probe method)
3. วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วตามแนวเส้นตรง (Linear four-point probe method)
4. วิธีวัดด้วยขั้วสัมผัสที่ไม่อยู่ในแนวเส้นตรงเส้นเดียวกัน (Non-collinear probe spacing method) เป็นวิธีที่การจัดวางตำแหน่งของขั้วสัมผัสจะเป็นไปตามลักษณะชิ้นสารตัวอย่าง หรือตามความเหมาะสมที่ผู้จัดเห็นสมควรได้แก่
   4.1 รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square array)
   4.2 รูปสี่เหลี่ยมคางหมู (Delta four-point probe)
   4.3 ขั้วสัมผัสอยู่ด้านบน-ด้านล่าง (Over-under probe)
   4.4 วิธีแวนเดอเพาว์ (Van der Pauw method)

สำหรับงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะวิธีแวนเดอร์เพาว์ [47,48,49] เท่านั้นเนื่องจากวิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้กับสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบาง รูปร่างไม่แน่นอน มีความหนาสม่ำเสมอ โดยการวางขั้วสัมผัสให้อยู่ที่ขอบของชิ้นสารตัวอย่าง รอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าและออกจากสารกึ่งตัวนำ จะต้องเป็นรอยต่อที่ไม่ขัดขวางการไหลของกระแส (nonblocking contact) เพื่อให้ได้รอยต่อแบบนี้จึงต้องเตรียมผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำให้เหมาะสม รวมทั้งชนิดและรูปร่างของขั้วสัมผัส จะต้องทำขึ้นจากวัสดุที่แข็งแรง มีปลายแหลมสามารถแตะสัมผัสกับขั้วสัมผัสโลหะที่อยู่บนผิวของสารกึ่งตัวนำได้โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายที่ผิวหน้าของชิ้นสารกึ่งตัวนำนั้น

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีนี้จะให้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำ โดยจะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. ขั้วสัมผัสต้องมีสมบัติที่ดี มิฉะนั้นจะทำให้เส้นสมศักย์ (equipotential lines) บิดเบี้ยว (distorded) ไปและยังช่วยลดปัญหาเรื่องความต้านทานที่รอยต่อด้วย

2. ขั้วสัมผัสจะต้องอยู่ที่ขอบของสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าสภานต้านทานไฟฟ้ามาจากสมมุติฐานว่าสารตัวอย่างเป็นแบบเซมิอินฟินิต (semi-infinite) กล่าวคือ คิดว่ากระแสที่ไหลและค่าความต่างศักย์ที่วัดได้บนชิ้นสารตัวอย่างเสมือนกับอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน
3. จุดสัมผัสต้องมีขนาดเล็กมาก ๆ เมื่อเทียบกับขนาดของเส้นรอบรูปของสารตัวอย่าง ทั้งนี้เพื่อให้สอดคล้องกับเหตุผลตามข้อ 2
4. สารตัวอย่างต้องมีความหนาเท่ากันตลอด
5. เนื้อของสารตัวอย่างจะต้องสม่ำเสมอไม่มีรูหรือรอยแยกใด ๆ
6. ต้องไม่ออกแรงกดขั้วสัมผัสมากเกินไปเพราะอาจทำให้ผิวหน้าของสารตัวอย่างเสียหาย แตกร้าว
7. ไม่ควรใช้กระแสไฟฟ้าที่มีค่าสูงมากเกินไปนัก เพื่อป้องกันไม่ให้สารกึ่งตัวนำร้อนขึ้นซึ่งจะทำให้ค่าสภานต้านทานไฟฟ้ามีค่าผิดไป นอกจากนี้โวลต์มิเตอร์ต้องมีค่าอิมพิแดนซ์สูง (high impedance) ด้วย
8. รอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสโลหะกับสารกึ่งตัวนำควรเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิกที่ดี
9. การเพิ่มความยาวของเส้นรอบรูปของสารกึ่งตัวนำจะช่วยลดความคลาดเคลื่อนของการวัดสภานต้านทานไฟฟ้าได้ ดังแสดงในรูป 5.10



รูปที่ 5.10 ก. แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่าง
ข. การเพิ่มความยาวของเส้นรอบรูปเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการวัด

พิจารณารูปที่ 5.10 ถ้าให้กระแสไฟฟ้า I_{MN} ผ่านเข้าทางจุด M ออกทางจุด N เราสามารถวัดความต่างศักย์ $V_{PO} = V_P - V_O$ และจะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$R_{MN,OP} = \frac{V_P - V_O}{I_{MN}} \tag{5.13}$$

เมื่อเปลี่ยนให้กระแสไฟฟ้าเข้าทางจุด N และออกทางจุด O ก็จะได้ความสัมพันธ์คล้ายกับสมการที่ (5.13) คือ

$$R_{NO,PM} = \frac{V_M - V_P}{I_{NO}} \tag{5.14}$$

ทั้งสมการที่ (5.13) และ (5.14) จะปรากฏอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ดังนี้คือ

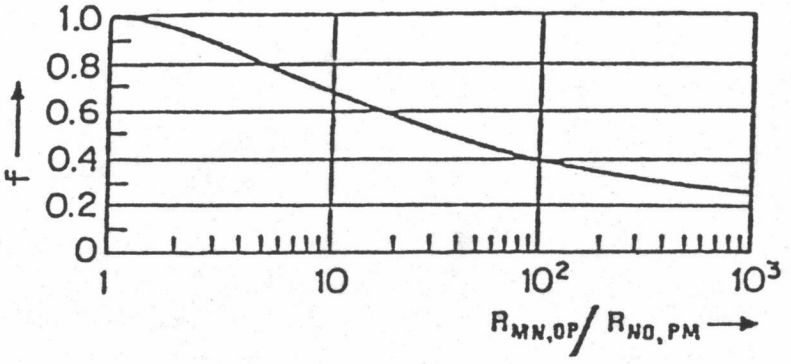
$$\exp\left(-\frac{\pi d}{\rho} R_{MN,OP}\right) + \exp\left(-\frac{\pi d}{\rho} R_{NO,PM}\right) = 1 \tag{5.15}$$

ซึ่ง d คือ ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง

โดยการจัดรูปสมการที่ (5.15) ใหม่จะได้ว่า

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \frac{(R_{MN,OP} + R_{NO,PM})}{2} f\left(\frac{R_{MN,OP}}{R_{NO,PM}}\right) \tag{5.16}$$

เมื่อ f เป็นฟังค์ชันของ $\left(\frac{R_{MN,OP}}{R_{NO,PM}}\right)$ เรียกว่าแฟคเตอร์ค่าแก้ (correcting factor) ตามที่ปรากฏอยู่ในรูปที่ 5.11 นั่นคือเราสามารถหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำได้ถูกต้องยิ่งขึ้นโดยอาศัยตารางแฟคเตอร์ค่าแก้ดังแสดงอยู่ในภาคผนวก ก. และสมการที่ (5.16)



รูปที่ 5.11 แสดงแฟคเตอร์ค่าแก้ของการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอเพาว์

มีผู้รายงานเกี่ยวกับ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ที่วัดโดยวิธีแวนเดอเพาว์ (ρ) ค่าสภาพนำไฟฟ้า (σ) และค่าสภาพเคลื่อนได้ (μ) ที่คำนวณจากค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดโดยวิธีแวนเดอเพาว์ ที่อุณหภูมิห้อง ดังแสดงอยู่ในตารางที่ 5.1

ชื่อ สารประกอบกึ่งตัวนำ	ชนิด สารประกอบกึ่งตัวนำ	ความหนาแน่นของพาหะ ($cm.^{-3}$)	สภาพต้านทานไฟฟ้า(ρ) (Ω-cm)	สภาพนำไฟฟ้า(σ) (s/cm)	สภาพเคลื่อนได้(μ) ($cm^2.V^{-1}.S^{-1}$)	เอกสารอ้างอิง
$CuInSe_2$	p	$2x10^{16}$	5.0	0.2	60	30
$CuInSe_2$	n	$1.1x10^{16}$-$3.1x10^{17}$	5.0 - 0.02	0.2 - 45.1	100 - 910	27,36
$CuInSe_2$(In 0.3%)	n	$5x10^{15}$-$1.5x10^{17}$	10.0 - 0.05	0.1 - 19.2	140 - 800	51
$CuInSe_2$(Se 0.3%)	p	$1.5x10^{16}$-$2.0x10^{17}$	1.1 - 0.1	0.9 - 11.5	312 - 379	22
$CuInSe_2$(Se 0.3%)	n	$1.5x10^{16}$-$2.0x10^{17}$	2.5 - 0.2	0.4 - 5.4	156 - 167	22
$CuInSe_2$(Cu 0.3%)	p	-	-	-	-	-
GaAs ที่โด๊ปด้วย Si	n	$3.2x10^{18}$-$4.8x10^{18}$	0.0019-0.0010	526.3-1000.0	1041-1326	-

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดโดยวิธีแวนเดอเพาว์ (ρ) ค่าสภาพนำไฟฟ้า (σ) และค่าสภาพเคลื่อนได้ (μ) ที่คำนวณจาก ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดโดยวิธีแวนเดอเพาว์ ที่อุณหภูมิห้อง