บทที่ 4

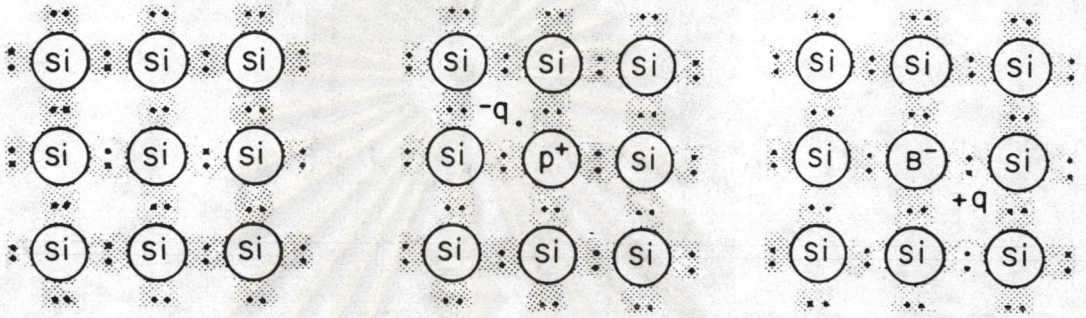
รอยต่อพี-เอ็นเบื้องต้น

สารกึ่งตัวนำทุกชนิดมีสมบัติพิเศษคือ สามารถเปลี่ยนสภาพการนำไฟฟ้าได้ โดยการเติมสารเจือ (impurities) เข้าไป การเติมสารเจือดังกล่าวจะมีผลให้ความหนาแน่นพาหะ (carrier concentration) ได้แก่อิเลกตรอน และโฮล (holes) ซึ่งเป็นเงื่อนไขสำคัญของสมบัติเชิงไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป เราอาจพิจารณาชนิด (type) ของสารได้จากชนิดของพาหะส่วนมาก (majority carrier) ในสารนั้น การเติมสารเจือเข้าไปทำให้สามารถประกอบเป็นอุปกรณ์กึ่งตัวนำต่าง ๆ ได้ ในบทนี้จะได้กล่าวถึงความหนาแน่นของพาหะดังกล่าวในสารกึ่งตัวนำ และรอยต่อพี-เอ็น (p-n junction) เพื่อเป็นแนวทางในการอธิบายสมบัติเชิงไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ในการอธิบายจะใช้แบบจำลองของสารกึ่งตัวนำที่เป็นธาตุ โดยมองในลักษณะของพันธะประกอบกับระดับพลังงาน เพื่อความง่ายในการเข้าใจ ส่วนในกลุ่มอื่นที่เป็นสารประกอบก็จะใช้หลักการเดียวกัน โดยมองในแง่มุมที่เหมาะสม

อิเลกตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำ

ถ้าเราพิจารณาสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ ในลักษณะของพันธะและจำนวนอิเลกตรอนในสองมิติจะแสดงได้ดังภาพที่ 4.1 (ก) เมื่อเติมอะตอมของสารเจือเข้าไป ถ้าธาตุที่เป็นสารเจือมีจำนวนอิเลกตรอนวงนอก (valence electrons) มากกว่า 4 ตัว (เช่นธาตุหมู่ V) ทำให้พันธะบริเวณอะตอมของสารเจือมีอิเลกตรอนเกิน 2 ตัวต่อหนึ่งพันธะ ทำให้สารกึ่งตัวนำที่มีสารเจือประเภทนี้มีลักษณะที่จะให้อิเลกตรอนออกมาง่าย เราเรียกสารเจือแบบนี้ว่า สารเจือผู้ให้ (doner impurities) สารกึ่งตัวนำที่ได้รับการเจือแบบนี้เรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductors) ถ้าธาตุที่เป็นสารเจือมีจำนวนอิเลกตรอนวงนอกน้อยกว่า 4 ตัว (เช่นธาตุหมู่ III) ทำให้พันธะบริเวณอะตอมของสารเจือมีอิเลกตรอน

น้อยกว่า 2 ตัวต่อหนึ่งพันธะ ทำให้เสมือนกับมีที่พร้อมจะรับอิเลกตรอนเพิ่มได้ง่าย ซึ่งเรียกว่า โฮล (holes) สารเจือแบบนี้เรียกว่า สารเจือผู้รับ (acceptor impurities) สารกึ่งตัวนำที่ได้รับการเจือแบบนี้เรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductors) ดังภาพที่ 4.1 (ข) และ 4.1 (ค) ตามลำดับ



ก ข ค

ภาพที่ 4.1 (ก) แสดงแผนภาพพันธะของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ ไม่มีสารเจือ
(ข) แสดงแผนภาพพันธะของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
(ค) แสดงแผนภาพพันธะของสารกึ่งตัวนำชนิดพี

ในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์และมีโครงผลึกที่สมบูรณ์ เรียกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินสิก (intrinsic semiconductor) ถ้าเราพิจารณาความหนาแน่นพาหะในสารประเภทนี้ จะพบว่า ความหนาแน่นของอิเลกตรอน, n จะเท่ากับความหนาแน่นของโฮล, p ความหนาแน่นพาหะดังกล่าวเรียกว่าความหนาแน่นพาหะอินทรินสิก (intrinsic carrier concentration), n_i นั่นคือ $n = p = n_i$

ความหนาแน่นพาหะในสภาวะสมดุลความร้อน [17,18,19]

อิเลกตรอนในสารกึ่งตัวนำจะประพฤติตนตามฟังก์ชันการแจกแจงของเฟอร์มิ-ดิแรก (Fermi-Dirac distribution function) ในสภาวะสมดุลความร้อน (thermal equilibrium) ณ อุณหภูมิ T ความหนาแน่นของอิเลกตรอนในแถบนำ ที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง E กับ E + dE จะมีค่าเท่ากับ

$$n(E)\,dE = N_C(E)\,f(E)\,dE \qquad \text{--------- 4.1}$$

เมื่อ $N_C(E)$ คือความหนาแน่นของสถานะพลังงาน (density of state) ของอิเลกตรอนในแถบนำ

และ $f(E)$ คือฟังก์ชันการแจกแจงของเฟอร์มิ-ดิแรก ซึ่งมีความสัมพันธ์

$$f(E) = 1 / [\, \exp\{ (E-E_F)/kT \} + 1 \,] \qquad \text{--------- 4.2}$$

เมื่อ E_F เป็นระดับพลังงานเฟอร์มิ (Fermi energy level)

k คือค่าคงตัวของโบลซ์มานน์ (Boltzmann constant)

T คือค่าอุณหภูมิในหน่วยองศาเคลวิน (K)

ความหนาแน่นของอิเลกตรอนในแถบนำทั้งหมดจะเป็น

$$n = \int_{E_C}^{\infty} n(E)\,dE = \int_{E_C}^{\infty} N_C(E)\,f(E)\,dE \qquad \text{--- 4.3}$$

เมื่อ E_C คือระดับสถานะพลังงานที่จุดต่ำสุดของแถบนำ

ในกรณีที่อุณหภูมิ และความหนาแน่นของพาหะต่ำเพียงพอ $N_C(E)$ สามารถคำนวณได้เป็น

$$N_C(E) = 1/2\pi^2\,(2m_e/\hbar^2)^{3/2}\,(E-E_C)^{1/2} \qquad \text{--------- 4.4}$$

เมื่อ m_e คือมวลยังผล (effective mass) ของอิเลกตรอนในแถบนำ คำตอบของสมการที่ 4.3 จะเป็น

$$n = 1/2\pi^2 (2m_e/\hbar^2)^{3/2} \int_{Ec}^{\infty} (E-E_C)^{1/2}/[\exp\{(E-E_F)/kT\} - 1]\, dE \quad \text{--- 4.5}$$

ถ้าอุณหภูมิของสารไม่สูงมากนัก และ E_F ห่างไปจาก E_C มากจนทำให้ $(E-E_F)/kT >> 1$ หรือเรียกสารกึ่งตัวนำนั้นว่าอยู่ในสถานะไม่ทรุด (non-degenerate)

$$n = N_C \exp\{-(E_C-E_F)/kT\} \quad \text{--------- 4.6 (ก)}$$

$$N_C = 2 (m_e kT/2\pi\hbar^2)^{3/2} \quad \text{--------- 4.6 (ข)}$$

ในทำนองเดียวกัน เราจะได้ความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์ p ดังสมการ

$$n = N_V \exp\{-(E_F-E_V)/kT\} \quad \text{--------- 4.7 (ก)}$$

$$N_V = 2 (m_h kT/2\pi\hbar^2)^{3/2} \quad \text{--------- 4.7 (ข)}$$

เมื่อ E_V คือระดับสถานะพลังงานที่จุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์

และ m_h คือมวลยังผลของโฮลในแถบวาเลนซ์

เมื่อเอา n กับ p คูณกัน จะได้

$$np = N_C N_V \exp(-Eg/kT) \quad \text{--------- 4.8}$$

จะเห็นว่าผลคูณของความหนาแน่นพาหะทั้งสองชนิด จะมีค่าคงที่ที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง สมการนี้เป็นเงื่อนไขที่สำคัญของความหนาแน่นพาหะในสารกึ่งตัวนำ สมการที่ 4.8 นี้เรียกว่า กฎของกริยาเชิงมวล (mass action law)

ในกรณีของสารกึ่งตัวนำอินทรินสิก เราจะเขียนสมการที่ 4.8 ได้เป็น

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

$$n_i = \sqrt{(N_C N_V)} \exp(-Eg/2kT) \quad \text{--------- 4.9}$$

กรณีนี้ ระดับพลังงานเฟอร์มิสามารถหาได้ดังนี้

$$E_F = E_i = (E_C+E_V)/2 - kT/2 \ln (N_C/N_V) \quad \text{--------- 4.10}$$

จะเห็นว่า ในสารกึ่งตัวนำอินทรินสิก ค่าระดับพลังงานเฟอร์มิจะอยู่บริเวณตรงกลางของช่องว่างแถบพลังงาน เมื่อ T = 0 K หรือ $N_C = N_V$

กรณีสารกึ่งตัวนำที่ได้รับการเติมสารเจือ (doped semiconductor) ระดับพลังงานเฟอร์มิจะเปลี่ยนไป เราสามารถคำนวณค่า n และ p ได้เช่นเดียวกัน ตราบใดก็ตามที่สารกึ่งตัวนำยังอยู่ในสถานะไม่ทรุด ถ้ามีสารเจือทั้งประเภทผู้ให้และผู้รับอยู่ในสารกึ่งตัวนำชิ้นเดียวกัน สารชิ้นนี้จะแสดงตนเป็นชนิดใดขึ้นกับความหนาแน่นพาหะข้างมากในสารนั้น สมมติว่า อะตอมสารเจือทั้งหมดที่มีในสารชิ้นนี้ถูกไอออไนซ์ (ionized) จะประมาณว่า $n = N_D$ และ $p = N_A$ ระดับพลังงานเฟอร์มิจะหาได้จาก

$$E_F = E_C - kT \ln (N_C/N_D) \quad \text{--------- 4.11}$$

ในกรณีพาหะข้างมากเป็นชนิดผู้ให้ และ

$$E_F = E_V + kT \ln (N_V/N_A) \quad \text{--------- 4.12}$$

ในกรณีพาหะข้างมากเป็นชนิดผู้รับ

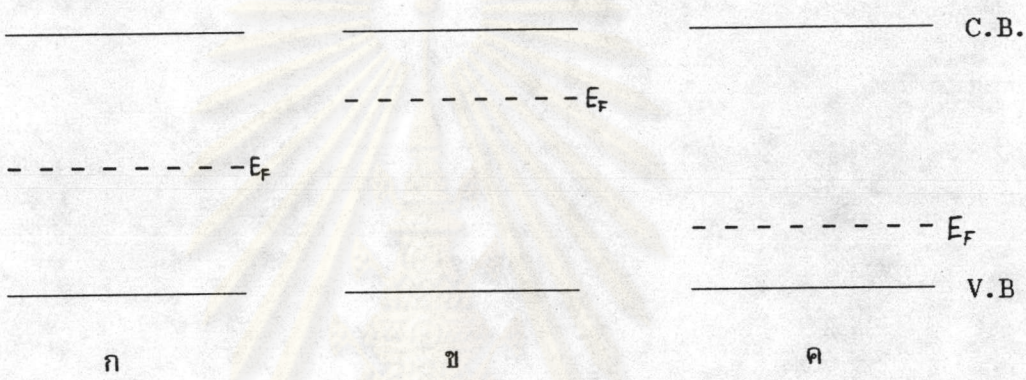
กรณีนี้กฎของกริยาเชิงมวล (สมการที่ 4.8) ยังคงใช้ได้ โดยมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นพาหะในสารกึ่งตัวนำอินทรินสิกดังสมการ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$np = N_c N_v \exp -\{(E_c - E_v)/kT\}$$

$$= N_c N_v \exp -(Eg/kT) = n_i^2 \qquad \text{--------- 4.13}$$

เราอาจเสนอแผนภาพแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำแบบอินทรินสิก, สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น, และสารกึ่งตัวนำชนิดพี ได้ดังภาพที่ 4.2 (ก), (ข), และ (ค) ตามลำดับ



ภาพที่ 4.2 (ก) แสดงแผนภาพแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำอินทรินสิก

(ข) แสดงแผนภาพแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

(ค) แสดงแผนภาพแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สมบัติการขนส่งของอิเลกตรอนและโฮล

การเคลื่อนที่ของอิเลกตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำ มีความสำคัญในการนำไฟฟ้าของสารนั้น เพราะการนำไฟฟ้าก็คือการเคลื่อนที่ของอิเลกตรอนเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอกที่จ่ายให้ สมบัติการเคลื่อนที่ของอิเลกตรอนและโฮลนี้เรียกว่า สมบัติการขนส่ง (transport property)

ถ้ามีสนามไฟฟ้าจ่ายให้แก่ชิ้นสารกึ่งตัวนำ อิเลกตรอนในชิ้นสารกึ่งตัวนำที่เคยมีการเคลื่อนที่เนื่องจากพลังงานความร้อน (thermal motion) เพียงอย่างเดียว จะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าโดยมีการเคลื่อนที่อีกส่วนหนึ่งบวกเข้าไป ความเร็วในส่วนนี้เรียกว่า ความเร็วลอยเลื่อน (drift velocity), V_d ในกรณีของอิเลกตรอน ความเร็วลอยเลื่อนนี้จะมีทิศทางตรงข้ามกับทิศของสนามไฟฟ้า ถ้าสนามไฟฟ้าไม่แรงมากนัก ความเร็วลอยเลื่อนจะแปรผันตามค่าของสนามไฟฟ้า E และเราอาจเขียนความสัมพันธ์ในรูปของสมการได้ดังนี้ [17]

$$V_d = \mu E \qquad \text{--------- 4.14}$$

ค่าคงที่ μ เรียกว่าสภาพเคลื่อนได้ (mobiity) ของพาหะ ค่าสภาพเคลื่อนได้ของอิเลกตรอน และของโฮลแทนด้วย μ_e และ μ_h ตามลำดับ

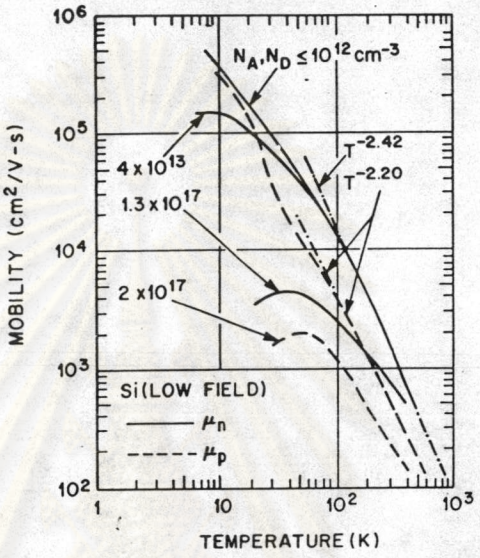
ค่าสภาพเคลื่อนได้ของพาหะ เป็นตัวแปรสำคัญในการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ โดยมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับค่าสภาพความต้านทาน (resistivity), ρ และสภาพนำไฟฟ้า (conductivity), σ ได้แก่

$$\sigma = 1/\rho = q \mu_e n \qquad \text{--------- 4.15 (ก)}$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และ

$$\sigma = 1/\rho = q \mu_h p \qquad \text{--------- 4.15 (ข)}$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดพี เมื่อ q คือค่าประจุของอิเลกตรอน สำหรับค่าสภาพเคลื่อนได้ของพาหะขึ้นอยู่กับกระบวนการกระเจิง (scattering mechanism) ภายในสารกึ่งตัวนำนั้น ๆ ดังนั้น ค่าสภาพเคลื่อนได้ของพาหะจะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ และองค์ประกอบอื่น ๆ ภายในสารด้วย ภาพที่ 4.3 แสดงค่าสภาพเคลื่อนได้ของอิเลกตรอนและโฮลในสารซิลิกอนสัมพันธ์กับอุณหภูมิ [17]



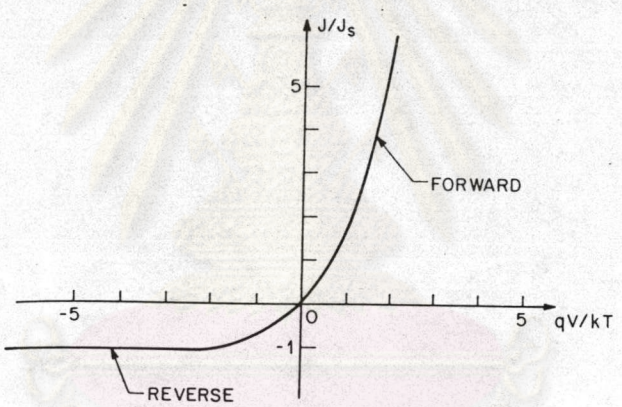
ภาพที่ 4.3 แสดงค่าสภาพเคลื่อนได้ของพาหะในซิลิกอน กับอุณหภูมิ

ถ้าความหนาแน่นพาหะในสารกึ่งตัวนำไม่สม่ำเสมอ จะเกิดการแพร่ (diffuse) เนื่องจากค่าเกรเดียนท์ของความหนาแน่นพาหะ (concentration gradient) ซึ่งจะมีค่าคงที่เรียกว่า สภาพแพร่ได้ (diffusitivity) เป็นตัวบอกความสามารถในการแพร่ได้ของพาหะ แทนด้วย D_e และ D_p สำหรับสภาพแพร่ได้ของอิเลกตรอนและโฮล ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<u>รอยต่อพี-เอ็น</u> [20,21]

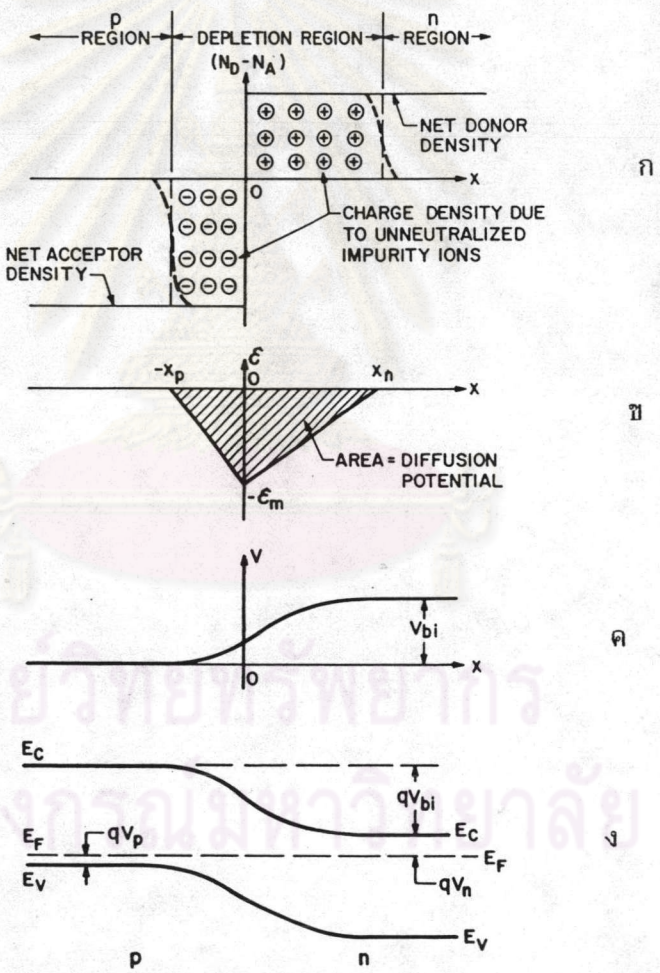
เมื่อเรานำสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็นมาต่อกัน จะมีการบิดเบี้ยวของแถบพลังงานในบริเวณที่สารทั้งสองชนิดมาต่อกัน บริเวณนี้เรียกว่า <u>รอยต่อพี-เอ็น</u> (p-n junction) การบิดเบี้ยวของแถบพลังงานนี้ ทำให้รอยต่อนี้แสดงสมบัติพิเศษต่างจากชิ้นสารกึ่งตัวนำเดี่ยว ๆ ซึ่งสมบัติดังกล่าวได้รับการนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์ต่าง ๆ สมบัติที่สำคัญประการหนึ่งคือสมบัติที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ข้างเดียว หรือเรียกว่า สมบัติการกรองกระแส (rectify) แสดงได้ดังภาพที่ 4.4 อุปกรณ์กึ่งตัวนำที่อาศัยสมบัติของรอยต่อพี-เอ็นประการนี้เรียกว่า ไดโอด (diode)



ภาพที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์กระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อ พี-เอ็น ที่แสดงสมบัติการกรองกระแส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถ้าเราพิจารณาโครงสร้างพันธะบริเวณรอยต่อ จะเห็นว่าทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น มีแนวโน้มที่จะให้อิเลกตรอนออกมาได้ง่ายขณะที่ด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีมีแนวโน้มที่จะรับอิเลกตรอนเพิ่มได้ง่าย อิเลกตรอนด้านสารชนิดเอ็นบางส่วนในบริเวณใกล้รอยต่อ จะเกิดการแพร่ข้ามรอยต่อไปยังสารชนิดพี การแพร่ของอิเลกตรอนนี้จะทำให้สารกึ่งตัวนำทั้งสองข้างของรอยต่อมีสภาพไม่เป็นกลางทางไฟฟ้า โดยด้านสารชนิดเอ็นจะแสดงสภาพไฟฟ้าเป็นบวก และด้านพีจะแสดงสภาพไฟฟ้าเป็นลบ ดังนั้นจะเกิดสนามไฟฟ้าขึ้นในบริเวณใกล้กับรอยต่อ มีทิศจากสารชนิดเอ็นไปยังสารชนิดพี ซึ่งสนามไฟฟ้านี้จะเป็นตัวกั้นไม่ให้อิเลกตรอนแพร่ต่อไป สภาพเงื่อนไขต่าง ๆ บริเวณ รอยต่อแสดงได้ดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 แสดงเงื่อนไขต่าง ๆ บริเวณรอยต่อ ขณะไม่มีความต่างศักย์ตกคร่อม

(ก) การกระจายของประจุบริเวณรอยต่อ

(ข) ความเข้มข้นสนามไฟฟ้าที่เกิด

(ค) ความต่างศักย์ที่จุดต่าง ๆ บริเวณรอยต่อ

(ง) โครงสร้างแถบพลังงานบริเวณรอยต่อ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากการใช้เงื่อนไขบางประการ ได้แก่ 1. การกระจายของประจุบริเวณรอยต่อมีการเปลี่ยนแปลงแบบฉับพลันเมื่อข้ามรอยต่อ (abrupt junction), 2. มีกระแสจำนวนน้อยถูกผลักดันผ่านรอยต่อ (low injection), 3. การกระจายของระดับพลังงานต่ออุณหภูมิของพาหะเป็นไปตามการกระจายของโบลท์ซมาน (Boltzmann approximation), และ 4. ไม่มีกระแสถูกกำเนิดขึ้นบริเวณรอยต่อ (no generation current exist) จะทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของกระแส-ความต่างศักย์ ของรอยต่อพี-เอ็น ได้ดังสมการ [20]

$$I = I_o [\exp(qV/kT) - 1] \qquad \text{---------} \quad 4.16$$

โดยที่

$$I_o = AqD_p p_{no}/L_p + AqD_n n_{po}/L_n \qquad \text{---------} \quad 4.17$$

เมื่อ D_p และ D_n เป็นสภาพแพร่ได้ (diffusivity) ของพาหะในสารชนิด n และ p ตามลำดับ, ค่า L_p และ L_n เป็นค่าระยะการแพร่ (diffusion length) ของพาหะในสารชนิด n และ p ตามลำดับ, และ A คือพื้นที่ของรอยต่อพี-เอ็น

สมการ 4.16 และ 4.17 เป็นสมการในอุดมคติของรอยต่อพี-เอ็น เรียกว่าสมการของช่อคเลย์ (Schokley's equation)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<u>ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก</u> [21]

ถ้าเราสามารถให้แสง (โฟตอน) จำนวนหนึ่งตกลงบนสารกึ่งตัวนำ ใกล้กับรอยต่อพี-เอ็น และพลังงานของโฟตอนนั้นเหมาะสม ก็จะเกิดการย้ายสถานะของอิเลกตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำข้ามช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งการย้ายสถานะนี้จะทิ้งโฮลไว้ที่แถบวาเลนซ์ เรียกได้ว่าเป็นการกำเนิดคู่อิเลกตรอน-โฮล (electron-hole-pair generation) หากคู่อิเลกตรอน-โฮล ที่เกิดขึ้นนี้สามารถแพร่เข้าไปใกล้บริเวณรอยต่อที่มีสนามไฟฟ้าจากรอยต่อได้ อิเลกตรอนในสารข้างพี (หรือโฮลในสารข้างเอ็น) จะถูกกวาดไปยังสารอีกข้าง

ด้วยอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงมากบริเวณรอยต่อ ดังนั้นสารข้างพีจะแสดงสถานะทางไฟฟ้าเป็นบวก และสารข้างเอ็นจะแสดงสถานะทางไฟฟ้าเป็นลบ นั่นคือ จะเกิดความต่างศักย์คร่อมรอยต่อพี-เอ็นที่ได้รับแสงขึ้น ปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่า ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (photovoltaic effect)

ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิกนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายทาง ที่สำคัญที่สุดได้แก่การนำไปเป็นเครื่องแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า ที่เรารู้จักกันดีในชื่อเซลล์แสงอาทิตย์ ในการนำไปประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ต้องมีการออกแบบรอยต่อ และสิ่งแวดล้อมประกอบต่าง ๆ ให้เหมาะสม เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของเซลล์สูงสุด

สำหรับในการวิจัยนี้ ได้นำปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิกของรอยต่อพี-เอ็นมาช่วยให้สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไฟฟ้าของสารตัวอย่างได้ เมื่อมีแสงตกกระทบ สำหรับรายละเอียดของการสร้างรอยต่อบนชิ้นสารตัวอย่างได้แสดงไว้ในบทที่ 6

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย