บทที่ 6
สิ่งประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำ

<u>วัตถุประสงค์</u>

1. เพื่อให้เข้าใจการทำงานของพี-เอ็นจังค์ชันซึ่งเป็นความเข้าใจพื้นฐานของการทำงานของอนุกลสารกึ่งตัวนำเกือบทุกชนิด

2. เพื่อให้สามารถคำนวณคุณลักษณะ กระแส-แรงดันไฟฟ้าของพี-เอ็นจังค์ชันเมื่อถูกไบอัส

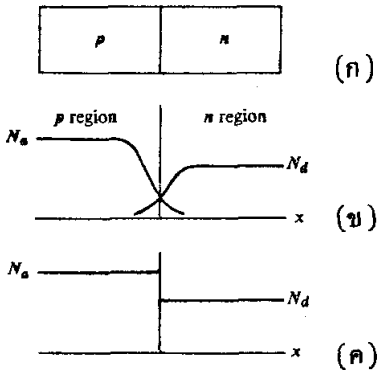
3. เพื่อให้เข้าใจการทำงานและคุณสมบัติของอนุกลสารกึ่งตัวนำที่สำคัญๆ ทางด้านไฟฟ้าและแสง ได้แก่ ไดโอด ทรานซิสเตอร์ เลเซอร์ เซลล์สุริยะ เป็นต้น

บทนำ

เมื่อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและพีถูกนำมาเชื่อมต่อกัน บริเวณรอยต่อของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิด เรียกว่า พี-เอ็นจังค์ชัน (p-n junction) รอยต่อพี-เอ็นมิได้หมายความถึงการนำสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็น 2 ชิ้นมาต่อเข้าด้วยกันเฉยๆ แต่การประดิษฐ์รอยต่อนี้เริ่มจากการโดปด้านหนึ่งของผลึกสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ให้เป็นชนิดเอ็น (หรือพี) แล้วโดปด้านที่เหลือให้เป็นชนิดพี (หรือเอ็น) หรือใช้ผลึกสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง (พีหรือเอ็น) มาทำการโดปบริเวณหนึ่งให้เป็นชนิดตรงข้ามโดยหลักการโดปชดเชย (ดูการประดิษฐ์ในบทที่ 7) คุณลักษณะของพี-เอ็นจังค์ชันเป็นเรื่องรากฐานในการเข้าใจการทำงานของสิ่งประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำเกือบทุกชนิด ในบทนี้จะเริ่มจากพี-เอ็นจังค์ชันก่อน จากนั้นจะเป็นสิ่งประดิษฐ์หรืออนุกล โดยเริ่มจากอนุกลทางด้านไฟฟ้า ได้แก่ไดโอดและทรานซิสเตอร์ แล้วจึงเป็นอนุกลทางด้านแสง และอนุกลชนิดอื่นๆ บางชนิด

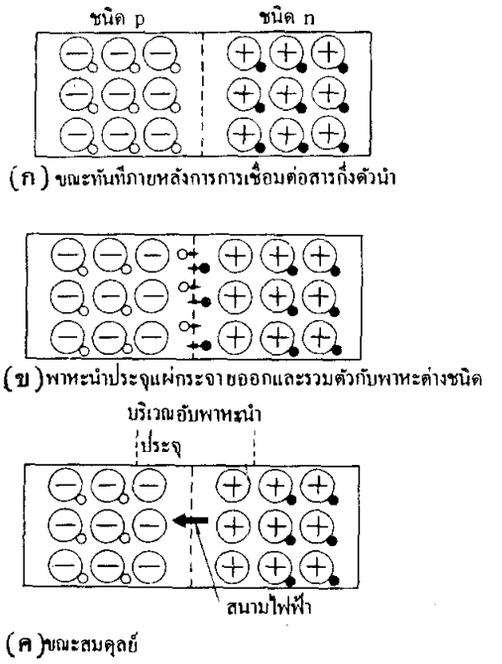
6.1 พี-เอ็นจังค์ชัน

พี-เอ็นจังค์ชันเป็นรอยต่อในสารกึ่งตัวนำชิ้นเดียวซึ่งมีด้านหนึ่งเป็นชนิดเอ็นและอีกด้านหนึ่งเป็นชนิดพี ดังรูป 6.1 โดยสารกึ่งตัวนำชิ้นนั้นทางด้านเอ็นคือบริเวณที่ถูกโดปด้วยสารเจือโดเนอร์ และด้านพีโดปด้วยสารเจือแอคเซฟเตอร์ ความหนาแน่นของโดเนอร์ (N_D) และแอคเซฟเตอร์ (N_A) รวมทั้งการกระจายในบริเวณใกล้ๆ รอยต่อและการข้ามรอยต่อจะมีลักษณะดังรูป 6.1 (ข) ซึ่งมีการกระจายอย่างค่อยๆ ลาดลง เรียกว่าจังค์ชันแบบลาด (graded junction) ส่วนจังค์ชันที่ความหนาแน่นของโดเนอร์และแอคเซฟเตอร์เป็นไปดังรูป 6.1 (ค) คือมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไม่ต่อเนื่อง N_D จะมีค่าคงที่ในบริเวณด้านเอ็นและเป็นศูนย์ในด้านพี ส่วน N_A คงที่ทางด้านพีและเป็นศูนย์ในด้านเอ็น เรียกว่าจังค์ชันแบบชัน (abrupt junction) ในการศึกษาคุณลักษณะของรอยต่อเราจะให้เป็นจังค์ชันแบบหลัง เพื่อที่จะได้ไม่ต้องยุ่งยากกับการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์มากนัก อย่างไรก็ดีในทางปฏิบัตินั้นเป็นไปไม่ได้ที่จะสร้างจังค์ชันแบบชัน เพราะอะตอมของสารเจือจะต้องแพร่ข้ามรอยต่อเข้าไปบ้าง



รูป 6.1 (ก) สารกึ่งตัวนำแสดงพี-เอ็นจังค์ชัน (ข) จังค์ชันแบบลาด
(ค) จังค์ชันแบบชัน

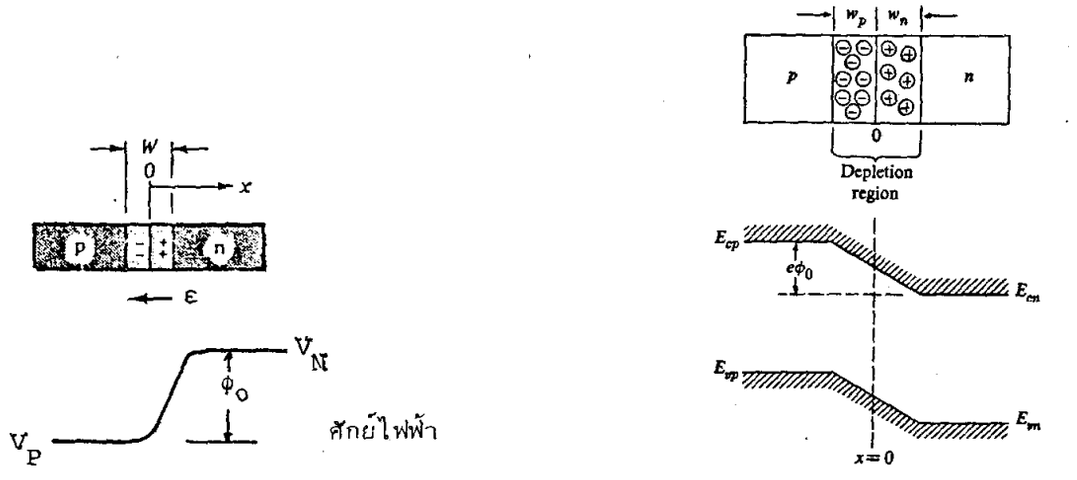
สิ่งที่น่าสนใจที่สุดของพี-เอ็นจังค์ชันก็คือ ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่รอยต่อทั้งๆ ที่จังค์ชันอยู่ในสภาวะสมดุล ความต่างศักย์นี้มีชื่อว่า ศักย์ไฟฟ้าผิวสัมผัส (contact potential) ซึ่งปกติจะมีค่าประมาณ 0.1 - 1 โวลต์ การเกิดศักย์ไฟฟ้าผิวสัมผัสอธิบายได้ดังนี้ พิจารณาจากจุดเริ่มต้นที่พี-เอ็นจังค์ชันได้เริ่มถูกสร้างขึ้นดังภาพ 6.2 (ก) (ซึ่งแสดงเฉพาะอะตอมสารเจือและพาหะนำประจุส่วนเกิน) เริ่มต้นทั้งสองด้านเป็นกลางทางไฟฟ้าและมีความหนาแน่นของพาหะอิสระคงที่ในแต่ละด้าน สนามไฟฟ้าภายในมีค่าเป็นศูนย์ทุกๆ แห่ง เพราะประจุจากพาหะอิสระจะถูกหักล้างโดยประจุของไอออไนซ์โดเนอร์ หรือไอออไนซ์แอคเซปเตอร์ เมื่อสารกึ่งตัวนำทั้งสองส่วนเริ่มถูกสร้างขึ้นเป็นพี-เอ็นจังค์ชัน (คือเริ่มเข้ามาสัมผัสกัน) บริเวณรอยต่อจะเกิดเกรเดียนท์ของความหนาแน่นของพาหะอิสระทั้งสองชนิด และจากบทที่ 3 เราทราบแล้วว่าจะเกิดการแพร่ของอนุภาคขึ้นในทิศทางตรงข้ามกับเกรเดียนท์ หรืออาจกล่าวได้อีกแบบหนึ่งว่า เมื่อสารกึ่งตัวนำสองส่วนถูกสร้างขึ้นในสารชิ้นเดียวกันจะทำให้เกิดสภาวะไม่สมดุล และทำให้เกิดการแพร่ของพาหะอิสระเหล่านั้นเพื่อให้ระบบทั้งหมดเข้าสู่สภาวะสมดุล ทิศทางของการแพร่จะตรงข้ามกับเกรเดียนท์



รูป 6.2 การแพร่ของพาหะข้ามจังค์ชันและสนามไฟฟ้าภายใน

ดังกล่าว ดังนั้นอิเลคตรอนอิสระจะแพร่จากส่วนเอ็นเข้าไปในส่วนพี และโฮลอิสระจะแพร่จากส่วนพีเข้าไปในส่วนเอ็น

การแพร่ซึมนี้จะไม่เกิดตลอดไปอย่างไม่มีที่สิ้นสุด พิจารณาตัวอย่างจากโฮล เมื่อโฮลแพร่จากด้านพีเข้าไปสู่ด้านเอ็นจะทำให้ด้านพีเหลือไอออไนซ์แอคเซฟเตอร์ซึ่งเป็นไอออนลบ ขณะเดียวกันการแพร่ของอิเลคตรอนอิสระจากด้านเอ็นมาสู่ด้านพี ก็จะทำให้ด้านพีเป็นลบมากขึ้น ผลลัพท์ก็คือด้านพีจะมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบเทียบกับด้านเอ็น ทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นซึ่งเรียกว่าศักย์ไฟฟ้าผิวสัมผัสนั่นเอง (บางทีก็เรียกว่า built-in potential barier) ศักย์ไฟฟ้านี้จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในขึ้นในบริเวณรอยต่อดังภาพ 6.2 (ค) ภาวะสมดุลจะเกิดขึ้นเมื่อการแพร่ของพาหะอิสระข้ามรอยต่อกับการเคลื่อนย้ายข้ามรอยต่อของพาหะอิสระเนื่องจากสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากัน หรืออาจชูดง่ายๆ ว่าเมื่อสนามไฟฟ้าภายในมีค่ามากพอจนกระทั่งต้านการแพร่ซึมให้น้อยลงจนเข้าสู่สมดุล



รูป 6.3 แถบพลังงาน ศักย์ไฟฟ้าผิวสัมผัสของพี-เอ็นจังค์ชันและบริเวณอัมพาหะนำประจุ

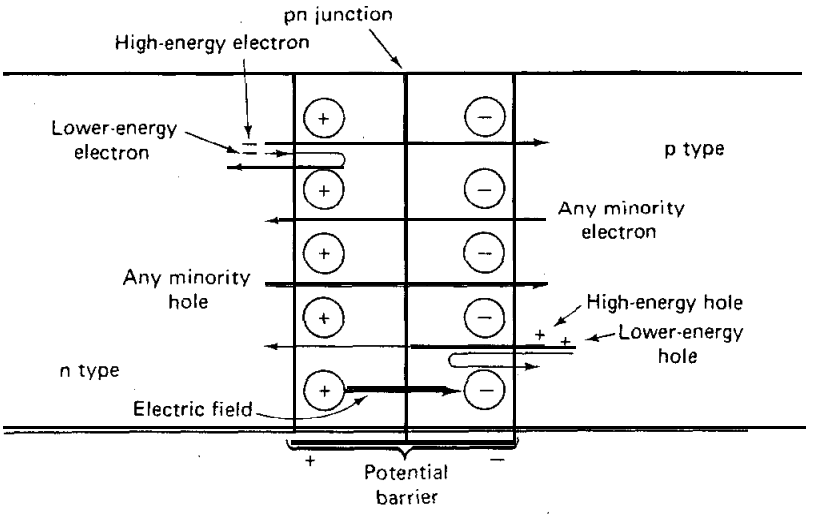
รูป 6.3 แสดงตำแหน่งของแถบความนำและแถบวาเลนซ์บริเวณจังค์ชัน ผลจากการแพร่ของพาหะนำประจุจะทำให้ระดับพลังงานด้านพีสูงกว่าด้านเอ็น (ด้านพีมีประจุลบ) ถ้าให้ศักย์ไฟฟ้าผิวสัมผัสมีค่าเท่ากับ ϕ_o จะได้ความแตกต่างของระดับพลังงานทั้งสองด้านเป็น $e\phi_o$ (ตามทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้าด้านเอ็นจะสูงกว่าด้านพีด้วยปริมาณ ϕ_o ดังรูป 6.3 แต่ในทฤษฎีทางฟิสิกส์ของของแข็ง เราพลอตพลังงานของอิเลคตรอนและเนื่องจากอิเลคตรอนมีประจุ - e ดังนั้นด้านพีจึงมีระดับพลังงานของอิเลคตรอนสูงกว่าดังภาพ)

การแพร่ของพาหะอิสระนอกจากจะทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าผิวสัมผัสและสนามไฟฟ้าภายในดังกล่าวแล้ว ยังทำให้เกิดบริเวณอับพาหะนำประจุหรือบริเวณที่พาหะอิสระไม่สามารถอยู่ได้ (เพราะมีสนามไฟฟ้า) ขึ้นทั้งสองด้านอีกด้วยดังภาพ 6.3 บริเวณรอยต่อด้านต่อด้านเอ็นจะมีชั้นซึ่งหนา w_n ซึ่งปราศจากอิเลคตรอนอิสระมีแต่ไอออไนซ์โดเนอร์ดังนั้นชั้นดังกล่าวจะเป็นชั้นของประจุบวก ส่วนทางด้านพีจะเป็นชั้นที่หนา w_p ซึ่งเป็นประจุลบ ดังนั้นบริเวณรอยต่อ หรือพี-เอ็นจังค์ชันจึงประกอบด้วยชั้นของประจุไฟฟ้า 2 ชั้น ซึ่งเรียกว่า "บริเวณอับพาหะนำประจุ (depletion region ; space-charge region)" ในบริเวณดังกล่าวจะมีสนามไฟฟ้าที่เกิดจากศักย์ไฟฟ้าผิวสัมผัส ส่วนบริเวณภายนอกจะเป็นกลางและไม่มีสนามไฟฟ้า

ในสภาวะสมดุลความร้อนการเคลื่อนที่ของพาหะนำประจุจะเป็นไปตามรูป 6.4 ซึ่งเป็นสภาวะสมดุลแบบเคลื่อนที่ (dynamic equilibrium) จะเห็นว่ามีฟลักซ์ของพาหะนำประจุหลายแบบไหลข้ามรอยต่อ แต่ไม่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า เพราะฟลักซ์เหล่านี้จะหักล้างกันเอง (ดูหัวข้อ 6.2 เพิ่มเติม)

ต่อไปจะเป็นการคำนวณหาค่าศักย์ไฟฟ้าผิวสัมผัส ϕ_o จากรูป 6.3 จะเห็นว่า

$$e\phi_o = E_{cp} - E_{cn} \qquad \text{.....(6-1)}$$



รูป 6.4 การเคลื่อนที่ของพาหะนำประจุข้ามรอยต่อที่สภาวะสมดุล

เมื่อ E_{cp} และ E_{cn} เป็นพลังงานตอนล่างของแถบความนำในด้านพี และด้านเอ็นตามลำดับ ค่าพลังงานนี้สัมพันธ์กับความหนาแน่นของอิเลคตรอน (ดูหัวข้อ 3.2.1) ดังนี้

$$n_{po} = N_C e^{-(E_{cp} - E_F)/k_B T}$$

$$n_{no} = N_C e^{-(E_{cn} - E_F)/k_B T}$$

ในที่นี้ n_{po} คือความหนาแน่นของอิเลคตรอนในด้านพี (พาหะนำประจุรอง) ที่สภาวะสมดุล n_{no} คือความหนาแน่นของอิเลคตรอนในด้านเอ็น (พาหะนำประจุเอก) ที่สภาวะสมดุล และ E_F เป็นระดับเฟอร์มิ ของชิ้นสารซึ่งเท่ากันหมดตลอดก้อนสาร เพราะอยู่ในภาวะสมดุลย์ จากสมการทั้งสองเราสามารถหาอัตราส่วน n_{no}/n_{po} ได้ และจากสมการ (6-1) จะได้

$$\frac{n_{no}}{n_{po}} = e^{e\phi_o/k_B T} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (6\text{-}2)$$

ซึ่งจะเห็นว่า ϕ_o อยู่ในเทอมของความหนาแน่นของอิเลคตรอนที่สภาวะสมดุลทั้งสองด้าน แต่ถ้าเราเขียน ϕ_o ในเทอมของความหนาแน่นของพาหะนำประจุเอกของด้านเอ็นและพีคือ n_{no} และ p_{po} จะเป็นการสะดวกกว่า โดยการใช้แมสแอคชันลอร์ (mass action law) คือ

$$n_{po}(T)\ p_{po}(T) = n_i^2\ (T)$$

$$n_{po} = n_i^2 / p_{po}$$

แทนค่า n_{po} ในสมการ (h-2) จะได้

$$\phi_o = \frac{k_B T}{e} \log \left(\frac{n_{no}\ p_{po}}{n_i^2} \right) \qquad .....(6-3)$$

จากหัวข้อ 3.2.1 และ 3.2.2 เราทราบแล้วว่าตามปกติ $n_{no} \simeq N_D$ และ $p_{po} \simeq N_A$ เมื่อ N_D และ N_A เป็นความหนาแน่นของโดเนอร์และแอคเซฟเตอร์ นั่นคือคิดว่าอะตอมสารเจือเกิดไอออไนซ์เกือบทั้งหมด ซึ่งเป็นจริงยกเว้นที่อุณหภูมิต่ำมาก (น้อยกว่า 50^oK) ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าผิวสัมผัสจึงมีค่าประมาณดังนี้

$$\phi_o = \frac{k_B T}{e} \log \left(\frac{N_D\ N_A}{n_i^2} \right) \qquad .....(6-4)$$

ซึ่งเป็นศักย์ไฟฟ้าที่ขึ้นกับคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำ ความเข้มข้นของการโดปและอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิห้อง $k_B T / e \simeq 0.025$ โวลต์ ซึ่งจะได้ ϕ_o ประมาณ 0.3 โวลต์ สำหรับเจอร์เมเนียมซึ่งโดปด้วย $N_D = N_A = 10^{16}\ cm^{-3}$

การคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าภายใน ε และค่าความหนาของบริเวณอับพาหะนำประจุ $w = w_n + w_p$ จะต้องแก้สมการไปซอง (Poisson's equation) ซึ่งถ้ากำหนดให้รอยต่อเป็นระนาบที่ตั้งฉากกับแกน x สมการไปซองของศักย์ไฟฟ้า ϕ ใดๆ ที่ตำแหน่ง x (x = 0 อยู่ตรงผิวสัมผัสของด้านเอ็นและพีที่รอยต่อ) จะเป็น

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = - \frac{\rho(x)}{\bar{\varepsilon}} \qquad \ldots\ldots\ldots (S\text{-}5)$$

โดยที่ $\rho(x)$ เป็นความหนาแน่นของประจุที่ x และ $\bar{\varepsilon}$ เป็นค่าคงตัวไดอิเลคตริคของสาร โดยทั่วไป

$$\rho(x) = e\left[p(x) + N_d(x) - n(x) - N_a(x) \right] \ldots\ldots (6\text{-}6)$$

เมื่อกำหนดให้ $N_d(x)$ และ $N_a(x)$ เป็นความหนาแน่นของไอออไนซ์โด เนอร์ และไอออไนซ์แอคเซฟเตอร์

การแก้สมการไปซอง (6-5) ในกรณีทั่วไปเป็นเรื่องยุ่งยากมาก ในที่นี้จะคิดเฉพาะกรณีที่กำหนดให้บริเวณอับพาหะนำประจุไม่มีพาหะนำประจุอิสระอยู่เลย ข้อกำหนดนี้ถือว่าใช้ได้ในทางปฏิบัติ และจากนั้นพิจารณาเฉพาะในบริเวณอับพาหะนำประจุ จะเห็นว่าความหนาแน่นของไอออไนซ์โดเนอร์และไอออไนซ์แอคเซฟเตอร์เป็นค่าคงที่ไม่ขึ้นกับ x (จังค์ชันแบบชัน) และสามารถเขียนสมการไปซองออกเป็น 2 สมการคือ

$$\frac{d^2\phi_n}{dx^2} = - \frac{e N_d}{\bar{\varepsilon}} \quad ; \quad 0 < x < w_n \qquad \ldots\ldots\ldots (6\text{-}7)$$

$$\frac{d^2\phi_p}{dx^2} = -\frac{e N_a}{\bar{\varepsilon}} \quad ; \quad -w_p < x < o \quad \text{.....(6-8)}$$

และสนามไฟฟ้าภายใน

$$\varepsilon = -d\phi / dx$$

สมการ (6-7) และ (6-8) มีเงื่อนไขขอบเขตดังต่อไปนี้คือ

1. สนามไฟฟ้าภายนอกบริเวณอับพาหะนำประจุมีค่าเท่ากับศูนย์
2. สนามไฟฟ้าจะต้องต่อเนื่องที่ $x = 0$
3. ศักย์ไฟฟ้าจะต้องต่อเนื่องที่ $x = 0$ และในที่นี้กำหนดให้มีค่าเท่ากับศูนย์
4. ϕ ที่ตำแหน่ง $x = w_n$ และที่ $x = -W_p$ จะต้องมีค่าแตกต่างกันเท่ากับ ϕ_o

นั่นคือระบบอยู่ในภาวะสมดุล ผลของการแก้สมการจะได้

$$w_n N_d = w_p N_a \quad \text{.....(6-9)}$$

$$w_n = \left[2\bar{\varepsilon}\phi_o N_a / N_d(N_d + N_a)e\right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{.....(6-10)}$$

$$w_p = \left[2\bar{\varepsilon}\phi_o N_d / N_a(N_d + N_a)e\right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{.....(6-11)}$$

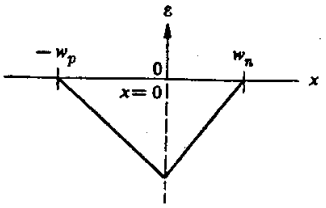
$$w = w_n + w_p = \left[\frac{2\bar{\varepsilon}\phi_o}{e}\left(\frac{1}{N_d} + \frac{1}{N_a}\right)\right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{.....(6-12)}$$

$$\varepsilon_0 = 2\phi_o / w \quad \text{.....(6-13)}$$

โดยที่ ε_o คือสนามไฟฟ้าภายในที่ $x = 0$

จากสมการ (6-9) จะเห็นว่าจำนวนประจุในบริเวณอัยพาหะทั้ง 2 ด้านมีค่าเท่ากัน (ไม่คิดเครื่องหมาย) สมการ (6-10) และ (6-11) แสดงให้เห็นว่าความหนาของบริเวณอัยพาหะทั้งสองขึ้นกับ $N_d^{-1/2}$ และ $N_a^{-1/2}$ ดังนั้นถ้าโดปด้วยความเข้มข้นสูงความหนาของบริเวณอัยพาหะนำประจุจะน้อย สมการ (6-13) แสดงให้เห็นว่า ε_o มีค่าเป็น 2 เท่าของสนามไฟฟ้าเฉลี่ยของบริเวณรอยต่อ (ϕ_o/w)

รูป 6.5 แสดงพลอตของสนามไฟฟ้าภายใน ค่าลบหมายถึง มีทิศทางไปทางซ้ายดังรูป 6.3 สำหรับพี-เอ็นจังค์ชันของ Ge ที่โดปด้วยความเข้ม $N_D = N_A = 10^{16}$ cm^{-3} จะได้ $\phi_o = 0.3$ โวลต์ $w_n = w_p = 0.16$ μ, $w = 0.33$ μ และ $\varepsilon_o = 21$ kV/cm ถึงแม้ว่าสนามไฟฟ้าจะมีค่าสูงก็จริงแต่สนามไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าผิวสัมผัสนี้ไม่สามารถจะทำให้เกิดกระแสขึ้นในวงจรภายนอกได้ เพราะเมื่อเราต่อลวดโลหะเข้ากับ หัว-ท้าย ของชิ้นสารกึ่งตัวนำที่มีพี-เอ็นจังค์ชันจะเกิดศักย์ไฟฟ้าผิวสัมผัสขึ้นที่รอยต่อของโลหะกับสารกึ่งตัวนำเพิ่มขึ้นมา (ดูบทที่ 9) ซึ่งจะหักล้างกับ ϕ_o หมดไป



รูป 6.5 การเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า ε ในบริเวณอัยพาหะนำประจุ

ในกรณีที่ระบบไม่สมดุลเช่นมีแรงดันไฟฟ้าจ่ายให้กับพี-เอ็นจังค์ชันจากภายนอก สมการต่างๆ ยังคงใช้ได้เพียงแต่เปลี่ยนค่าของ ϕ_o คือสมมุติว่าแรงดันไฟฟ้าจากภายนอกเท่ากับ V เราจะคิดว่า V ทั้งหมดมาปรากฏคร่อมบริเวณอัยพาหะนำประจุ ส่วนแรงดันไฟฟ้าที่ตกไป (drop) ใน

บริเวณอื่นถือว่าน้อยมากไม่ต้องนำมาคิด (ที่คิดดังนี้เนื่องจากบริเวณอับพาหะนำประจุไม่มีพาหะอิสระจึงถือได้ว่ามีความต้านทานสูงมาก ส่วนนอกบริเวณนั้นมีพาหะอิสระจำนวนมากจึงมีความต้านทานต่ำ และเนื่องจากความต้านทานดังกล่าวอยู่ในลักษณะต่ออนุกรมกัน ดังนั้นความต่างศักย์เกือบทั้งหมดจึงไปปรากฏคร่อมที่บริเวณความต้านทานสูง) นั่นคือ

$$\text{ศักย์ไฟฟ้าคร่อมบริเวณอับพาหะนำประจุ} = \phi_0 - V \qquad \ldots\ldots\ldots (6\text{-}14)$$

ค่า V เป็นบวกถ้าต่อขั้วบวกของวงจรภายนอกเข้ากับด้านพี และเป็นลบถ้าต่อขั้วบวกเข้ากับด้านเอ็น

สมการ (6-14) ใช้ได้ดีกับกรณีไบอัสย้อนมากกว่ากรณีไบอัสตาม เพราะกรณีไบอัสตาม กระแสมีค่ามากดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่ตกไปในสารกึ่งตัวนำนอกบริเวณอับพาหะนำประจุจึงมีค่ามากพอควร เมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้าทั้งหมด (ดูเพิ่มเติมเรื่องการไบอัสในหัวข้อ 6.2)

ในกรณีที่มีไบอัสการคำนวณหาค่า ε และ w ยังคงเป็นเช่นเดิม เพียงแต่เปลี่ยนสมการโปซองและเงื่อนไขขอบเขตให้เหมาะสม ซึ่งจะได้ผลแบบเดียวกับสมการ (6-9)-(6-13) โดยแทน ϕ_o ด้วย $\phi_o - V$ ผลที่น่าสนใจคือ

$$w \propto (\phi_o - V)^4 \qquad \ldots\ldots\ldots (6\text{-}15)$$

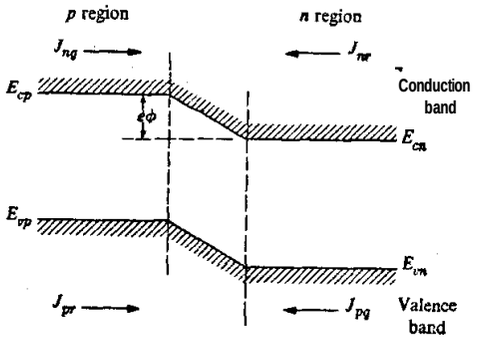
$$\varepsilon_0 \propto (\phi_o - V)^{\frac{1}{2}} \qquad \ldots\ldots\ldots (6\text{-}16)$$

ดังนั้นในกรณีที่ V เป็นบวก (ไบอัสตาม) ε_o และ w จะมีค่าน้อยลงกว่าค่าที่สภาวะสมดุล ส่วนกรณี V เป็นลบ (ไบอัสย้อน) จะได้ผลตรงข้าม และในกรณีที่ $|V| >> \phi_o$ ของไบอัสย้อนซึ่งพบบ่อยๆ ในทางปฏิบัติ จะได้ว่า ε_o และ w แปรผันโดยประมาณกับ $|V|^{\frac{1}{2}}$

6.2 พี-เอ็นจังค์ชันไดโอด

ต่อไปจะเป็นการพิจารณาถึงพี-เอ็นจังค์ชันในแง่ของไดโอด (diode) หรือ เรคติ-ฟายเออร์ (rectifier) ซึ่งมีการใช้งานใน 2 รูปแบบคือเมื่อมีการไบอัสตาม (forward bias) และไบอัสย้อน (reverse bias)

จากหัวข้อที่แล้วตรงบริเวณรอยต่อจะมีสนามไฟฟ้าภายในค่า $-d\phi_o/dx$ ซึ่งจะทำให้เกิดแรงกระทำกับอิเลคตรอนและโฮลในลักษณะที่ว่าอิเลคตรอนซึ่งเป็นพาหะนำประจุเอกในด้านเอ็นและโฮลซึ่งเป็นพาหะนำประจุเอกในด้านพีจะถูกด้านไม่ให้ไหลข้ามจังค์ชันโดยสะดวก ส่วนอิเลคตรอนในด้านพีซึ่งเป็นพาหะนำประจุรองและโฮลในด้านเอ็นซึ่งเป็นพาหะนำประจุรองเช่นกัน ถ้าเดินทางมาถึงบริเวณจังค์ชัน จะถูกเร่งโดยแรงนี้ให้ผ่านข้ามรอยต่อไปโดยเร็ว



รูป 6.6 พี-เอ็นจังค์ชันแสดงแถบพลังงาน ศักย์ไฟฟ้าผิวสัมผัส และฟลักซ์ของพาหะนำประจุต่างๆ

จะเห็นว่าอิเลคตรอนในแถบความนำของด้านเอ็น ซึ่งมีพลังงานศักย์สูงมากกว่ากำแพง (barrier) eØ ดังรูป 6.6 เท่านั้นที่จะสามารถแพร่ไปยังด้านพีได้ และเนื่องจากอิเลคตรอนที่ข้ามไปยังด้านพีเหล่านี้จะไปรวมตัวกับโฮลของด้านพี เราจึงเรียกฟลักซ์ของอิเลคตรอนเหล่านี้ว่า รีคอมบิเนชันฟลักซ์ (recombination flux) ถ้าการแพร่ยังดำเนินต่อไป Ø ก็จะมีค่ามากขึ้น รีคอมบิเนชันฟลักซ์ก็จะค่อยๆ น้อยลงจนในที่สุดมีค่าเท่ากับฟลักซ์ของอิเลคตรอนที่มาจากด้านพี (เกิดสมดุล และ $\emptyset \longrightarrow \emptyset_o$) ฟลักซ์ของอิเลคตรอนที่มาจากด้านพีเรียกว่า เจนเนอเรชันฟลักซ์ (generation flux) ซึ่งเกิดขึ้นจากการที่อิเลคตรอนและโฮลถูกสร้าง (generate) เป็นคู่ๆ โดยการโลดข้ามช่องว่างแถบพลังงานของอิเลคตรอน เนื่องจากความร้อน อัตราการสร้างนี้จะขึ้นกับอุณหภูมิ ขณะเดียวกันการรวมตัวกันใหม่ก็จะเกิดขึ้นแต่ที่อุณหภูมิคงที่ใดๆ จะยังคงมีจำนวนอิเลคตรอนและโฮลอิสระค่าหนึ่งซึ่งอัตราส่วนของความหนาแน่นของพาหะทั้งสองจะขึ้นกับความเข้มข้นของการโดปและอุณหภูมิดังได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 อิเลคตรอนในด้านพีซึ่งเป็นพาหะนำประจุรองนี้ เมื่อบังเอิญเคลื่อนที่มาถึงบริเวณรอยต่อ จะถูกแรงจากสนามไฟฟ้าภายในเร่งให้เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อไปยังด้านเอ็น ดังนั้นถ้าเราพิจารณาอิเลคตรอนจะพบว่ามีฟลักซ์ของอิเลคตรอน 2 ชนิดที่ข้ามรอยต่อคือ รีคอมบิเนชันฟลักซ์ J_{nr} ไหลจากด้านเอ็นไปด้านพี และเจนเนอเรชันฟลักซ์ J_{ng} ไหลจากด้านพีไปด้านเอ็น (รูป 6.4 และ 6.6) ที่สภาวะสมดุลฟลักซ์ทั้งคู่นี้จะมีขนาดเท่ากัน คือ

$$J_{nro} = J_{ngo} \qquad \ldots\ldots\ldots(6\text{-}17)$$

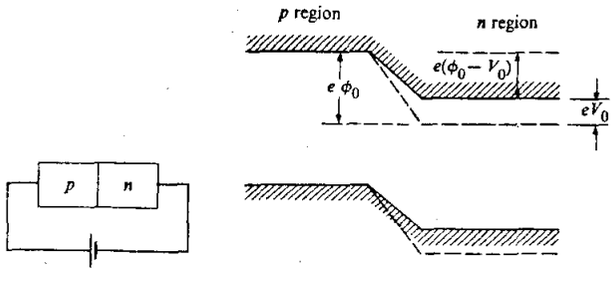
เมื่อ J_{nro} เป็นรีคอมบิเนชันฟลักซ์ที่สภาวะสมดุล และ J_{ngo} เป็นเจนเนอเรชันฟลักซ์ที่สภาวะสมดุล ขอให้สังเกตว่าขณะนี้เรากำลังพูดถึงฟลักซ์ของพาหะนำประจุ โดยยังไม่ได้สนใจถึงความเข้มของกระแสไฟฟ้า

โดยการพิจารณาโฮลในแถบวาเลนซ์ทำนองเดียวกับของอิเลคตรอนในแถบความนำ (ดูรูป 6.4 และ 6.6 ประกอบด้วย) ก็จะมีฟลักซ์ของโฮล 2 ชนิดที่ข้ามรอยต่อ คือ รีคอมบิเนชันฟลักซ์ของโฮล J_{pr} ไหลจากด้านพีไปด้านเอ็นและเจนเนอเรชันฟลักซ์ของโฮล J_{pg} ไหลจากด้านเอ็นไปด้านพี และที่สภาวะสมดุล

$$J_{pro} = J_{pgo} \qquad \ldots\ldots\ldots(6\text{-}18)$$

6.2.1 <u>ไบอัสตาม</u>

ต่อไปจะเป็นการอธิบายถึงคุณสมบัติการยอมให้เกิดการไหลทางเดียวหรือเรคติฟาย (rectify) ของพี-เอ็นจังค์ชัน สมมุติว่าแรงดันไฟฟ้าภายนอก V ได้ถูกต่อกับพี-เอ็นจังค์ชันในลักษณะที่ด้านพีต่อกับขั้วบวกและด้านเอ็นต่อกับขั้วลบ ดังรูป 6.7 ซึ่งเราเรียกลักษณะการต่อแบบนี้ว่าไบอัสตาม ผลของการไบอัสแบบนี้ทำให้ขอบด้านล่างของแถบความนำในด้านเอ็นสูงขึ้น eV ดังรูป 6.7 ซึ่งจะมีผลต่อฟลักซ์ของพาหะนำประจุและกระแสรวม



รูป 6.7 ไบอัสตามของพี-เอ็นจังค์ชันและแถบพลังงาน

เราอาจพิจารณาผลของ V อย่างง่ายๆ ก่อนก็ได้คือ จากสมการ (6-14) จะเห็นว่าศักย์ไฟฟ้าคร่อมจังค์ชันจะมีค่า $\phi_o - V$ ในที่นี้ V เป็นบวก นั่นคือศักย์ไฟฟ้าคร่อมจังค์ชันมีค่าลดลง หรือกล่าวได้ว่าสนามไฟฟ้าภายในมีค่าลดลง และเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายในนี้เป็นตัวต้านทานไม่ให้พาหะนำประจุเอกแพร่ข้ามรอยต่อ ดังนั้นเมื่อสนามไฟฟ้านี้มีค่าลดลงจะมีพาหะนำประจุเอกแพร่ข้ามรอยต่อได้เป็นจำนวนมาก* ผลก็คือมีกระแสผ่านจังค์ชันหรือไดโอดในทิศทางการต่อแบบ "ไบอัสตาม" เป็นจำนวนมาก

กรณีไบอัสตามนี้เราจะคำนวณเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ของพาหะนำประจุหรือกระแสกับศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับจังค์ชัน โดยพิจารณาฟลักซ์ของอิเลคตรอนก่อน จะเห็นว่าเจนเนอเรชันฟลักซ์ ไม่ถูกรบกวนจากศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่จังค์ชัน ดังนั้น

$$J_{ng} = J_{ngo} \qquad \ldots\ldots\ldots (6\text{-}19)$$

ทั้งนี้เป็นเพราะสนามไฟฟ้าภายในยังคงมีอยู่ดังเดิม และส่งแรงกระทำต่ออิเลคตรอนด้านพีที่เดินทางมาถึงรอยต่อให้วิ่งข้ามรอยต่อไปยังด้านเอ็นดังเดิม (ทั้งนี้ให้ $v < \phi_o$ ซึ่งในทางปฏิบัติหรือการใช้งานของไบอัสตามก็เป็นดังนี้) ส่วนรีคอมบิเนชันฟลักซ์จะได้รับอิทธิพลจากศักย์ไฟฟ้านี้ พิจารณารูป 6.7 จะเห็นว่าการที่ตอนล่างของแถบความนำถูกยกสูงขึ้น eV จะทำให้อิเลคตรอนในแถบความนำแพร่ข้ามกำแพงศักย์หรือรอยต่อเข้าไปยังด้านพีได้มากขึ้นกว่าเดิม เราให้อิเลคตรอนในแถบความนำมีการกระจายตามหลักสถิติของแมกซ์เวล-โบลทซ์มาน (เนื่องจาก k_BT มีค่าน้อย) จะเห็นว่าสัดส่วนของอิเลคตรอนที่แพร่ข้ามไปจะเพิ่มขึ้นด้วยแฟคเตอร์ e^{eV/k_BT} ดังนั้น

---

* ในแง่ของการข้ามรอยต่อเป็นการข้ามรอยต่อของพาหะนำประจุเอก แต่ความจริงเป็นการฉีดพาหะนำประจุรองเข้าไปยังด้านตรงข้าม เพราะกระแสไฟฟ้าเกิดจากการ "แพร่" ของพาหะที่ถูกฉีดเหล่านี้ ดูหัวข้อ 6.2.4

$$J_{nr} = J_{nro}\, e^{eV/k_BT} \qquad \text{.....(6-20)}$$

ฟลักซ์รวมของอิเลคตรอนที่แพร่ข้ามรอยต่อ $J_{nr} - J_{ng}$ จึงมีค่า

$$J_{nro}\, e^{eV/k_BT} - J_{ngo}$$

แต่เนื่องจาก $J_{ngo} = J_{nro}$ และฟลักซ์รวมนี้จะนำกระแสไฟฟ้า เนื่องจากอิเลคตรอนซึ่งมีประจุ - e ถ้าให้ความเข้มของกระแสนี้มีค่า J_n และกระแสมีค่า I_n ; $I_n = A\, J_n$ เมื่อ A เป็นพื้นที่หน้าตัดของพี-เอ็นจังค์ชัน

$$I_n = eA\,(J_{nr} - J_{ng}) = eA\, J_{ngo}\,(e^{eV/k_BT} - 1) \text{...(6-21)}$$

เราตัดเครื่องหมายลบออกไปเพราะกระแสนี้มีทิศจากขั้วบวกไปลบอยู่แล้ว

การคำนวณสำหรับโฮลจะเป็นเช่นเดียวกันกับอิเลคตรอนซึ่งถ้าให้ I_p เป็นกระแสเนื่องจากโฮลจะได้

$$I_p = eA\, J_{pgo}\,(e^{eV/k_BT} - 1) \qquad \text{.....(6-22)}$$

ทิศทางของ I_n และ I_p เป็นทิศทางเดียวกันคือจากขั้วบวกของแบตเตอรี่ไปยังขั้วลบ ดังนั้นจากการรวมสมการ (6-21) และ (6-22) จะได้

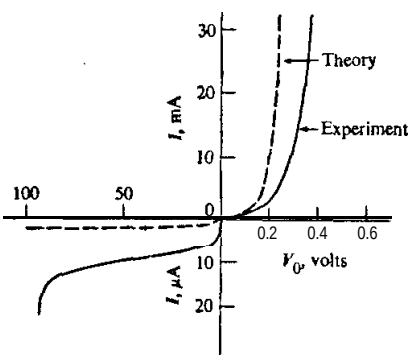
$$I = I_n + I_p = eA(J_{ngo} + J_{pgo})(e^{eV/k_BT} - 1)$$

ซึ่งอยู่ในรูป

$$I = I_o \left(e^{eV/k_BT} - 1\right) \qquad \text{.....(6-23)}$$

เมื่อ $$I_o = eA \left(J_{ngo} + J_{pgo}\right) \qquad \text{.....(6-24)}$$

รูป 6.8 แสดงคุณสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า (current - voltage characteristic) ของไดโอดหรือพี-เอ็นจังค์ชัน จะเห็นว่ากรณีไบอัสตาม I เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วกับ V โดยมีลักษณะการเพิ่มขึ้นเป็นเอกซ์โปเนนเชียล ทั้งนี้เป็นเพราะปกติ $eV >> k_BT$ (ที่อุณหภูมิห้อง $k_BT/e \simeq 0.025$ โวลต์) ดังนั้นเราอาจประมาณความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้าของไดโอดได้ดังนี้



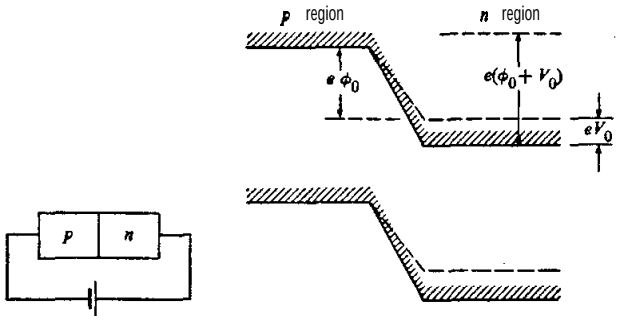
รูป 6.8 คุณสมบัติกระแส-แรงดัน ของพี-เอ็นจังค์ชัน (จงสังเกตสเกลที่แตกต่างกัน)

$$I \simeq {}_{0}Ie^{eV/k_BT} \qquad \text{.....(6-25)}$$

I_o เป็นค่าคงที่ซึ่งไม่ขึ้นกับ V แต่จะขึ้นกับคุณสมบัติภายในของสารกึ่งตัวนำ ความเข้มข้นของการโดปและอุณหภูมิ ดังจะได้พิสูจน์ต่อไป

6.2.2 **ไบอัสย้อน**

ถ้าต่อขั้วไฟฟ้าจากแบตเตอรีกลับกันกับครั้งที่แล้วคือต่อขั้วบวกเข้ากับด้านเอ็นและขั้วลบเข้ากับด้านพีของจังค์ชัน เราจะเรียกการต่อแบบนี้ว่าไบอัสย้อน รูป 6.9 แสดงภาพการต่อและแผนผังของแถบพลังงาน จะเห็นว่ากรณีไบอัสย้อนนี้กำแพงศักย์มีความสูงมากขึ้นด้วยขนาด eV การพิจารณาผลของ V ต่อฟลักซ์ของพาหะนำประจุที่ข้ามรอยต่อในกรณีนี้ สามารถพิจารณาได้ดังเช่นในกรณีของไบอัสตาม ซึ่งจะได้ว่า เจนเนอเรชันฟลักซ์ไม่ได้รับอิทธิพลจาก V เนื่องจากสนามไฟฟ้าภายในยังคงมีอยู่และสามารถที่จะเร่งพาหะนำประจุรองข้ามรอยต่อไปยังด้านตรงข้าม



รูป 6.9 ไบอัสย้อนและแผนผังแถบพลังงาน

ได้ดังเดิม ส่วนรีคอมบิเนชันฟลักซ์เนื่องจากกำแพงศักย์สูงมากขึ้นกว่าเดิม ดังนั้นจะมีค่าลดลงทั้งของอิเลคตรอนและโฮลด้วยแฟคเตอร์ e^{-eV/k_BT} ทำให้ได้ผลลัพท์เป็น

$$I = I_n + I_p = eA(J_{ngo} - J_{nr}) + eA(J_{pgo} - J_{pr})$$

$$= eA\, J_{ngo}(1 - e^{-eV/k_BT}) + eA\, J_{pgo}(1 - e^{-eV/k_BT})$$

หรือ $$I = I_o\,(1 - e^{-eV/k_BT}) \qquad .....(6\text{-}26)$$

สมการ (6-26) แสดงคุณสมบัติกระแส-แรงดันของไบอัสย้อน และเนื่องจากตามปกติ $eV >> k_BT$ ดังนั้นจะเห็นว่าเทอมเอกซ์โปเนนเชียล มีค่าน้อยกว่า 1 มาก ดังนั้นกรณีไบอัสย้อนเราจะประมาณได้ว่า

$$I \simeq I_0 \qquad .....(6\text{-}27)$$

ทั้งสมการ (6-23) และ (6-26) อาจ เขียนด้วยรูป เดียวกันคือ

$$I = I_o\,(e^{eV/k_BT} - 1) \qquad .....(6\text{-}28)$$

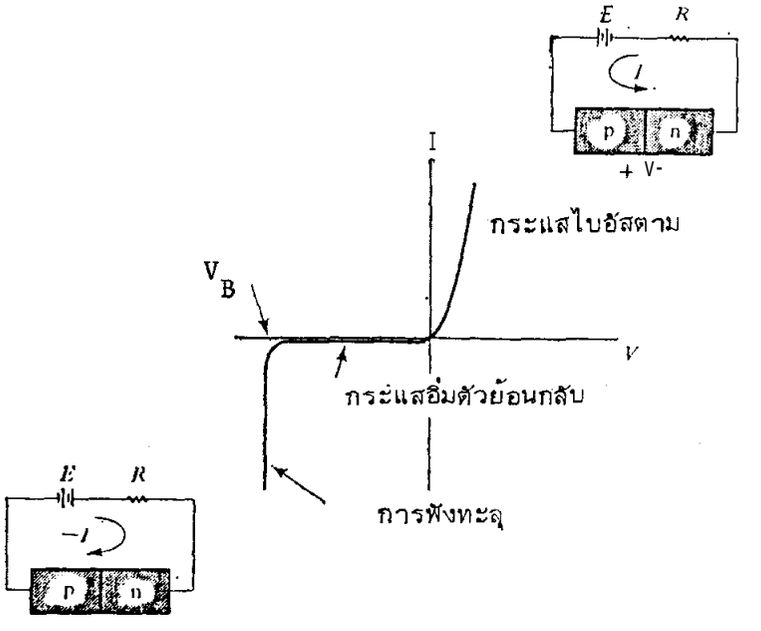
เมื่อกำหนดเครื่องหมายของ V เป็นบวกสำหรับไบอัสตามและเป็นลบสำหรับไบอัสย้อน และ I เป็นบวกเมื่อมีทิศทางจากด้านพีไปสู่ด้านเอ็นและเป็นลบในกรณีตรงข้าม พลอตของคุณสมบัติกระแส-แรงดัน ของพี-เอ็นจังค์ชัน สำหรับการไบอัสทั้ง 2 แบบ แสดงไว้ในรูป 6.8 จะเห็นว่าค่ากระแสในกรณีไบอัสตามมีค่าสูงกว่ากระแสในกรณีไบอัสย้อนมาก (สำหรับค่า $|V|$ เท่ากัน) ซึ่ง

หมายความว่าจังค์ชันมีลักษณะ เป็น เรคติฟาย เออร์ที่ยอมให้กระแสไหลจากด้านพีไปสู่ด้าน เอ็นได้มากกว่า

สำหรับกระแส I_o ซึ่งค่ากระแสโดยประมาณของไบอัสย้อนมีค่า เท่านี้ มีชื่อว่า " กระแสอิ่มตัว (saturation current) " หรือกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (reverse saturation current) ค่าตามปกติของกระแสแบบไบอัสย้อนคือ 10 $\mu A/cm^2$ ค่ากระแสของไบอัสตามขึ้นกับแรงดันภายนอกมาก แต่จะมีค่าทั่วๆ ไปประมาณ 100 mA สำหรับค่า V = 0.2 โวลต์

6.2.3 <u>การทะลายของกระแสไฟฟ้า</u>

จากหัวข้อที่แล้ว เราพบว่าพี-เอ็นจังค์ชัน เมื่อถูกไบอัสย้อนจะมีค่ากระแสประมาณ เท่ากับค่ากระแสอิ่มตัว ซึ่งไม่ขึ้นกับแรงดันไฟฟ้า ปรากฏการณ์นี้เป็นจริงจนกระทั่งแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงถึงค่าวิกฤตค่าหนึ่ง ซึ่งที่แรงดันไฟฟ้าขนาดนั้นจะ เกิดการทะลายหรือการพังทะลุของกระแสไฟฟ้า (electric breakdown) คือกระแสจะมีค่า เพิ่มขึ้นอย่างรวด เร็วดังรูป 6.10 แรงดันวิกฤตนี้

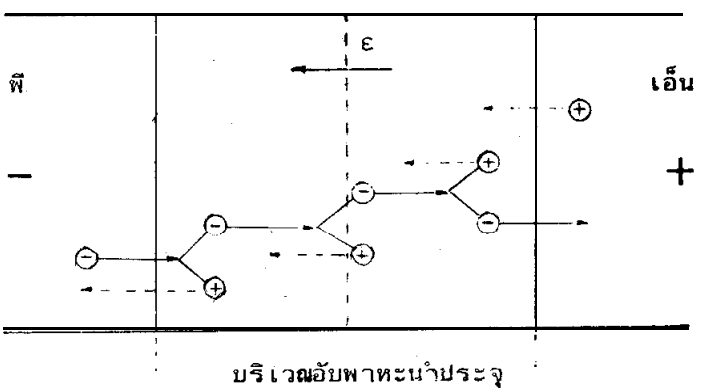


รูป 6.10 การทะลายหรือพังทะลุในพี-เอ็นจังค์ชัน

เรียกว่า " เบรคดาวน์ โวลเตจ (breakdown voltage) " หรือศักย์ทะลาย V_B การทะลายของกระแสนี้จะไม่ทำให้ไดโอดเสียหาย ถ้ากระแสถูกจำกัดค่าไว้ที่ค่าเหมาะสมโดยอาศัยวงจรภายนอก จากวงจรในรูป 6.10 จะเห็นว่ากระแสสูงสุดที่สามารถไหลผ่านในวงจรมีค่าประมาณ $(E - V_B)/R$ ดังนั้นเราสามารถเลือก R ให้เหมาะสมที่จะทำให้ไดโอดทำงานได้โดยปลอดภัยในย่านที่เกิดการพังทะลุของกระแส

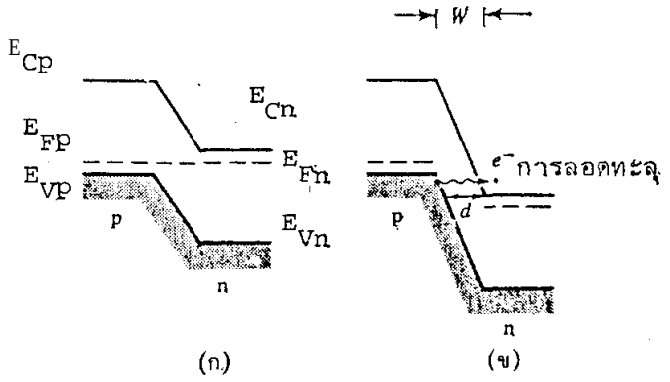
กลไกของการทะลายหรือพังทะลุในพี-เอ็นจังค์ชันที่สำคัญมี 2 แบบ คือ

1. อะวาลันช์เบรคดาวน์ (Avalanche breakdown) ในกรณีนี้อิเลคตรอนบางตัวที่บริเวณรอยต่อถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับที่มีค่าสูงพอ จนกระทั่งอิเลคตรอนนี้มีพลังงานจลน์มากพอที่จะไปกระตุ้น (excite) อิเลคตรอนในบอนด์ให้หลุดออกไปเป็นอิสระ ทำให้เกิดคู่ของอิเลคตรอนและโฮลขึ้นมาใหม่ อิเลคตรอนตัวใหม่จะถูกเร่งและไปทำให้เกิดคู่ของอิเลคตรอนและโฮลคู่ใหม่เป็นดังนี้ไปเรื่อยๆ ผลก็คือทำให้กระแสจากการฉีดพาหะนำประจุเหล่านี้ (ซึ่งจะเข้าไปเป็นพาหะนำประจุเอกในด้านตรงข้ามและกระแสเกิดจากการแพร่ ดูหัวข้อ 6.2.4) มีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วดังรูป 6.11 อะวาลันช์เบรคดาวน์จะเกิดขึ้นในกรณีที่รอยต่อสร้างโดยสารกึ่งตัวนำที่มีความเข้มของการโดปน้อย ซึ่ง V_B จะมีค่าสูง



รูป 6.11 อะวาลันช์เบรคดาวน์

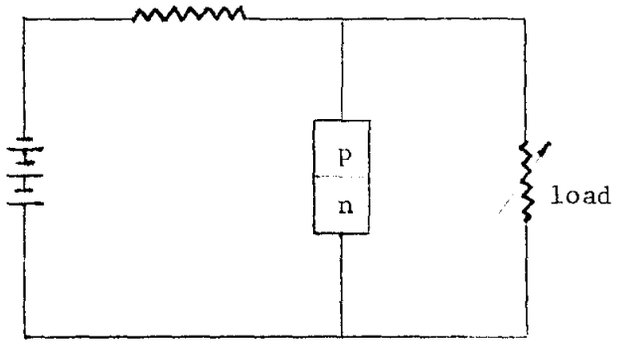
2. ซีเนอร์เบรคดาวน์ (Zener breakdown) ในกรณีที่รอยต่อสร้างจากสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็นที่โดปด้วยความเข้มข้นของสารเจือสูงมาก ศักย์ไฟฟ้าผิวสัมผัส ϕ_o จะมีค่าสูง และความหนาของรอยต่อหรือบริเวณอัยพาทะนำประจุจะแคบ ซึ่งจะทำให้สนามไฟฟ้าภายในมีค่าสูงมาก เมื่อจังค์ชันแบบนี้ได้รับการไบอัสย้อน กำแพงศักย์ซึ่งสูงอยู่แล้วจะยิ่งสูงมากขึ้น จนกระทั่ง



รูป 6.12 ซีเนอร์เอฟเฟค แสดงแผนผังแถบพลังงานของจังค์ชันที่มีความเข้มข้นของสารเจือสูงที่ภาวะสมดุล (ก) และเมื่อมีการไบอัสย้อน (ข)

ตอนบนของแถบวาเลนซ์ด้านพี ขึ้นมาอยู่ระดับเดียวหรือซ้อนกับตอนล่างของแถบความนำด้านเอ็นดังรูป 6.12 และทำให้เกิดการลอดทะลุ (tunneling) ของอิเลคตรอนขึ้น จากการที่ w มีค่าน้อย ดังนั้น d ซึ่งเป็นระยะของการลอดทะลุของอิเลคตรอนจากตอนบนของแถบวาเลนซ์ด้านพีไปสู่แถบความนำด้านเอ็นจะมีค่าน้อยและพบว่าค่า d จะลดลงเมื่อแรงดันไบอัสย้อนมีค่ามากขึ้น ดังนั้นที่แรงดันสูงถึงค่าหนึ่ง d จะมีค่าน้อยมากและการซ้อนกันของแถบพลังงานจะมากด้วย ผลก็คือจะเกิดการลอดทะลุของอิเลคตรอนจากด้านพีไปสู่ด้านเอ็นเป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดกระแสย้อนกลับเป็นจำนวนมาก คือเกิดการทะลายของกระแสไฟฟ้านั่นเอง (ดูเพิ่มเติมในหัวข้อ 6.3)

ซีเนอร์ไดโอดหรือการใช้งานลักษณะนี้มักใช้กับวงจรที่เป็นโวลเตจเรกกูเลเตอร์ (voltage regulator) ดังรูป 6.13

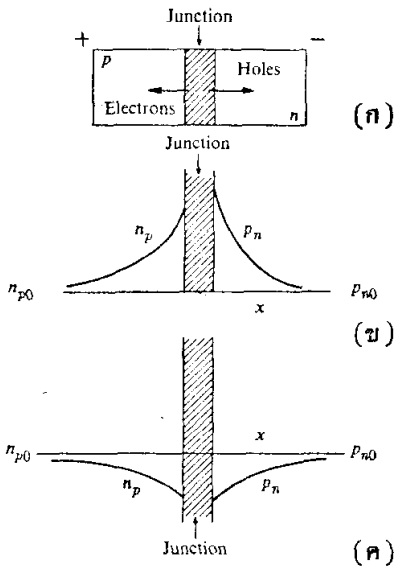


รูป 6.13 วงจรโวลเตจเรกกูเลเตอร์ : ไดโอดที่ใช้งานภายใต้ไบอัสย้อนที่ศักย์ทะลาย

ในกรณีที่ศักย์ทะลายมีค่าน้อย ($\simeq$ 4 โวลต์) ซีเนอร์เอฟเฟคจะเด่นชัดหรือเป็นกลไกสำคัญของการทะลายทางไฟฟ้า แต่ถ้าศักย์ทะลายมีค่าสูง ($\simeq$ 8 โวลต์) อะวาลันช์เบรคดาวน์จะเป็นกลไกสำคัญ และสำหรับที่ศักย์ทะลายค่าปานกลางผลของกลไกทั้งสองจะพอๆ กัน ในแง่ของบอนด์ซีเนอร์เบรคดาวน์ คือการที่อิเลคตรอนถูกทำให้หลุดจากบอนด์โดยการ "ดึง" จากสนามไฟฟ้า ส่วนอะวาลันช์เบรคดาวน์คือการที่อิเลคตรอนถูกทำให้หลุดจากบอนด์โดยการ "ชน" ของอิเลคตรอนที่มีพลังงานสูง

6.2.4 <u>กระแสอิ่มตัว</u>

เราสามารถคำนวณหาค่ากระแสอิ่มตัว I_0 ได้ดังนี้ ในกรณีไบอัสตามและพิจารณากระแสจากโฮล เมื่อให้แรงดันไฟฟ้า V แก่พี-เอ็นจังค์ชัน กำแพงศักย์จะลดลง โฮลถูกฉีด (inject) เข้ามาจากด้านพีซึ่งมีโฮลเป็นพาหะนำประจุเอกเข้าไปยังด้านเอ็นซึ่งโฮลเป็นพาหะนำประจุรองดังรูป 6.14



รูป 6.14 การฉีดพาหะนำประจุรองโดยการไบอัสตาม (ก), การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของพาหะนำประจุรองเทียบกับตำแหน่ง (ข), และกรณีไบอัสย้อน (ค)

ในด้านเอ็นโฮลที่ถูกฉีดข้ามรอยต่อเข้ามาจะแพร่อย่างอิสระ เหมือนกรณีที่ไม่มีสนามไฟฟ้า แต่เนื่องจากขบวนการรวมตัวกันใหม่ความหนาแน่นของโฮลส่วนเกินจึงค่อยๆ ลดลงสู่ค่าสมดุล p_{no} ที่ระยะของการแพร่ L_p (นับจากรอยต่อลึกเข้าไปในด้านเอ็นดังรูป 6.14) ดังนั้นเราสามารถเขียนค่าความหนาแน่นของโฮลส่วนเกินในด้านเอ็นได้ดังนี้

$$p_{n1}(x) = p_n(x) - p_{no} = \left[(p_{n1})_{x=0}\right] e^{-x/L_p} \quad ; x > 0$$

.....(6-29)

เมื่อ $(p_{n1})_{x=0}$ คือค่าความหนาแน่นของโฮลส่วนเกินที่ตรงรอยต่อด้านเอ็นความหนาแน่นของโฮลจะมีค่าลดลงอย่างเอกซ์โปเนนเชียลกับตำแหน่งดังรูป 6.14 (ข) จะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้า

จากโฮลเป็นกระแสที่เกิดจาก "การแพร่" ซึ่งมาจากเกรเดียนท์ของความหนาแน่นของโฮลในด้านเอ็นนั่นเอง*

ดังนั้นเราอาจกล่าวได้ว่าในกรณีของการไบอัสตามโฮลจะถูกฉีดเข้ามาอย่างสม่ำเสมอจากด้านพีไปสู่ด้านเอ็น ขณะเดียวกันอิเลคตรอนก็ถูกฉีดเข้ามาอย่างสม่ำเสมอจากด้านเอ็นไปสู่ด้านพี และกระแสไฟฟ้าเกิดจากการฉีดและการแพร่ของ "พาหะนำประจุรอง"

การคำนวณหาค่ากระแสจากโฮลเราจะต้องทราบค่า $(p_{nl})_{x=0}$ หรือค่าความหนาแน่นของโฮลที่ $x = 0$; $(p_n)_{x=0}$; ค่าความหนาแน่นของโฮลที่ $x = 0$ มีค่ามากกว่าความหนาแน่นสมดุลเนื่องจากกำแพงศักย์มีค่าลดลงด้วยปริมาณ eV เมื่อ V เป็นศักย์ไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้าภายนอก ดังนั้นเราจะได้ค่า $(p_n)_{x=0}$ โดยใช้สถิติของโบลทซ์มาน

$$(p_n)_{x=0} = p_{no} e^{eV/k_BT} \qquad \ldots\ldots\ldots(6\text{-}30)$$

และสำหรับ $(p_{nl})_{x=0}$ ซึ่งเท่ากับ $(p_n)_{x=0} - p_{no}$ จะมีค่า

$$(p_{nl})_{x=0} = p_{no} (e^{eV/k_BT} - 1) \qquad \ldots\ldots\ldots(6\text{-}31)$$

แทนค่าในสมการ (6-29) จะได้

---

* จงสังเกตว่าในสารกึ่งตัวนำธรรมดาทั่วๆ ไป เมื่อต่อแรงดันไฟฟ้าจากภายนอก กระแสจะเกิดจาก "การเคลื่อนย้าย - drift" ของอิเลคตรอนและโฮลอิสระภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า แต่ในกรณีพี-เอ็นจังค์ชันที่ให้แรงดันไฟฟ้าจากภายนอกกระแสจะเกิดจาก "การแพร่ - diffuse" ของอิเลคตรอนและโฮล

$$p_{nl} = p_{no} \left(e^{eV/k_BT} - 1\right) e^{-x/L_p} ; x > 0 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (6\text{-}32)$$

จากกฎของฟิค (ดูหัวข้อ 3.5) เราทราบว่าฟลักซ์ของโฮลมีค่า

$$J_{pn} = -D_p \frac{\partial p_n}{\partial x} = - D_p \frac{\partial p_{nl}}{\partial x} \quad \ldots\ldots\ldots (6\text{-}33)$$

แทนค่า p_{nl} จากสมการ (6-32) ในสมการ (6-33) จะได้ฟลักซ์ที่ตำแหน่ง x ใดๆ แทนค่า $x = 0$ จะได้ฟลักซ์ที่ตำแหน่งนั้น ซึ่งเมื่อคูณด้วยประจุ e และพื้นที่หน้าตัด A จะได้กระแสเนื่องจากโฮลที่ตำแหน่งนั้นดังนั้น

$$(I_{pn})_{x=0} = \frac{e A D_p p_{no}}{L_p} \left(e^{eV/k_BT} - 1 \right) \quad \ldots\ldots\ldots (6\text{-}34)$$

ถึงแม้ว่ากระแสนี้จะเป็นที่ $x = 0$ แต่ก็เป็นกระแสที่ไหลในทุกๆ ตำแหน่ง (x) ของด้านเอ็นนั่นเอง (จริงๆ แล้ว I_{pn} จะมีค่าลดลง ณ.จุดที่ห่าง $x = 0$ ออกมาแต่เนื่องจากขณะที่โฮลเกิดการรวมตัวกับอิเลคตรอนบริเวณข้างๆ รอยต่อทำให้ความหนาแน่นของอิเลคตรอนบริเวณนั้นลดลง จะเกิดการแพร่ของอิเลคตรอนซึ่งเป็นพาหะนำประจุเอกเข้ามาจากทางด้านปลายสุดของด้านเอ็นเพื่อรักษาสภาพความเป็นกลาง ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเนื่องจากอิเลคตรอนเสริมเข้ามา ยิ่งที่ห่างออกไปจากตำแหน่ง $x = 0$ กระแสเนื่องจากโฮลจะลดลงขณะที่กระแสจากอิเลคตรอนเพิ่มขึ้น ส่วนผลรวมของกระแสยังคงมีค่าเท่ากับกระแสจากโฮลที่ตำแหน่ง $x = 0$)

เราสามารถหาค่ากระแสเนื่องจากการแพร่ของอิเลคตรอนในด้านพีได้ทำนองเดียวกันกับการหาค่ากระแสของโฮล โดยคิดว่าการไบอัสตามอิเลคตรอนจะถูกฉีดอย่างสม่ำเสมอข้ามรอยต่อจากด้านเอ็นไปสู่ด้านพี (เป็นการฉีดพาหะนำประจุรองเช่นเดิม) และเกิดการแพร่เข้าไป

ในด้านพีทำให้เกิดกระแส เนื่องจากการแพร่ จากการคำนวณเช่นเดียวกับของโฮลจะได้กระแสจากอิเลคตรอนที่ x = 0 (ของด้านพี) ซึ่งเป็นกระแสที่ตำแหน่งอื่นๆ ของด้านพีด้วยเช่นกัน

ค่ากระแสทั้งหมดคือกระแสรวมจากการแพร่ของอิเลคตรอนในด้านพีและการแพร่ของโฮลในด้านเอ็นดังนั้นจากสมการ (6-34)

$$I = eA \left(\frac{D_p p_{no}}{L_p} + \frac{D_n n_{po}}{L_n} \right) (e^{eV/k_BT} - 1) \quad \ldots\ldots\ldots (6\text{-}35)$$

เปรียบเทียบกับสมการ (6-35) กับสมการ (6-23) จะได้

$$I_o = eA \left(\frac{D_n n_{po}}{L_n} + \frac{D_p p_{no}}{L_p} \right) \quad \ldots\ldots\ldots (6\text{-}36)$$

จะเห็นว่า I_o อยู่ในเทอมของคุณสมบัติของสาร คือสัมประสิทธิการแพร่ ระยะการแพร่และความหนาแน่นของพาหะนำประจุรองที่สภาวะสมดุล

สมการ (6-35) ช่วยในเรื่องการออกแบบหรือเลือกคุณลักษณะของสารที่จะนำมาทำเป็นไดโอด เช่นถ้าไดโอดนั้นใช้งานภายใต้กระแสไบอัสตามค่าสูงๆ เราก็จะต้องเลือกสารที่ให้ I_o ค่าน้อย นั่นคือสารกึ่งตัวนำที่ใช้จะต้องมีช่องว่างแถบพลังงานกว้าง ซึ่งสามารถจะแสดงให้เห็นได้ดังนี้คือ จากสมการ (6-36) ถ้าเขียนในเทอมของพาหะนำประจุเอกโดยใช้ความสัมพันธ์

$$n_{no} p_{no} = p_{po} n_{po} = n_i^2 \quad \ldots\ldots\ldots (6\text{-}37)$$

n_i คือความหนาแน่นอินทรินซิคที่อุณหภูมิ T ใดๆ ซึ่งแปรผันกับ $e^{-E_g/2k_BT}$ (ดูบทที่ 3) ดังนั้น

จึงสามารถเขียนสมการ (6-36) ในเทอมของความหนาแน่นของพาหะนำประจุเอกที่สภาวะสมดุลได้ดังนี้

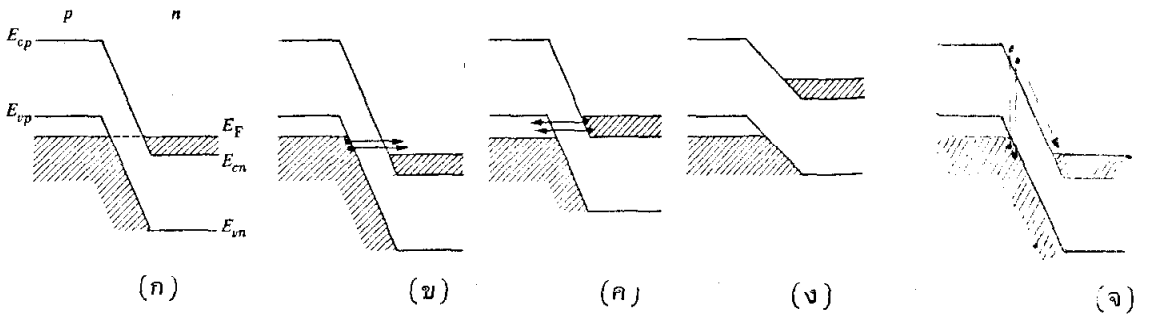
$$I_0 = e n_i^2 A \left(\frac{D_n}{L_n p_{po}} + \frac{D_p}{L_p n_{no}} \right) \qquad \ldots\ldots\ldots(6\text{-}38)$$

จะเห็นว่า I_o เป็นค่าที่แปรผันกับอุณหภูมิและเนื่องจากเทอมอื่นๆ ขึ้นกับอุณหภูมิน้อยมากเมื่อเทียบกับ n_i^2 ซึ่งแปรผันกับ e^{-Eg/k_BT} ($p_{po} \simeq N_A$, $n_{no} \simeq N_D$) ดังนั้นเราจะถือว่า I_o ของไดโอดขึ้นกับ e^{-E_g/k_BT} นั่นคือถ้าจะให้ I_o มีค่าน้อย E_g จะต้องมีค่ามากในการประยุกต์ใช้ประโยชน์ ไดโอดที่ทำงานภายใต้กระแสไบอัสตามค่าสูงและที่อุณหภูมิสูง จึงสร้างจากซิลิคอนมากกว่าเจอร์เมเนียม

6.3 ทันเนลไดโอด

ทันเนลไดโอด (tunnel diode) ประดิษฐ์ขึ้นโดยอีซากิ (Esaki) ในค.ศ.1958 เป็นไดโอดที่ทำงานได้ทั้งในลักษณะของแอมปลิฟายเออร์และออสซิลเลเตอร์ และสามารถทำงานในย่านความถี่สูงถึงย่านไมโครเวฟได้ด้วย ไดโอดประเภทนี้สร้างโดยการโดปสารกึ่งตัวนำให้เป็นพี-เอ็นจังค์ชันด้วยความเข้มของสารเจือสูงมาก เช่นประมาณ 10^{19} cm^{-3} ภายใต้ความเข้มนี้ศักย์ไฟฟ้าผิวสัมผัส ϕ_o จะมีค่าสูง ความหนาแน่นของแถบอัยพาหะนำประจุจะน้อยมากและสนามไฟฟ้าภายในมีค่าสูงมาก เช่น 900 kV/cm (ดูสมการ 6-4, 6-12 และ 6-13)

ระดับพลังงานของสารเจือจะแผ่กว้างออกเป็นแถบพลังงานและซ้อนกัน (overlap) กับแถบความนำหรือแถบวาเลนซ์ ความหนาแน่นของพาหะนำประจุมีค่าสูงมากจนกระทั่งอิเลคตรอนและโฮลมีการกระจายตามฟังค์ชันดีเจนเนอเรท เฟอร์มิ-ดิแรค (degeneratate Fermi-Dirac statistic) ทำนองเดียวกับอิเลคตรอนในโลหะและระดับเฟอร์มิเข้าไปอยู่ในแถบพลังงานดังรูป 6.15 (ก)

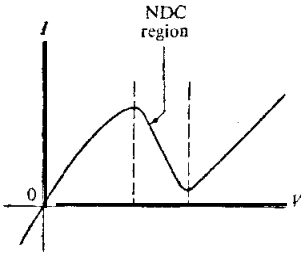


รูป 6.15 แผนผังแถบพลังงานของทันเนลไดโอด : (ก) ที่สภาวะสมดุล, (ข) กระแสค่าสูงมากของไบอัสย้อนจากการลอดทะลุ, (ค) การลอดทะลุไม่มากนักในไบอัสตามเมื่อ V มีค่าน้อย, (ง) ไม่มีการลอดทะลุสำหรับไบอัสตามเมื่อ V สูงขึ้น (จ) การทะลายแบบอะ-วาลันช์ในแนวดิ่งเทียบกับแบบลอดทะลุ

เมื่อมีการไบอัสย้อนให้แก่ทันเนลไดโอด ตอนล่างของแถบความนำทางด้านเอ็นจะลดลงมา e $|V|$ และระยะ d จะมีค่าน้อยลง อิเลคตรอนจำนวนมากจากแถบวาเลนซ์ของด้านพีจะลอดทะลุเข้ามายังสถานะว่างในแถบความนำของทางด้านเอ็นทำให้เกิดกระแสค่าสูงมาก (ในภาวะสมดุลไม่เกิดการลอดทะลุเนื่องจากไม่มีสถานะว่างที่ระดับพลังงานเดียวกันในแถบความนำดังรูป 6.15 ก.) ขบวนการลอดทะลุเป็นผลจากกลศาสตร์ควอนตัมล้วนๆ การไบอัสย้อนทำให้แถบความนำด้านเอ็นลดลงและมีสถานะว่างที่ระดับพลังงานเดียวกับอิเลคตรอนในแถบวาเลนซ์ด้านพี (ดูรูป 6.15 ข.) เนื่องจากความหนาแน่นของอิเลคตรอนในแถบวาเลนซ์ด้านพีมีค่าสูงมากและสนามไฟฟ้าภายในก็มีค่าสูงมากอยู่แล้วดังนั้นการไบอัสย้อนทันเนลไดโอดแม้ที่ V ต่ำๆ ก็จะทำให้เกิดการทะลายของกระแสไฟฟ้า การทะลายแบบลอดทะลุหรือซีเนอร์เอฟเฟคนี้แสดงเปรียบเทียบ

ไว้กับอะวาลันช์เบรคดาวน์ในรูป 6.15 (จ) ซึ่งในกรณีหลังอิเลคตรอนเกิดทรานซิสชันตามแนวดิ่งแล้วเคลื่อนที่เข้าไปสู่ด้านเอ็นด้วยอิทธิพลของสนามไฟฟ้าภายใน

ลักษณะที่น่าสนใจและมีประโยชน์มากของทันเนลไดโอดเกิดขึ้นเมื่อมีไบอัสตาม รูป 6.15 (ค) แสดงผลเมื่อไบอัสตามด้วยศักย์ไฟฟ้าค่าน้อยๆ กระแสเกิดจากการลอดทะลุของอิเลคตรอนด้านเอ็นไปยังสถานะว่างตอนบนของแถบวาเลนซ์ด้านพี เมื่อ V ค่อยๆ มีค่าสูงขึ้น ตอนล่างของแถบความนำในด้านเอ็นจะค่อยๆ สูงขึ้น กระแสจะเพิ่มตามไปด้วย เพราะอิเลคตรอนสามารถจะลอดทะลุได้มากขึ้น เมื่อ V สูงถึงค่าหนึ่งสถานะว่างที่อิเลคตรอนจะลอดทะลุไปหา จะมีจำนวน



รูป 6.16 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของทันเนลไดโอด

ลดน้อยลง และแถบพลังงานเริ่มจะอยู่ต่างระดับกัน (ไม่ซ้อนกัน) ดังรูป 6.15 (ง) ทำให้กระแสลดลงอย่างรวดเร็วสู่ค่าต่ำสุดค่าหนึ่งดังภาพ 6.16 และเมื่อ V มีค่ามากขึ้นต่อไปอีก กำแพงศักย์จะมีค่าลดลงมากและกระแสจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเนื่องจากการแพร่ของพาหะข้ามรอยต่อตามปกติ ซึ่งรายละเอียดได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่แล้ว

ในรูป 6.16 บริเวณที่น่าสนใจมากคือ NDC ซึ่งเป็นบริเวณที่การเพิ่มค่า V ทำให้ I มีค่าลดลง ทันเนลไดโอดในช่วง NDC นี้เองที่สามารถใช้งานเป็นแอมปลิฟายเออร์หรือออสซิล