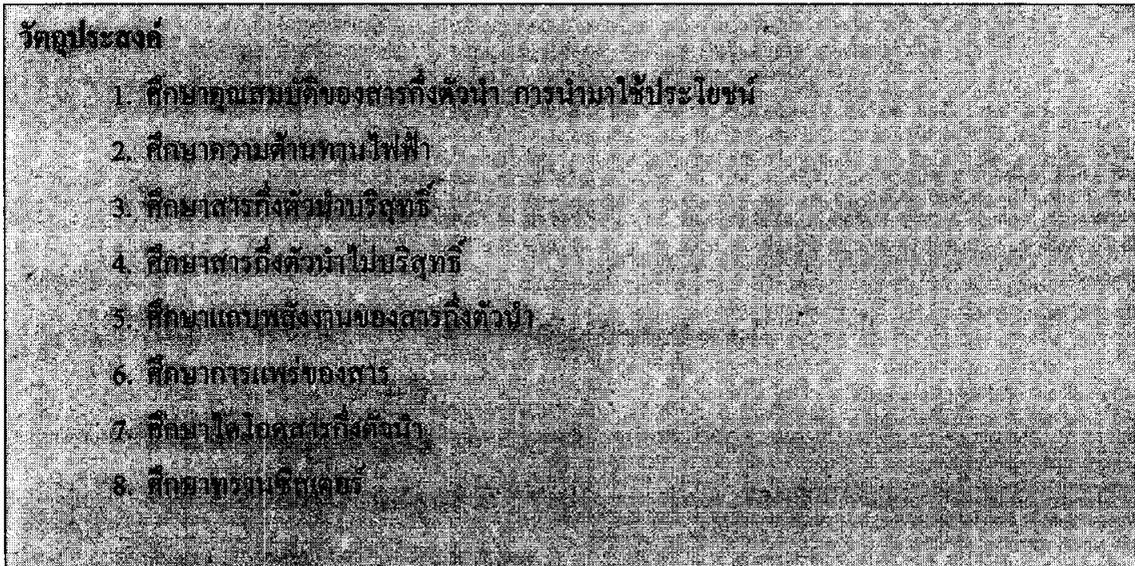


บทที่ 5

สารกึ่งตัวนำ



เราสามารถแบ่งสารตามคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็น ตัวนำ สารกึ่งตัวนำ และฉนวน โดยที่ตัวนำมีความต้านทานจำเพาะน้อยกว่า $10^{-3} \Omega m$ สารกึ่งตัวนำมีความต้านทานจำเพาะ อยู่ระหว่าง 10^{-3} และ $10^5 \Omega$ และฉนวนมีความต้านทานจำเพาะมากกว่า $10^5 \Omega m$

5.1 การนำไฟฟ้าในตัวนำ

เมื่อให้สนามไฟฟ้าแก่ตัวนำ จะทำให้อิเล็กตรอนในตัวนำเกิดการเคลื่อนที่ ความเร็วของอิเล็กตรอนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของสนามไฟฟ้า ถ้าสนามไฟฟ้ามีความเข้ม E โวลต์ต่อเมตร อิเล็กตรอนมีความเร็ว U เมตร ต่อ วินาที จะเขียนในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$U \propto E$$

ดังนั้น

$$U = \mu E$$

เมื่อ μ เป็นค่าคงที่สำหรับตัวนำแต่ละชนิด แสดงถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของพาหะ ซึ่งในที่นี้ ก็คือ อิเล็กตรอน มีชื่อเรียกว่า ความคล่องตัว (mobility) มีหน่วยเป็น เมตร²/โวลต์-วินาที

ผลจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น ถ้าในตัวนำนั้นมีอิเล็กตรอนจำนวน n ตัวใน 1 ลูกบาศก์เมตร จะหาความหนาแน่นของกระแส (Current density, J) ได้ดังนี้

$$J = neU = ne\mu E$$

แต่

$$J = \sigma E$$

ดังนั้น

$$\sigma = ne\mu$$

เมื่อ σ = ความนำจำเพาะ หน่วยเป็น $mhos/m$

$$\text{ความต้านทานจำเพาะ } (\rho) = \frac{1}{\text{ความนำจำเพาะ } (\sigma)}$$

สำหรับตัวนำซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด A (m^2) และความยาว l (m) กระแสไฟฟ้า (I) จะมีค่าดังนี้

$$I = JA = \sigma AE = \sigma A \frac{V}{l}$$

เมื่อ ความนำ (Conductance) = $G = \sigma \frac{A}{l}$ หน่วยเป็นโมห์ ความต้านทาน (R) จะมีค่าดังนี้

$$R = \frac{V}{I} = \frac{1}{G} = \frac{l}{\sigma A} = \rho \frac{l}{A}$$

ตัวอย่างที่ 5.1 ความต้านทานจำเพาะของทองแดงที่อุณหภูมิ 20°C เท่ากับ $1.73 \times 10^{-8} \Omega - m$ จงหาความเร็วของอิเล็กตรอนในทองแดงซึ่งพื้นที่หน้าตัด $10^{-6} m^2$ มีกระแสไหลจำนวน $4 A$ กำหนดให้ ทองแดงมีน้ำหนักอะตอมเท่ากับ 63.6 ความหนาแน่นเท่ากับ $8.9 g/cm^3$

วิธีทำ จากกฎของอะโวกราโดหาจำนวนอะตอมในหนึ่งลูกบาศก์เมตร (n_A) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} n_A &= \frac{6.023 \times 10^{23} (\text{อะตอม / กรัมอะตอม}) \times 8.9 \times 10^6 (\text{กรัม / } m^3)}{63.6 (\text{กรัม / กรัมอะตอม})} \\ &= 8.43 \times 10^{28} \text{ อะตอม / } m^3 \end{aligned}$$

สมมุติว่า หนึ่งอะตอมให้อิเล็กตรอนอิสระ 1 ตัว ดังนั้น จำนวนอิเล็กตรอน (n) เท่ากับจำนวนอะตอม

จาก
ดังนั้น

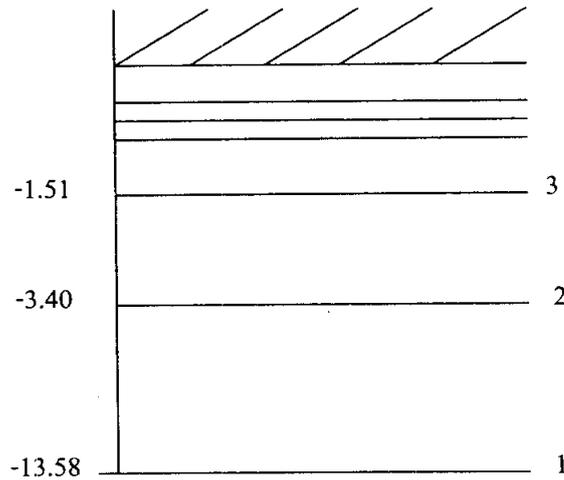
$$\begin{aligned}
 J &= neU \\
 U &= \frac{J}{ne} = \frac{I/A}{ne} \\
 &= \frac{4 \times 10^6}{8.43 \times 10^{28} \times 1.6 \times 10^{-19}} \\
 &= 2.96 \times 10^{-4} \text{ m/s} \\
 &= 2.96 \times 10^{-2} \text{ cm/s}
 \end{aligned}$$

จะเห็นได้ว่า อิเล็กตรอนความเร็วนี้ช้ามากในทองแดง แต่เหตุที่ทองแดงนำไฟฟ้าได้รวดเร็ว เพราะว่าการนำไฟฟ้าเกิดจากการถ่ายเทพลังงานของอิเล็กตรอนต่อเนื่องกัน จากขั้วไฟฟ้าขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่ง

5.2 โครงสร้างแถบพลังงาน

อิเล็กตรอนที่โคจรรอบนิวเคลียส ถ้าอยู่ต่างระดับกันจะมีพลังงานต่างกัน เราจึงอาจจะศึกษาอิเล็กตรอนได้โดยศึกษาจากพลังงานของอิเล็กตรอนแต่ละระดับวงโคจร เมื่อศึกษาในแง่ของพลังงาน จึงมีชื่อเรียกว่า ระดับพลังงาน (Energy level)

การวาดรูปโครงสร้างของอะตอม โดยมีนิวเคลียสอยู่ตรงกลาง อิเล็กตรอนโคจรเป็นวงกลมอยู่โดยรอบ เป็นการวาดที่ยู่ยากและเปลืองเนื้อที่ จึงคิดแปลงเป็นรูปง่าย ๆ โดยการวาดระดับโคจรชั้นที่ใกล้นิวเคลียสมากที่สุดเป็นเส้นตรง อยู่ตรงตำแหน่งต่ำที่สุด ระดับวงโคจรที่ห่างจากนิวเคลียสยิ่งขึ้นวาดรูปอยู่สูงขึ้นมาเรียงตามลำดับ จนถึงระดับที่อิเล็กตรอนหลุดออกมาเป็นอิเล็กตรอนอิสระ เรียก รูปนี้ว่า ไดอะแกรมระดับพลังงาน (Energy level diagram)

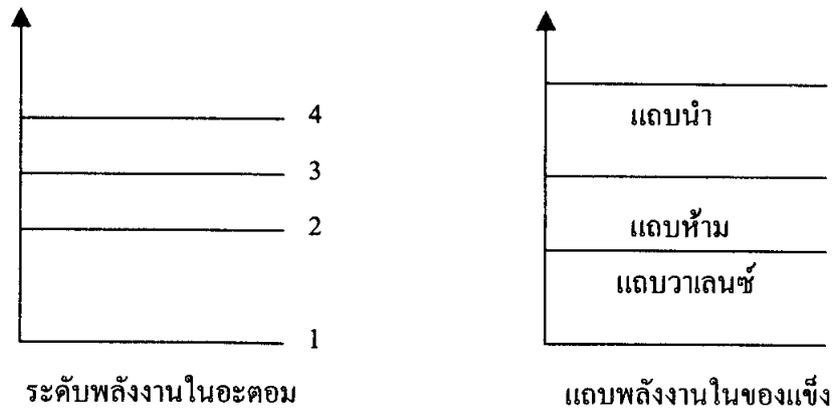


รูปที่ 5.1 ระดับพลังงานของอะตอมไฮโดรเจน

แถบพลังงาน

ลักษณะของอะตอมที่กล่าวข้างต้นนี้เป็นอะตอมที่อยู่โดดเดี่ยว อะตอมเดี่ยว แต่ถ้าหากว่า อะตอมอยู่รวมกันใกล้ชิดกันมาก เช่น อะตอมของของแข็ง แรงที่ทำให้อะตอมรวมตัวกัน จะทำให้ การประพุดิตัวของอิเล็กตรอนเปลี่ยนไปทำให้ระดับพลังงานของอะตอมแทนที่จะเป็นค่าเดียว กลับ แยกออกเป็นช่วงพลังงาน เรียกว่า แถบพลังงาน (Energy band) ในแต่ละแถบพลังงาน จะมี อิเล็กตรอนอยู่หลายตัว

พลังงานของอิเล็กตรอน



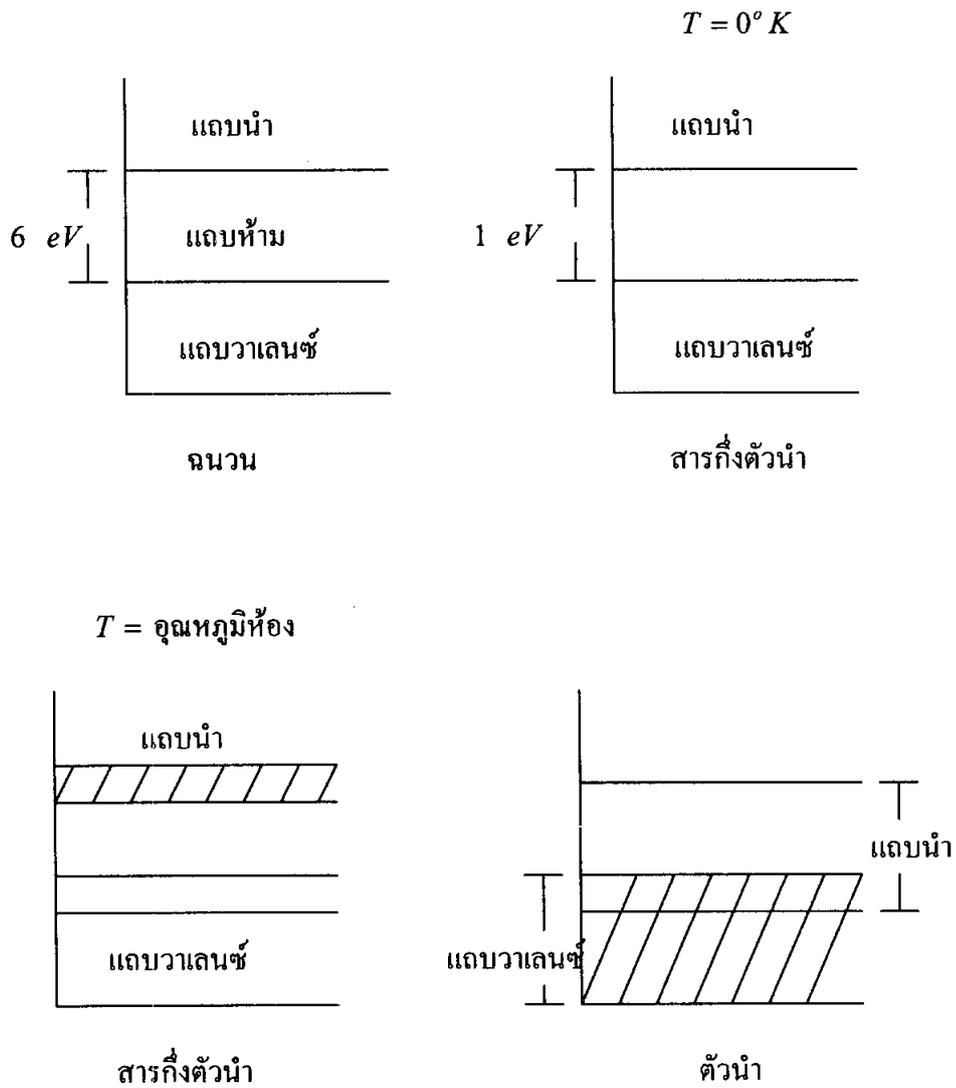
รูปที่ 5.2 เปรียบเทียบระดับพลังงานและแถบพลังงาน

แถบพลังงานที่อยู่เหนือสุด มีชื่อเรียกว่า แถบนำ (conduction energy band) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า (conduction band) อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำนี้สามารถเคลื่อนที่ได้จึงสามารถนำไฟฟ้าได้ สารใดที่มีอิเล็กตรอนในแถบนำมาก สารนั้นจะเป็นตัวนำที่ดี

ใต้แถบนำเป็นแถบพลังงานห้าม (forbidden energy band) หรือ แถบห้าม (forbidden band) หรือ ช่องห้าม (forbidden gap) บริเวณแถบห้ามนี้จะไม่มีอิเล็กตรอนหยุดอยู่เลย เป็นบริเวณที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านได้ แต่จะอาศัยอยู่ไม่ได้

ถัดจากแถบห้ามลงมาเป็นแถบพลังงานวาเลนซ์ (valence energy band) หรือ แถบวาเลนซ์ (valence band) เป็นบริเวณที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนซึ่งเป็นอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นนอกสุดของอะตอมอยู่มากมาย เมื่ออิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ได้รับพลังงานที่เหมาะสม จะเคลื่อนที่ข้ามแถบห้ามไปยังแถบนำได้ พลังงานที่พอเหมาะนี้จะต้องมากกว่าความกว้างของแถบห้าม ดังนั้น ความกว้างของแถบห้ามจึงเป็นตัวจำกัดจำนวนอิเล็กตรอนในแถบนำ ถ้าแถบห้ามมีความกว้างมาก อิเล็กตรอนจะข้ามแถบนำได้น้อย แต่ถ้าแถบห้ามแคบ อิเล็กตรอนในแถบนำจะมีจำนวนมาก เนื่องจากอิเล็กตรอน

ในแถบนำเป็นอิเล็กตรอนที่นำไฟฟ้าได้ การนำไฟฟ้าได้ดีหรือเลวจึงขึ้นอยู่กับปริมาณอิเล็กตรอนในแถบนำนั้นก็คือ ความกว้างของแถบห้ามของสารเป็นตัวบ่งชี้ว่าสารนั้นเป็นตัวนำ (conductor) ฉนวน (insulator) หรือ สารกึ่งตัวนำ (semiconductor)

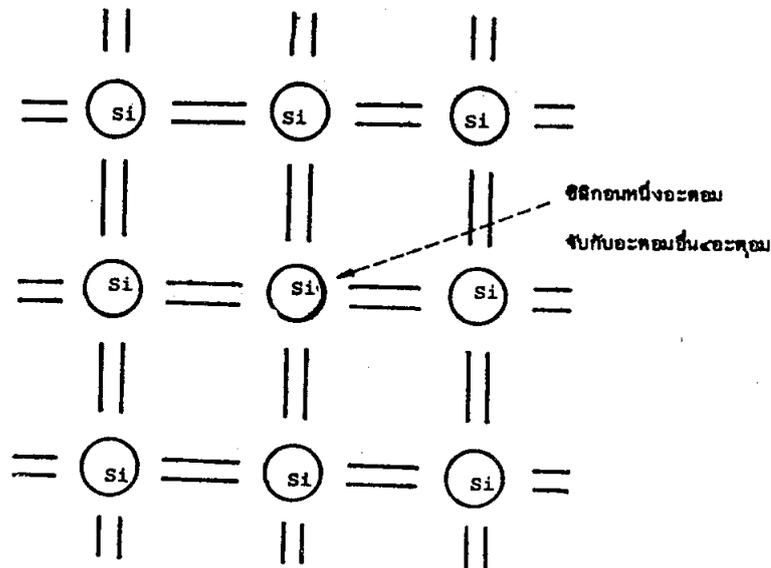


รูปที่ 5.3 แถบพลังงานของฉนวนสารกึ่งตัวนำและตัวนำ

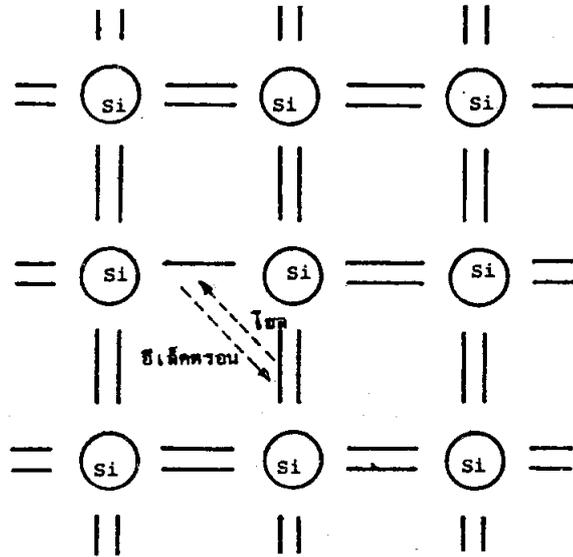
5.3 สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์

สารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้ผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ คือ ซิลิคอน และเยอรมันเนียม ธาตุทั้งสองอยู่ในแถวที่ 4 ของตารางธาตุ มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัว ในสภาวะปกติอยู่ในรูปผลึกเรียงตัวแบบเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) อะตอมตัวหนึ่งของสารกึ่งตัวนำจะจับกับอะตอมอื่นอีก 4 อะตอม การรวมตัวกันเป็นแบบโควาเลนต์ (covalent) คือ ใช้วาเลนซ์อิเล็กตรอนร่วมกัน จึงเหมือนกับว่า อะตอมหนึ่งของสารกึ่งตัวนำมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 8 ตัว วาเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัว เป็นของอะตอมสารกึ่งตัวนำอะตอมนั้น ส่วนวาเลนซ์อิเล็กตรอนอีก 4 ตัว ใช้ร่วมกับอะตอมอื่น ดังนั้น อิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำจึงยึดแน่นกับอะตอมมาก สารกึ่งตัวนำจึงเป็นตัวนำไฟฟ้าที่เลว อย่างไรก็ตาม เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อิเล็กตรอนได้รับพลังงานความร้อนหลุดจากอะตอมได้บ้าง ทำให้พบอิเล็กตรอนในแถบพลังงานนำ สารกึ่งตัวนำจึงนำไฟฟ้าได้ การนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจะขึ้นกับอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิสูง อิเล็กตรอนในแถบนำมากจะนำไฟฟ้าได้ดี ถ้าอุณหภูมิต่ำจะเป็นตัวนำที่เลว

เพื่อให้เข้าใจต่อการอธิบาย จะเขียนรูปแทนผลึกด้วยรูป 2 มิติ วงกลมแทนนิวเคลียสและอิเล็กตรอนในวงโคจรต่างๆ ยกเว้นวาเลนซ์อิเล็กตรอน เส้นตรงแต่ละขีดแทนวาเลนซ์อิเล็กตรอน 1 ตัว



เมื่ออิเล็กตรอนหลุดจากอะตอม ทำให้โควาเลนซ์บอนด์เกิดช่องว่างขึ้น อิเล็กตรอนจากที่อื่นสามารถเคลื่อนเข้ามาแทนที่ได้มีลักษณะคล้ายกับหลุมที่อิเล็กตรอนอาจจะตกลงไป จึงเรียกช่องว่างนี้ว่า โฮล (hole) ถ้าหากว่า อิเล็กตรอนของอะตอมข้างเคียงได้พลังงานเคลื่อนที่เข้ามาแทนที่โฮล อะตอมข้างเคียงขาดอิเล็กตรอน ก็คือ เกิดโฮลขึ้น มีลักษณะคล้ายกับว่า โฮลเคลื่อนที่จากอะตอมเดิมไปยังอะตอมข้างเคียง ถ้ายังมีอิเล็กตรอนจากอะตอมอื่นเคลื่อนเข้ามาแทนที่โฮลต่อเนื่องกันหลายอะตอม โฮลจะเคลื่อนที่ไปตามอะตอมเหล่านั้น เนื่องจากอะตอมที่เกิดโฮลมีสภาพเป็นบวกเพราะขาดอิเล็กตรอน โฮลจึงเป็นตัวพาประจุบวก (positive carrier) ในสารกึ่งตัวนำ มีตัวพาประจุ 2 ชนิด คือ อิเล็กตรอนพาประจุลบ และโฮลพาประจุบวก



5.4 การนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ

ในสารกึ่งตัวนำมีพาหะของประจุอยู่ 2 ชนิด คือ อิเล็กตรอนและโฮล ความหนาแน่นกระแสจะขึ้นกับปริมาณพาหะทั้งสองชนิด ดังนั้น

$$J = (n\mu_n + p\mu_p)eE = \sigma E$$

- เมื่อ n = จำนวนอิเล็กตรอน / m^2
 p = จำนวนโฮล / m^3
 μ_n = ความคล่องตัวของอิเล็กตรอน
 μ_p = ความคล่องตัวของโฮล

ดังนั้น

$$\sigma = (n\mu_n + p\mu_p)e$$

ในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (pure semi-conductor, intrinsic semiconductor) จำนวนโฮลเท่ากับจำนวนอิเล็กตรอน เพราะว่า โฮลเกิดจากการแตกตัวของอิเล็กตรอนจากอะตอม

$$n = p = n_i$$

เมื่อ n_i = ปริมาณพาหะ (โฮล หรือ อิเล็กตรอน) ในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์

คุณสมบัติของเยอรมันเนียมและซิลิคอนที่อุณหภูมิ 300 °K

	Ge	Si
แถบพลังงานห้าม (eV)	0.67	1.1
Electron mobility ($m^2/V-s$)	0.39	0.135
Hole mobility ($m^2/V-s$)	0.19	0.048
ความหนาแน่นของพาหะ (ตัว / m^3)	2.4×10^{19}	1.5×10^{16}
ความต้านทานจำเพาะ ($\Omega-m$)	0.46	2300
ความหนาแน่น (gm/m^3)	5.32×10^6	2.33×10^6

ตัวอย่างที่ 5.2 จงหาอัตราส่วนระหว่างจำนวนอะตอมของเยอรมันเนียมกับความหนาแน่นของพาหะ (อิเล็กตรอน หรือ โฮล) ในเยอรมันเนียมบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ $300^{\circ} K$ และความต้านทานจำเพาะ

วิธีทำ จากกฎของอะโวกาโดร หาจำนวนอะตอม / m^3 ได้ดังนี้

$$n_A = \frac{6.023 \times 10^{23} \text{ (อะตอม / กรัมอะตอม)} \times 5.32 \times 10^6 \text{ (กรัม / } m^3\text{)}}{72.6 \text{ กรัม / กรัมอะตอม}}$$

$$= 4.4 \times 10^{28} \text{ อะตอม / } m^3$$

จากตาราง ความหนาแน่นของพาหะในเยอรมันเนียมบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ $300^{\circ} K$ เท่ากับ 2.4×10^{19} ตัว / m^3 ดังนั้น

$$\frac{n_A}{n_i} = \frac{4.4 \times 10^{28}}{2.4 \times 10^{19}} = 2 \times 10^9$$

ในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ $n = p = n_i$ จะหาความนำจำเพาะบริสุทธิ์ (σ_i) ได้

$$\begin{aligned} \sigma_i &= (n\mu_n + p\mu_p)e \\ &= (\mu_n + \mu_p)n_i e \\ &= (0.39 + 0.19)(2.4 \times 10^{19})(1.6 \times 10^{-19}) \\ &= 2.2 \text{ mhos / m} \end{aligned}$$

$$\text{ความต้านทานจำเพาะ } (\rho_i) = \frac{1}{\sigma_i} = \frac{1}{2.2} = 0.45 \text{ } \Omega\text{-m}$$

5.5 ความหนาแน่นของพาหะในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์

จากสถิติเฟอร์มี-ดิแรค

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_F)/kT}}$$

และ จำนวนอิเล็กตรอนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

$$dN = \frac{m}{h^3} \sqrt{2mE} 8\pi dE$$

จำนวนอิเล็กตรอนทั้งหมด

$$\int_0^{E_F} dN = n$$

$$n = \int_0^{E_F} \frac{m}{h^3} \sqrt{2mE} 8\pi dE \frac{1}{1 + e^{(E-E_F)/kT}}$$

เมื่อ $E' =$ พลังงานที่ขอบบนของแถบนำ

เนื่องจาก $(E - E_F)/kT$ มากกว่า 1 มาก ดังนั้น เราอาจจะประมาณว่า

$$\frac{1}{1 + e^{(E-E_F)/kT}} \approx e^{-(E-E_F)/kT}$$

ดังนั้น

$$n = \int_0^{\infty} \frac{m}{h^3} \sqrt{(2mE)} 8\pi e^{-(E-E_F)/kT} dE$$

อินทิเกรตสมการ ตลอดแถบนำ จะได้

$$n = \int_{E_C}^{\infty} \frac{m}{h^3} \sqrt{(2mE)} 8\pi e^{-(E-E_F)/kT} dE$$

จำนวนโฮล p หาได้จาก

$$p = \int_0^{E_V} \frac{m}{h^3} \sqrt{(2mE)} 8\pi e^{-(E-E_F)/kT} dE$$

หลังจากอินทิเกรต จะได้

$$\begin{aligned} n_1 &= 2 \left(\frac{2\pi m_n kT}{h^2} \right)^{3/2} e^{-(E_C-E_F)/kT} \\ &= N_C e^{-(E_C-E_F)/kT} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_1 = n_1 &= 2 \left(\frac{2\pi m_p kT}{h^2} \right)^{3/2} e^{-(E_F-E_V)/kT} \\ &= n_V e^{-(E_F-E_V)/kT} \end{aligned}$$

เมื่อ N_C, N_V = ความหนาแน่นของสถานะในแถบนำและแถบวาเลนซ์

1 แทนสารบริสุทธิ์ (intrinsic)

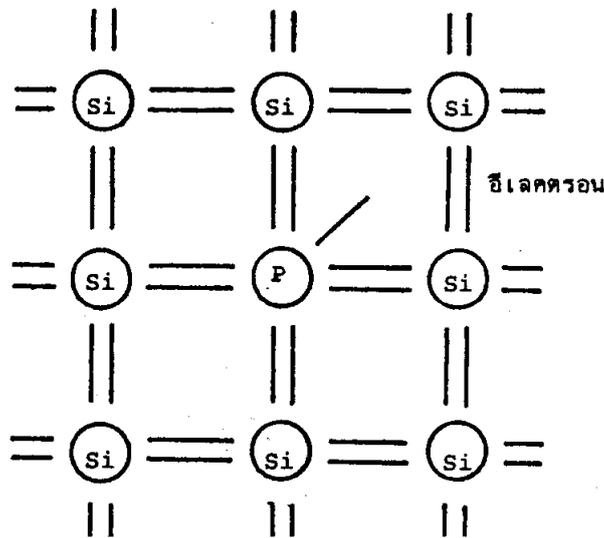
$$n_1^2 = n_1 p_1 = 4 \left(\frac{2\pi \sqrt{m_n m_p} kT}{h^2} \right)^3 e^{-(E_C-E_V)/kT}$$

5.6 สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์

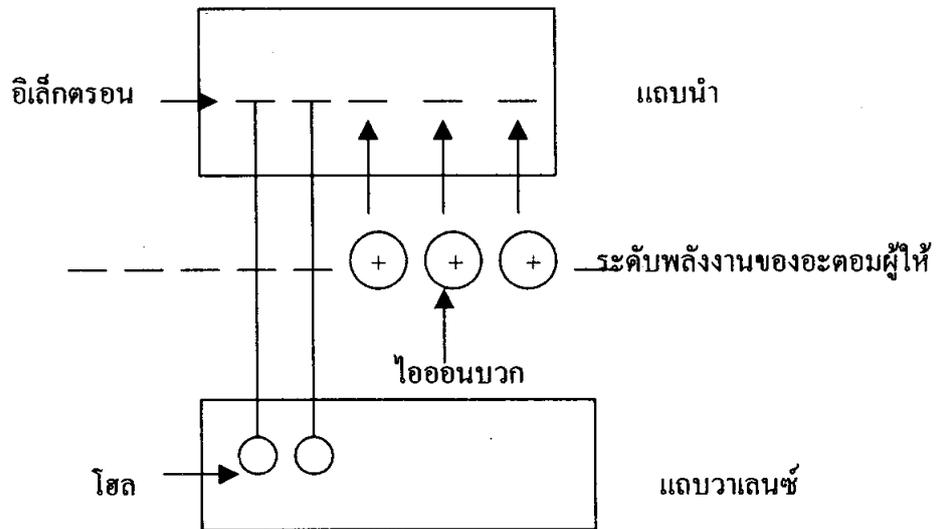
ปริมาณอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดจากพลังงานความร้อนและแสงสว่าง ยังคงมีจำนวนน้อยเกินไป ทำให้สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์นำไฟฟ้าได้ไม่ดีเท่าที่ควร ในทางปฏิบัติจะเติมอะตอมอื่นที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 หรือ 5 ลงในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ เพื่อให้ปริมาณอิเล็กตรอนหรือโฮลเพิ่มขึ้น อะตอมที่เติมลงไปมีชื่อเรียกว่า อะตอมสารเจือ (impurity atom) การเติมสารเจือ เรียกว่า การโด๊ป (doping) สารกึ่งตัวนำที่มีอะตอมสารเจือ เจือปนอยู่ เรียกว่า สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ (extrinsic semiconductor) หรือสารกึ่งตัวนำเจือ สารเจือ (doping semiconductor) สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ มีสองชนิด คือ สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ชนิดเอ็น (N-type semiconductor) ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีอิเล็กตรอนจำนวนมาก และสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ชนิดพี (P-type semiconductor) ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีโฮลอยู่มาก

5.6.1 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

เกิดจากการเติมอะตอมที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัว เช่น แอนติโมนี ฟอสฟอรัส หรือ อาเซนิก



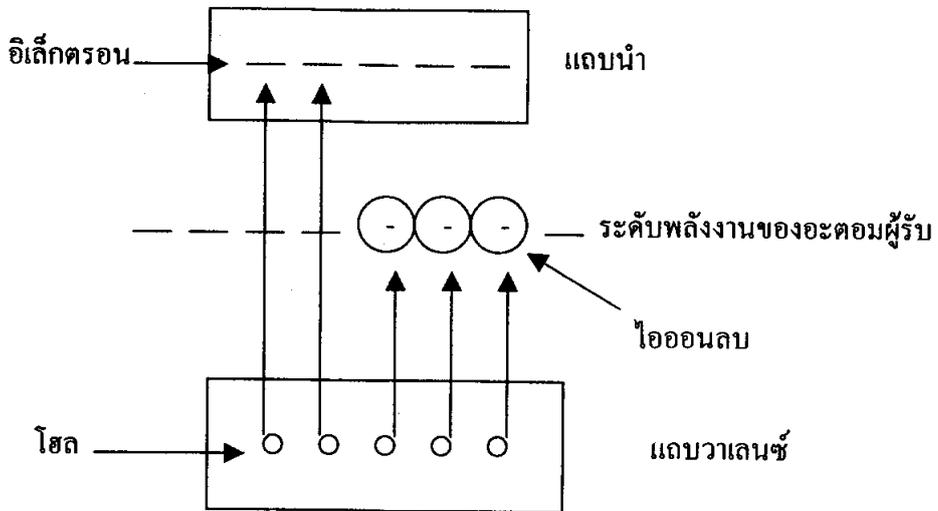
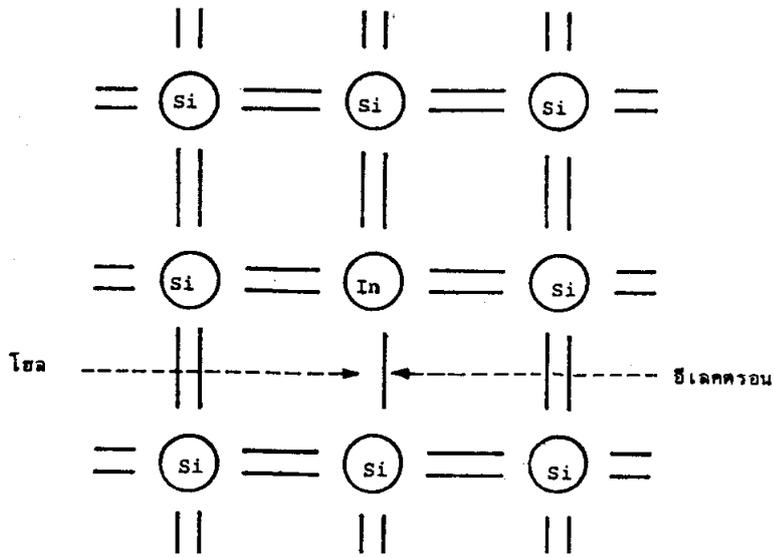
อะตอมสารเจือสามารถให้อิเล็กตรอนได้จึงมีชื่อเรียกว่า อะตอมผู้ให้ (donor atom) อะตอมสารเจือประมาณหนึ่งต่อล้าน เป็นชนิดเอ็น เพราะว่ามีอิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะของประจุลบ อยู่มาก อย่างไรก็ตามในแถบวาเลนซ์ก็มีโฮลอยู่บ้าง สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น มีอิเล็กตรอนในแถบนำ เป็นพาหะส่วนใหญ่ (majority carrier) มีโฮลในแถบวาเลนซ์เป็นพาหะส่วนน้อย



รูปที่ 5.4 แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

5.6.2 สารกึ่งตัวนำชนิดพี

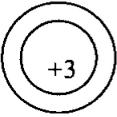
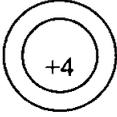
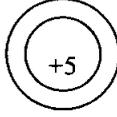
เติมอะตอมที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว เช่น โบรอน เซอร์มันเนียม หรืออินเดียม



พาหะเอก(majority carrier) คือ โฮล พาหะรอง (minority carrier) คือ อิเล็กตรอน

รูปที่ 5.5 แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพี

อะตอมที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว 4 ตัว และ 5 ตัว

					
5	B	6	C	7	N
Boron 10.82		Carbon		Nitrogen	
13	Al	14	Si	15	P
Aluminum		Silicon		Phosphorus	
31	Ga	32	Ge	33	As
Gallium		Germanium		Arsenic	
49	In	50	Sn	51	Sb
Indium		Tin		Antimony	

ภายในสารกึ่งตัวนำ มีพาหะสองชนิด คือ อิเล็กตรอนและโฮล เคลื่อนที่ไปมาระหว่างอะตอมของสารกึ่งตัวนำ เกิดการรวมตัวกันตลอดเวลา อัตราการรวมตัวของอิเล็กตรอนกับโฮลขึ้นอยู่กับปริมาณอิเล็กตรอนและโฮล ถ้าปริมาณอิเล็กตรอนและโฮลมาก อัตราการรวมตัวก็จะมาก ถ้าปริมาณอิเล็กตรอนและโฮลน้อย อัตราการรวมตัวก็จะน้อย เขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ว่า

$$R \approx np$$

เมื่อ R = อัตราการรวมตัว (จำนวนไอออนคู่/วินาที)

n = จำนวนอิเล็กตรอน

p = จำนวนโฮล

ดังนั้น
$$R = rnp$$

เมื่อ r = ค่าคงที่ขึ้นกับชนิดของสารกึ่งตัวนำ

ภายใต้ภาวะสมดุล อัตราการเกิด (g) อิเล็กตรอนและโฮลเท่ากับ อัตราการรวมตัวของอิเล็กตรอนกับโฮล (R)

$$g = R = rnp$$

ในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ จำนวนอิเล็กตรอนเท่ากับจำนวนโฮล หรือ $n_i = p_i$ ดังนั้น

$$g = R = rn_i p_i = rn_i^2$$

ในสารกึ่งตัวนำที่เติมสารเจือแล้วอะตอมส่วนใหญ่ก็ยังคงเป็นอะตอมสารกึ่งตัวนำ ดังนั้น อัตราการเกิดอิเล็กตรอนและโฮลจากความร้อนจึงเหมือนกับในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ ดังนั้น ในสารกึ่งตัวนำที่เติมสารเจือก็ยังคงใช้สมการของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ได้

นั่นคือ
$$np = n_i^2$$

สารกึ่งตัวนำหนึ่งชิ้น ไม่ว่าจะเติมสารเจือหรือไม่เติมสารเจือ มีสภาพทางไฟฟ้าเป็นกลาง เพราะจำนวนประจุบวกภายในนิวเคลียส เท่ากับจำนวนอิเล็กตรอน

สมมติว่า ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีอะตอมผู้ให้จำนวน N_d อะตอมต่อลูกบาศก์เมตร ถ้าคิดว่า อะตอมผู้ให้แตกตัวหมดทุกอะตอม จะทำให้เกิดไอออนบวกซึ่งเคลื่อนที่ไม่ได้ N_d ตัว

กำหนดให้ประจุบวกที่เคลื่อนที่ได้ คือ โฮล มีจำนวน p_n ตัว ดังนั้น จำนวนประจุบวกทั้งหมดเท่ากับ

$$N_d + p_n$$

ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นนี้ จำนวนประจุลบเท่ากับอิเล็กตรอน แต่ในสภาพเป็นกลางประจุลบเท่ากับประจุบวก ดังนั้น

$$n_n = N_d + p_n$$

ในทางปฏิบัติ ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจำนวนไอออนซึ่งเคลื่อนที่ไม่ได้มากกว่าประจุบวกที่เคลื่อนที่ได้ คือ โฮลมาก ดังนั้น

$$n_n = N_d$$

จำนวนโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น หากจากสมการ

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n} = \frac{n_i^2}{N_d}$$

ในทำนองเดียวกัน ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี

$$p_p = N_a \quad \text{และ} \quad n_p = \frac{n_i^2}{N_a} \quad (5.4)$$

ตัวอย่างที่ 5.3 เมื่ออะตอมแอนติโมนีลงไปนเจอร์มันเนียม ด้วยปริมาณ $1:10^6$ ถ้าพาหะในเจอร์มันเนียมบริสุทธิ์ เท่ากับ 2.4×10^{19} ตัว/ม³ จงหา

- ก. อัตราส่วนระหว่างจำนวนอิเล็กตรอนในเจอร์มันเนียมบริสุทธิ์กับเจอร์มันเนียมที่เติมแอนติโมนี
- ข. อัตราส่วนระหว่างจำนวนโฮลในเจอร์มันเนียมบริสุทธิ์กับเจอร์มันเนียมที่เติมแอนติโมนี
- ค. ความนำจำเพาะและความต้านทานจำเพาะหลังจากเติมแอนติโมนี

วิธีทำ ก) จากกฎของอะวอกาโดร จำนวนอะตอมเจอร์มันเนียม คือ

$$\begin{aligned} n_A &= \frac{6.023 \times 10^{23} \text{ (อะตอม / กรัมอะตอม)} \times 5.32 \times 10^6}{72.6 \text{ (กรัม / กรัมอะตอม)}} \\ &= 4.4 \times 10^{28} \text{ อะตอม / ม}^3 \end{aligned}$$

อะตอมแอนติโมนีที่เติมลงไป (N_d)

$$\begin{aligned} N_d &= 4.4 \times 10^{28} \times 10^{-6} \\ &= 4.4 \times 10^{22} \end{aligned}$$

อะตอมแอนติโมนีหนึ่งอะตอมแตกตัวให้อิเล็กตรอนหนึ่งตัว ดังนั้น

$$\text{จำนวนอิเล็กตรอน } (n_n) = 4.4 \times 10^{22} \text{ ด้วย}$$

ในเยอรมันเนียมบริสุทธิ์

$$\text{จำนวนอิเล็กตรอน} = 2.4 \times 10^{19} \text{ (กรัม / ม}^3\text{)}$$

ดังนั้น เมื่อเติมแอนติโมนีลงไปแล้ว จำนวนอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น เท่ากับ

$$= \frac{4.4 \times 10^{22}}{2.4 \times 10^{19}} = 2,000 \text{ ml}$$

$$\begin{aligned} \text{ข) จำนวนโฮล } (p_n) &= \frac{n_i^2}{n_n} = \frac{n_i^2}{N_d} \\ &= \frac{(2.4 \times 10^{19})}{4.4 \times 10^{22}} = 1.3 \times 10^{16} \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น จำนวนโฮลลดลง} = \frac{2.4 \times 10^{19}}{1.3 \times 10^{16}} \approx 2,000 \text{ เท่า}$$

ค) เมื่อเติมอะตอมสารเจือผู้ให้จะทำให้จำนวนอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น และจำนวนโฮลลดลง

$$\begin{aligned} \text{ความนำจำเพาะ } (\sigma) &= (n\mu_n + p\mu_p)e \\ &\approx N_d\mu_n e \end{aligned}$$

$$= 4.4 \times 10^{22} \times 0.39 \times 1.6 \times 10^{-19}$$

$$= 2740 \text{ โหม้/เมตร}$$

$$\text{ความต้านทานจำเพาะ } (\rho) = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{2740}$$

$$= 3.76 \times 10^{-4} \text{ } \Omega\text{-m}$$

	ความต้านทานจำเพาะ	
เยอรมันเนียมบริสุทธิ์	0.45	($\Omega\text{-m}$)
เยอรมันเนียมเจือแอนติโมนี	3.65×10^{-4}	
โลหะ	10^{-8}	

- ตัวอย่างที่ 5.4 ก) จงหาจำนวนอิเล็กตรอนอิสระและโฮลในเยอรมันเนียม ที่อุณหภูมิ $300^\circ K$ ซึ่ง
 เดิมสารเจือผู้ให้ 2×10^{14} อะตอม/ซม³ และสารเจือผู้รับ 3×10^{14} อะตอม/
 ซม³ เยอรมันเนียมเมื่อเดิมสารเจือเช่นนี้แล้วเป็นชนิดเอ็นหรือชนิดพี
- ข) ถ้าเดิมสารเจือผู้ให้เท่ากับสารเจือผู้รับเท่ากับ 10^{15} อะตอม/ซม³ เยอรมันเนียม
 เป็นชนิดพี หรือเอ็น

วิธีทำ จากสมการ

$$np = n_i^2$$

$$n_i \text{ ของ Ge} = 2.4 \times 10^{13} \text{ ตัว/ซม}^3$$

ดังนั้น $np = (2.4 \times 10^{13})^2 = 5.76 \times 10^{26}$

จำนวนประจุบวกเท่ากับผลบวกของอะตอมผู้ให้กับโฮล

ดังนั้น จำนวนประจุบวก $= N_D + p$

จำนวนประจุลบเท่ากับผลบวกของอะตอมผู้รับกับอิเล็กตรอน

ดังนั้น จำนวนประจุลบ $= N_A + n$

เซอรัมเนียมทั้งชิ้นมีสภาพเป็นกลางจำนวนประจุบวกเท่ากับจำนวนประจุลบ

$$\begin{aligned} N_D + p &= N_A + n \\ p - n &= N_A - N_D \\ &= (3 \times 10^{14}) - (2 \times 10^{14}) = 10^{14} \\ p &= n + 10^{14} \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} n(n + 10^{14}) &= 5.76 \times 10^{26} \\ n &= 5.45 \times 10^{12} \text{ ตัว/ซม}^3 \\ \text{จำนวนอิเล็กตรอน} &= 5.45 \times 10^{12} \\ p &= 5.45 \times 10^{12} + 10^{14} \\ &= 1.05 \times 10^{14} \text{ ตัว/ซม}^3 \\ \text{จำนวนโฮล} &= 1.05 \times 10^{14} \end{aligned}$$

หลังจากเติมอะตอมสารเจือแล้ว จำนวนโฮลมากกว่าอิเล็กตรอน ดังนั้นจึงเป็นเซอรัมเนียมชนิดพี

ข) เมื่อ

$$N_A = N_D$$

$$p - n = 0$$

หรือ

$$p = n = n_i$$

$$= 2.5 \times 10^{13} \text{ ซม}^{-3}$$

ดังนั้น จึงเป็นเซอรัมน์เนียมบริสุทธิ์

ตัวอย่างที่ 5.5 จงหาจำนวนโฮลและอิเล็กตรอนในเซอรัมน์เนียมชนิดพีซึ่งมีความนำจำเพาะ 100 โหมห์/ซม. กำหนดให้ ความคล่องตัวของโฮลในเซอรัมน์เนียม เท่ากับ 1800 ซม²/โวลต์-วินาที จำนวนพาหะในเซอรัมน์เนียมบริสุทธิ์เท่ากับ 2.4×10^{13} ซม⁻³

วิธีทำ จากสมการ $\sigma = (n\mu_n + p\mu_p)e$ ในเซอรัมน์เนียมชนิดพี จำนวนโฮลมากกว่าจำนวนอิเล็กตรอนมาก

$$p_p \gg n_p$$

ดังนั้น

$$\sigma = p\mu_p e$$

$$p = \frac{\sigma}{\mu_p e}$$

$$= \frac{100}{1800 \times 1.6 \times 10^{-19}} \text{ ซม}^{-3}$$

$$= 3.47 \times 10^{17} \text{ ซม}^{-3}$$

ดังนั้น จำนวนโฮลเท่ากับ 3.47×10^{17} ตัว/ซม³

จากสมการ

$$\begin{aligned}
 n_p &= \frac{n_i^2}{p_p} \\
 &= \frac{(2.4 \times 10^{13})^2}{3.47 \times 10^{17}} \\
 &= 1.8 \times 10^9 \quad \text{ชม}^{-3}
 \end{aligned}$$

จำนวนอิเล็กตรอน เท่ากับ 1.8×10^9 ตัว/ชม³

ตัวอย่างที่ 5.6 เติมอะตอมสารเจือลงในเยอรมันเนียมอะตอมผู้ให้ 10^{14} อะตอมต่อ ชม³ อะตอมผู้รับ 7×10^{13} อะตอมต่อ ชม³ ถ้าให้สนามไฟฟ้า 2 V/ชม จงหาความหนาแน่นของกระแสกำหนดให้ เยอรมันเนียมบริสุทธิ์ มีความต้านทานจำเพาะ $60 \text{ } \Omega/\text{ชม}$ ความคล่องตัวของโฮลเท่ากับ $1800 \text{ ชม}^2/\text{โวลต์-วินาที}$ ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนเท่ากับ $3800 \text{ ชม}^2/\text{โวลต์-วินาที}$

วิธีทำ จากสมการ

$$\sigma = (n\mu_n + p\mu_p)e$$

ในเยอรมันเนียมบริสุทธิ์

$$n = p = n_i$$

$$\sigma_i = (\mu_n + \mu_p)n_i e$$

$$n_i = \frac{\sigma_i}{e(\mu_n + \mu_p)} = \frac{1}{\rho_i e(\mu_n + \mu_p)}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{60 \times 1.6 \times 10^{-19} \times (3800 + 1800)} \\
 &= 1.86 \times 10^{13} \quad \text{ตัว/ชม}^3
 \end{aligned}$$

จากสมการ

$$pn = n_i^2 = (1.86 \times 10^{13})^2$$

และ

$$\begin{aligned}
 p - n &= N_A - N_D \\
 &= 7 \times 10^{13} - 10^{14} \\
 &\approx -3 \times 10^{13}
 \end{aligned}$$

แก้สมการหาค่า p และ n

$$\begin{aligned}
 p &= 0.889 \times 10^{13} \\
 n &= 3.889 \times 10^{13}
 \end{aligned}$$

จาก

$$\begin{aligned}
 J &= (n\mu_n + p\mu_p)eE \\
 &= (3.88 \times 3800 + 0.88 \times 1800) \times 10^{13} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 2 \\
 &= 53.2 \text{ mA/cm}^2
 \end{aligned}$$

ดังนั้น ความหนาแน่นของกระแสเท่ากับ 53.2 mA/cm^2

5.7 การแพร่

กฎของฟิค (Fick's law) เกี่ยวกับการแพร่ของอนุภาคที่มีความหนาแน่นกระจายไม่สม่ำเสมอ ความหนาแน่นกระแสของอนุภาค (คือ จำนวนของอนุภาคไหลผ่านต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา) คือ

$$J = -D \frac{\partial n}{\partial x}$$

D = สัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient)

ในสารกึ่งตัวนำ พาหะนำประจุ คือ อิเล็กตรอนและโฮล

$$J_e = eD_e \frac{\partial n}{\partial x}$$

และ

$$J_n = -eD_n \frac{\partial p}{\partial x}$$

5.8 สมการการแพร่สำหรับพาหะนำประจุชนิดเดียว

สมมติว่าในสารกึ่งตัวนำมีพาหะนำประจุชนิดเดียว เราให้เป็นโฮล อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าและกระแสทั้งหมดของการแพร่เป็น

$$J = \underbrace{-eD \frac{\partial p}{\partial x}}_{\text{กระแสจากการแพร่}} + \underbrace{pe\mu E}_{\text{กระแสจากการเคลื่อนที่}}$$

เราต้องการทราบว่า ปริมาณความเข้มข้นประจุ $p(x,t)$ จะแปรตามเวลาอย่างไรที่ตำแหน่งใด ๆ โดยอาศัยจากสมการความต่อเนื่อง (continuity equation)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{J} = 0$$

โดยที่ $\rho =$ ความหนาแน่นประจุ (e, p)

ดังนั้น การไหลของโพลจึงเป็นไปตาม

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_n &= -\frac{1}{e} \frac{\partial J}{\partial x} \\ &= D \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \mu \frac{\partial}{\partial x}(pE) \end{aligned}$$

และ p ยังแปรตามเวลาเนื่องจากการรวมตัวกันใหม่ ด้วยสมการ

$$\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_{\text{รวมตัว}} = -\frac{(p-p_0)}{\tau}$$

เมื่อ p_0 = ความเข้มข้นประจุที่สภาวะสมดุล
 τ = เวลาที่ใช้ในการรวมตัวกันใหม่ของโพล

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_{\text{ทั้งหมด}} &= \left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_n + \left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_{\text{รวมตัว}} \\ \frac{\partial p}{\partial t} &= D \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \mu \frac{\partial}{\partial x}(pE) - \frac{p-p_0}{\tau} \end{aligned}$$

เป็นสมการการแพร่ทั่วไปซึ่งครอบคลุมทั้งระยะทางและเวลา สมการ นี้ เราไม่สามารถหาค่า p ได้
 ในรูปต่างๆ ไป แต่เราสามารถหาคำตอบได้สำหรับกรณีต่อไปนี้ คือ

1. สำหรับ $E=0$ และ $\frac{\partial p}{\partial t} = 0$

$$D \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{(p-p_0)}{\tau} = 0$$

สมการ คือ

$$p_1 = p - p_0 = Ae^{-x/(D\tau)^{1/2}}$$

A เป็นค่าคงที่

$$\text{ความยาวการแพร่ } (L_D) = (D\tau)^{1/2}$$

เมื่อพาหะถูกฉีดเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ ด้วยอัตราเร่งคงที่ มันจะแพร่เข้าไปในสารกึ่งตัวนำนั้น แต่เนื่องจากมันต้องใช้เวลาในการรวมตัวกันใหม่เพียง τ ดังนั้น การแพร่ของพาหะนำประจุจะเข้าไปได้เพียงระยะทาง L_D

ความเร็วการแพร่ยังผล (V_D)

$$V_D = \frac{L_D}{\tau} = \left(\frac{D}{\tau}\right)^{1/2}$$

ดังนั้น กระแสการแพร่เป็น

$$J_D = ep_1 V_D = ep_1 \left(\frac{D}{\tau}\right)^{1/2}$$

2. $E \neq 0$, $\frac{\partial p}{\partial t} = 0$

ให้ $p_1 = p - p_0$ แทนลงในสมการ

$$\frac{\partial^2 p_1}{\partial x^2} - \frac{\mu E}{D} \frac{\partial p_1}{\partial x} - \frac{p_1}{L_D^2} = 0$$

ผลเฉลย

$$p_1 = Ae^{\gamma x/L_D}$$

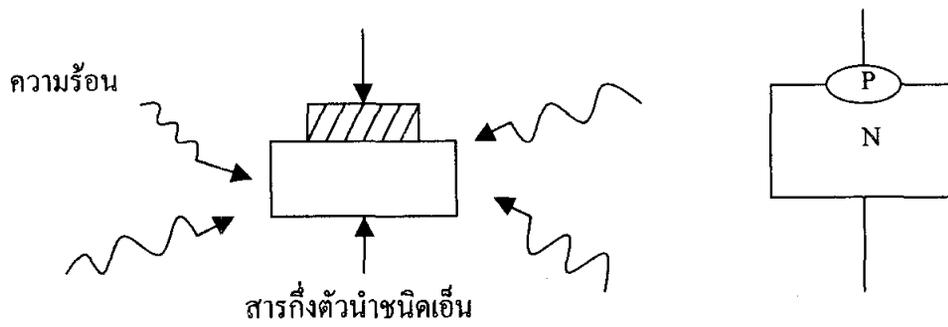
เมื่อ

$$\gamma = (1 + s^2)^{1/2} - S$$

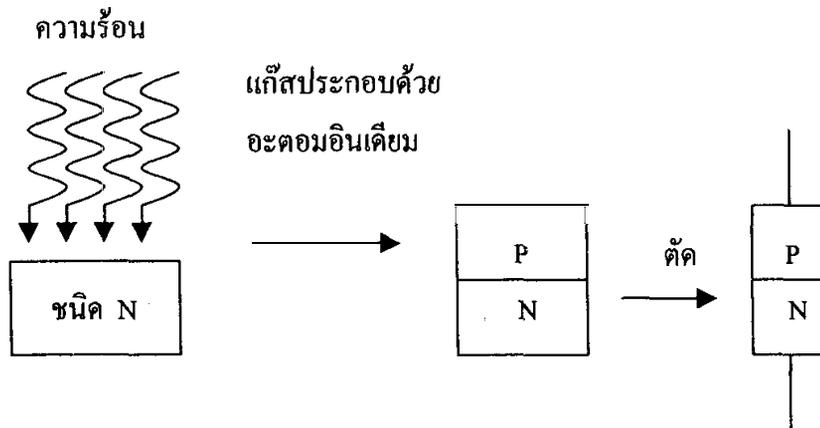
และ

$$S = \frac{\mu E L_D}{2D}$$

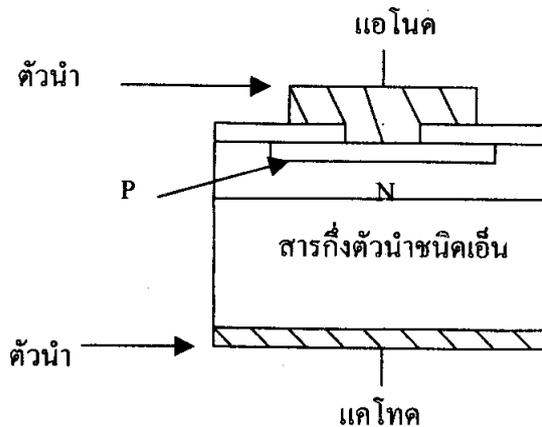
2. สารผสม(Alloy) วางสารเจือที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนสามตัวลงบนสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น แล้วทำให้ร้อน อิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำจะเคลื่อนที่ไปยังสารเจือทำให้บริเวณที่ติดกับสารเจือเปลี่ยนเป็นชนิดพี หรืออาจจะใช้สารกึ่งตัวนำชนิดพีในลักษณะเหมือนกันได้



3. การแพร่(Diffusion) อาศัยหลักการแพร่ของสารซึ่งมีความเข้มข้นไม่เท่ากัน ให้ความร้อนแก่สารเจือจนกลายเป็นแก๊ส วางสารกึ่งตัวนำไว้ในแก๊สนี้ อะตอมของสารเจือจะแพร่ลงไปนสารกึ่งตัวนำ

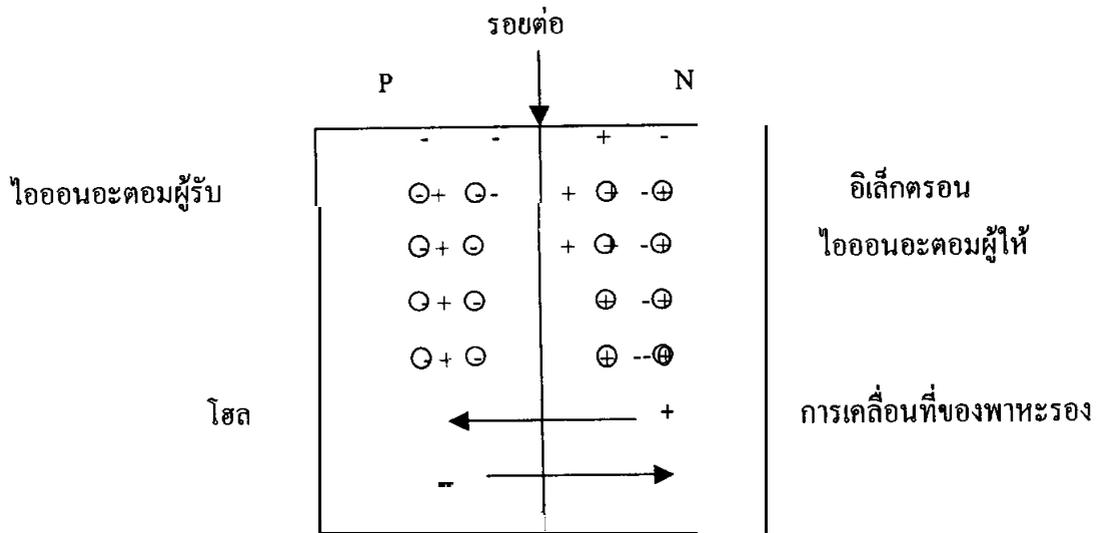


4. การสร้างบนผิว(Epitaxial growth) หลักการเหมือนกับการแพร่ เพียงแต่เป็นการแพร่สารเจือลงไปในพื้นที่ที่ต้องการเท่านั้น โดยการปิดกั้นส่วนที่ไม่ต้องการแพร่ด้วยวัสดุบางชนิด เป็นวิธีการที่ทำกันแพร่หลายในปัจจุบัน



5.10 รอยต่อพีเอ็น

เมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิดพีและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมาวางต่อกัน อิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อไปยังสารกึ่งตัวนำชนิดพี ขณะเดียวกันโฮลจากชนิดพีก็เคลื่อนข้ามรอยต่อไปยังชนิดเอ็น เพราะว่า ความเข้มข้นของพาหะในสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดไม่เท่ากัน จึงเกิดการแพร่ขึ้น อิเล็กตรอนจะรวมกับโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ทำให้อะตอมของสารกึ่งตัวนำชนิดพีกลายเป็นไอออนลบ เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนออกจากอะตอมชนิดเอ็น ทำให้อะตอมชนิดเอ็นขาดอิเล็กตรอนกลายเป็นไอออนบวก การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลจะดำเนินไปเรื่อยๆ บริเวณรอยต่อด้านพี จะมีอิเล็กตรอนมาสะสมมากขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนมากพอ จะผลักอิเล็กตรอนตัวอื่นไม่ให้เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อมาได้อีก เช่นเดียวกับโฮลก็จะหยุดการเคลื่อนที่ ดังนั้น ทั้งสองด้านของรอยต่อจึงมีไอออนบวกและไอออนลบมาสะสมอยู่ คล้ายกับแบตเตอรี่ชุดหนึ่งคอยขัดขวางไม่ให้เกิดการเคลื่อน



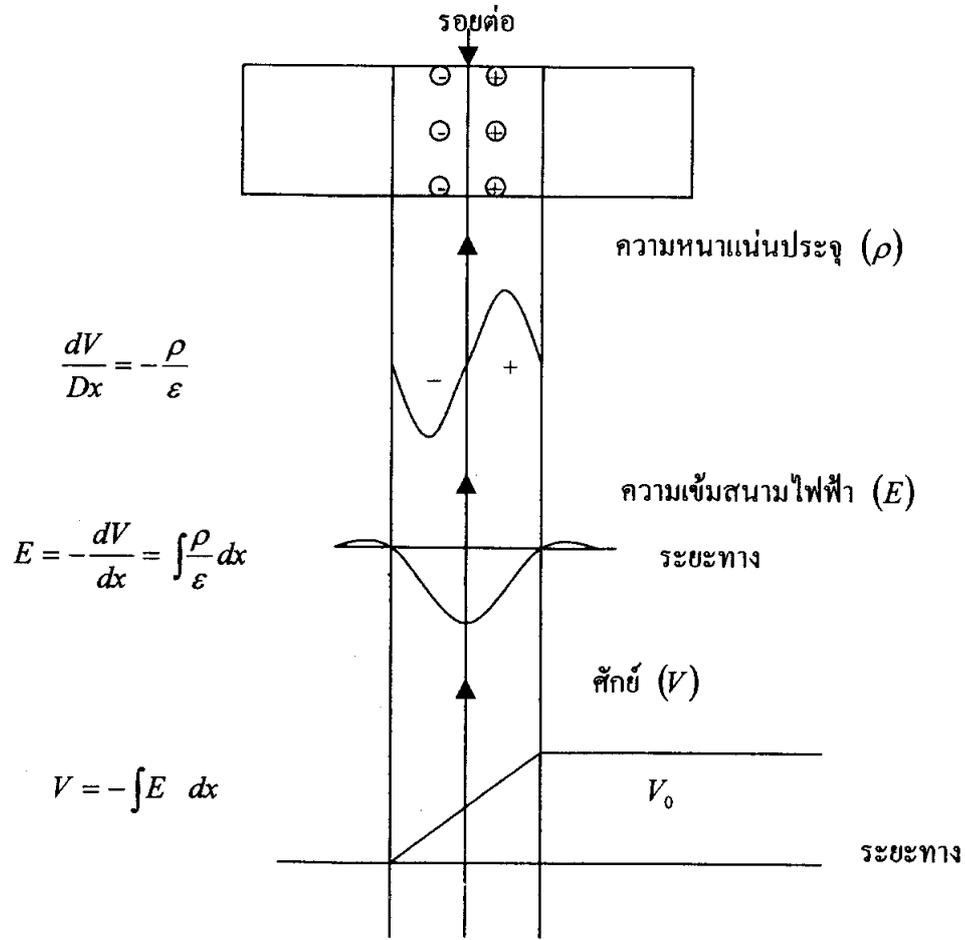
ที่ของอิเล็กตรอนและโฮล บริเวณรอยต่อซึ่งมีไอออนบวกและไอออนลบนี้มีชื่อเรียกว่า บริเวณดีพลีชัน(Depletion region) เพราะว่าเป็นบริเวณที่ไม่มีพาหะ (อิเล็กตรอนและโฮลซึ่งเคลื่อนที่ได้) เมื่อมีความหนาแน่นของประจุต่างชนิดกันอยู่ห่างกันเป็นระยะทางหนึ่ง จะเกิดสนามไฟฟ้าระหว่างประจุทั้งสอง

$$E = \frac{1}{\epsilon} \int \rho \, dx$$

เมื่อ E = สนามไฟฟ้า
 ρ = ความหนาแน่นของประจุ

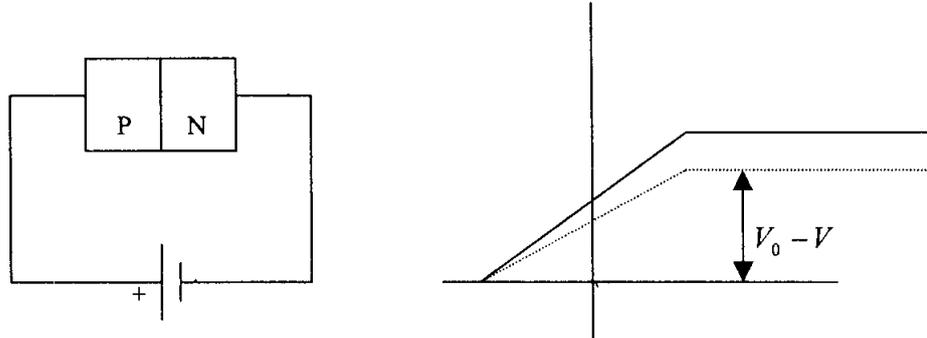
เมื่อมีสนามไฟฟ้า ก็คือ มีศักย์เกิดขึ้นศักย์ที่เกิดขึ้นตรงรอยต่อนี้มีชื่อเรียกว่า ศักย์ขวาง (Potential barrier) เพราะว่าเป็นศักย์ที่ขัดขวางการไหลของกระแส กำหนดให้ความต่างศักย์ตรงนี้ เท่ากับ V_0

ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี มีอิเล็กตรอนเป็นพาหะรอง เมื่อมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นตรงรอยต่อ สนามไฟฟ้าจะทำให้อิเล็กตรอนในสารพีเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ และโฮลในสารเอ็นเคลื่อนมาขังสารพี จึงอาจกล่าวได้ว่าสนามไฟฟ้าทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของพาหะรอง



5.11 การไบแอสตรง (Forward bias)

เมื่อต่อแบตเตอรี่กับไดโอดโดยขั้วบวกต่อกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี แรงเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่ จะหักล้างกับศักย์ขวาง ทำให้ศักย์ขวางมีค่าลดลง พาหะสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ ถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่ มากกว่าศักย์ขวาง จะเกิดการไหลของกระแสผ่านไดโอด

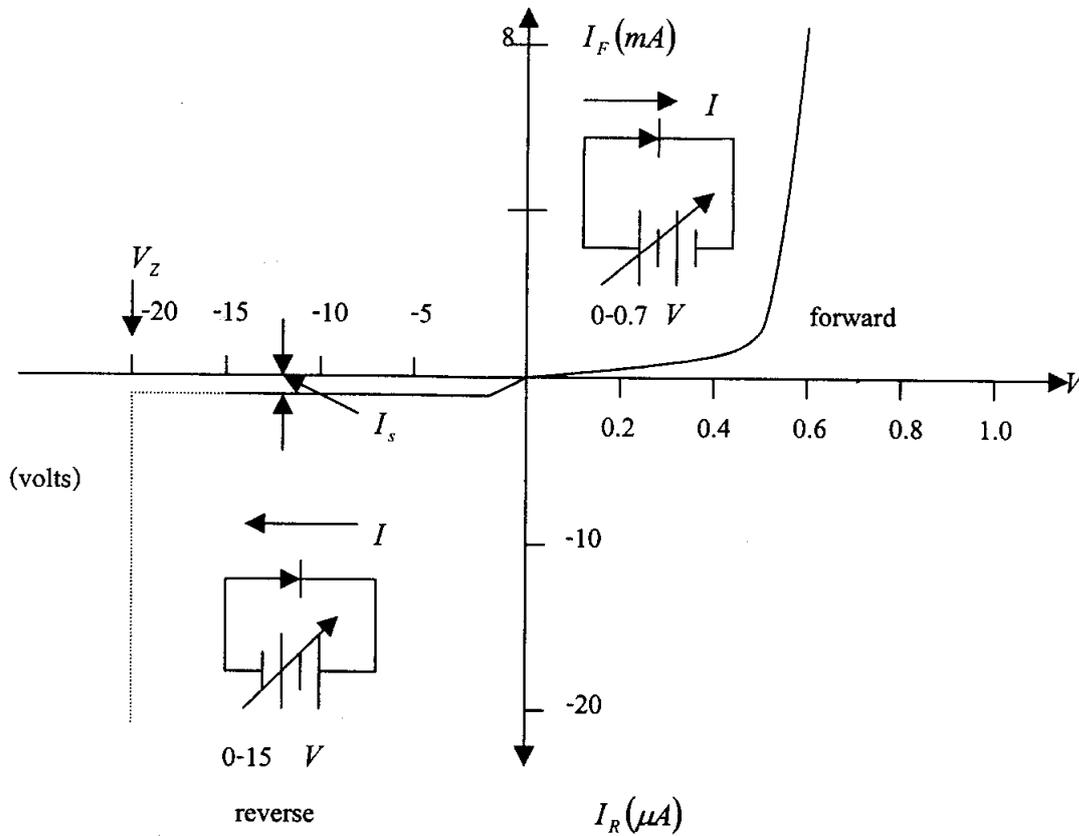


5.12 การไบแอสกลับ (Reverse bias)

เมื่อต่อแบตเตอรี่กับไดโอดโดยขั้วลบต่อกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี แรงเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะไปเสริมกำแพงศักย์ ทำให้กำแพงศักย์มีค่าเพิ่มขึ้น พาหะเอกจึงเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อไม่ได้ อย่างไรก็ตามในสารกึ่งตัวนำชนิดพี มีอิเล็กตรอนเป็นพาหะรองอิเล็กตรอนถูกผลักโดยขั้วลบของแบตเตอรี่ ทำให้เคลื่อนข้ามรอยต่อได้จึงเกิดการไหลของกระแสเนื่องจากพาหะรอง ปริมาณการไหลของกระแสขึ้นอยู่กับจำนวนพาหะรองซึ่งเกิดจากพลังงานความร้อน ถ้าอุณหภูมิสูงกระแสมาก อุณหภูมิต่ำกระแสน้อยกระแสเนื่องจากพาหะรองนี้มีชื่อเรียกว่า กระแสย้อนกลับอิ่มตัว (Reverse saturation current) กระแสย้อนกลับอิ่มตัวเพิ่มขึ้น 1 เท่า ตัวทุก ๆ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น $10^{\circ}C$

5.13 กราฟแสดงคุณสมบัติของไดโอดสารกึ่งตัวนำ

จากกราฟจะเห็นได้ว่า เมื่อไดโอดถูกฟอร์เวิร์สไบแอสจะมีแรงดันตกคร่อมไดโอด ประมาณ 0.7 โวลต์เท่านั้น จึงมีลักษณะเหมือนไดโอดอุดมคติมากกว่าไดโอดหลอดสูญญากาศ ในทางปฏิบัติ จะไม่ใช้รีเวิร์สไบแอสมาก เพราะจะทำให้ไดโอดเกิดการชำรุดเสียหายได้



สมการไดโอด

กระแสที่ไหลผ่านไดโอดสารกึ่งตัวนำเป็นไปตามสมการ

$$I_D = I_S (e^{qV_D/KT} - 1)$$

เมื่อ

I_D = กระแสที่ไหลผ่านไดโอด

I_S = กระแสย้อนกลับอิมิตัว

q = 1.6×10^{-19} คูลอมป์

= ประจุของอิเล็กตรอน

K = ค่าคงที่ของโบลท์แมน

= $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$

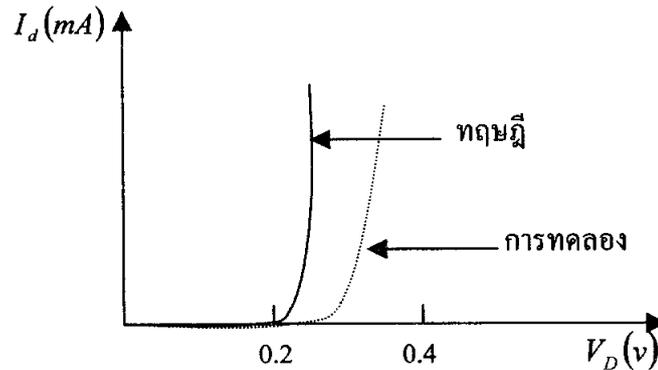
T = อุณหภูมิ ($^\circ\text{K}$)

V_D = แรงดันระหว่างขั้วของไดโอด

ในทางปฏิบัติกระแสที่ไหลผ่านไดโอดมีค่าคลาดเคลื่อนจากสมการไดโอดบ้างเล็กน้อย เนื่องจากความต้านทานของสารกึ่งตัวนำและความต้านทานตรงจุดสัมผัสของขั้วไฟฟ้า จึงต้องดัดแปลงสมการเล็กน้อย ดังนี้

$$I_D = I_S (e^{mgV_D/KT} - 1)$$

เมื่อ m = จำนวนบวกใดๆ



5.14 การพังของไดโอด

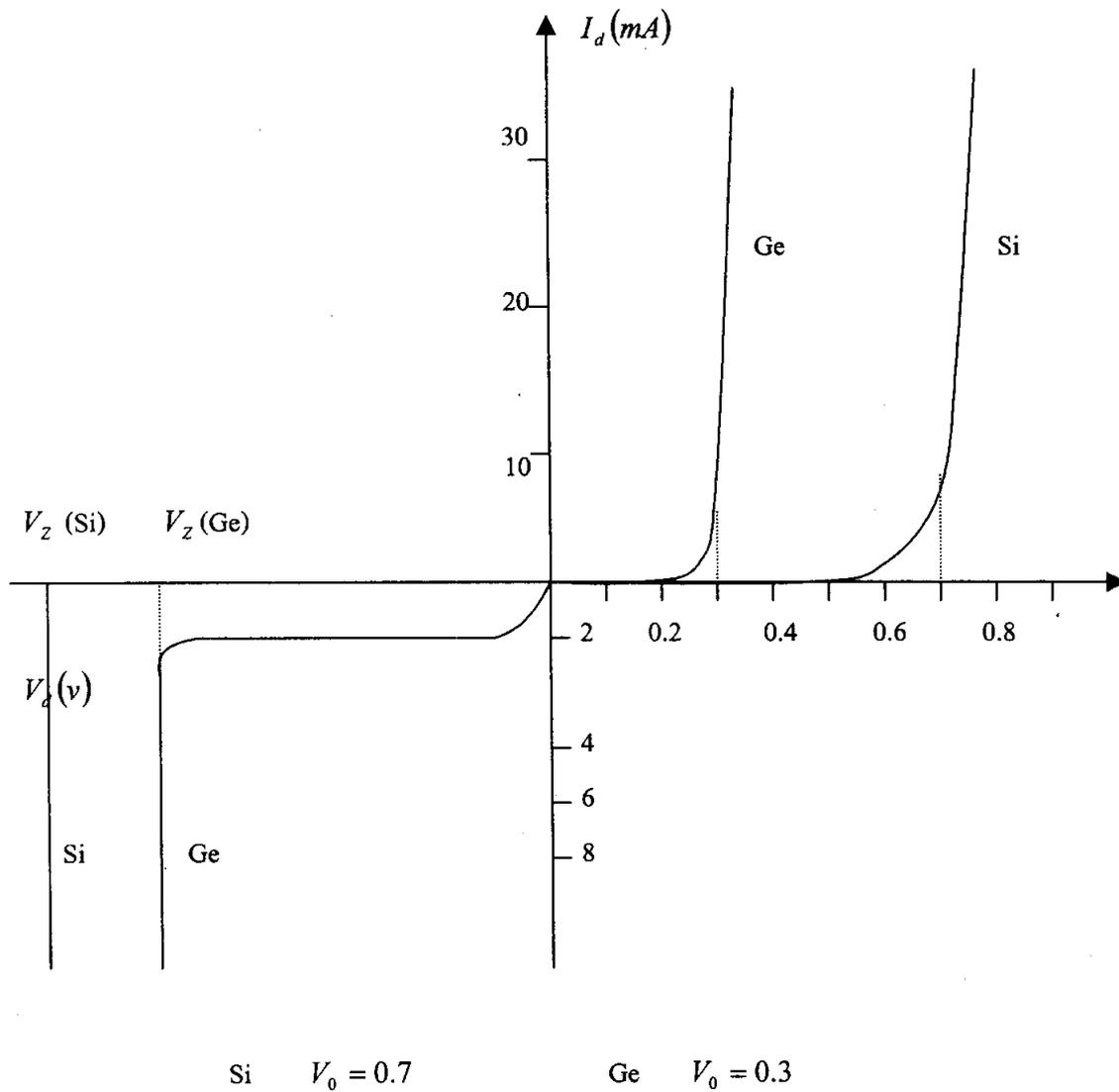
เมื่อไดโอดกริวิตไบแอสมากจนถึงจุดหนึ่ง พาหะรองได้รับพลังงานมากพอจะวิ่งชนอะตอมของสารกึ่งตัวนำ ถ่ายเทพลังงานให้แก่อิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม กระแสในไดโอดเพิ่มขึ้นอย่างมากมาย ปรากฏการณ์เช่นนี้มีชื่อเรียกว่า การพังอะวาแลนซ์ (Avalanche breakdown) แรงดันที่ทำให้เกิดการพังเรียกว่า แรงดันพัง (Breakdown voltage) ปรากฏการณ์พังอีกชนิดหนึ่งเกิดเมื่ออิเล็กตรอนรอบอะตอมเกิดการแตกตัวหลุดออกจากอะตอมเพราะได้รับแรงดันมากพอโดยตรงเรียก ปรากฏการณ์พังชนิดนี้ว่า การพังซีเนอร์ (Zener breakdown)

เมื่อเกิดปรากฏการณ์พังทั้งสองชนิดนี้ไดโอดจะเกิดการชำรุดเสียหายได้ ยกเว้น ในซีเนอร์ไดโอด ซึ่งได้รับการออกแบบเป็นพิเศษใช้งานในช่วงแรงดันพังเท่านั้น

5.15 เปรียบเทียบกราฟแสดงคุณสมบัติของไดโอดที่สร้างจากซิลิคอนและเยอรมันเนียม

จากกราฟแสดงคุณสมบัติทางด้านฟอร์เวิร์สไบแอสจะเห็นได้ว่า แรงดันระหว่างขั้วของซิลิคอนไดโอดจะต้องมากกว่า 0.7 โวลต์ จึงจะเกิดการไหลของกระแสผ่านไดโอดส่วนเยอรมันเนียมไดโอดเพียง 0.3 โวลต์ เท่านั้น เยอรมันเนียมไดโอดจึงมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับไดโอดอุดมคติมากกว่า

ทางด้านรีเวิร์สไบแอส แรงดันพังของซิลิคอนไดโอดมากกว่าแรงดันพังของเยอรมันเนียมไดโอด ซิลิคอนไดโอดจึงทนทานต่อแรงดันได้ดีกว่า นอกจากนี้ในเยอรมันเนียมไดโอด กระแสย้อนกลับอ้อมตัวมากทำให้กระแสที่ไหลในเยอรมันเนียมไดโอดขึ้นกับอุณหภูมิมากกว่าซิลิคอนไดโอด ดังนั้น ซิลิคอนไดโอดจึงนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย



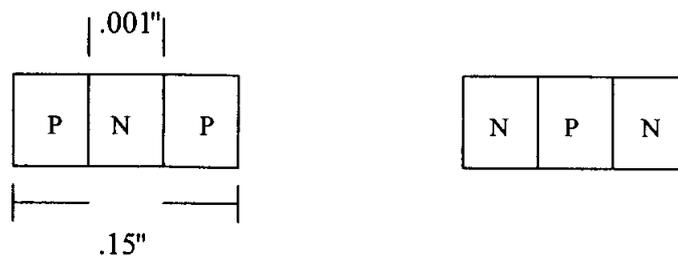
พิจารณาฟอร์เวิร์ตไบแอสโดยพิจารณาเพียงกระแสไหล ในกรณีฟอร์เวิร์ตไบแอส กำแพงศักย์จะมีค่าลดลง eV_0

5.16 ทรานซิสเตอร์ (Transistor)

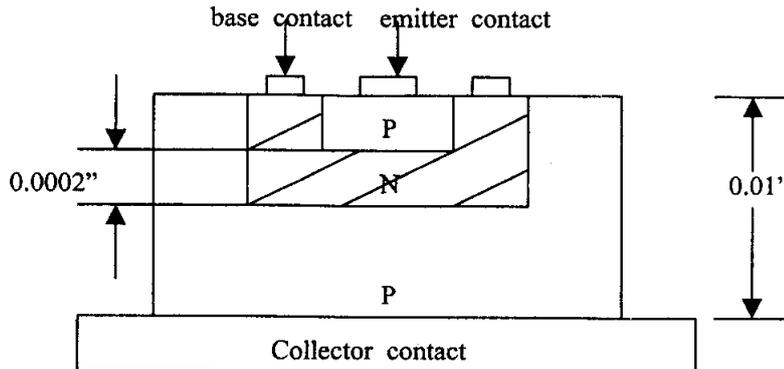
ปัจจุบันทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เป็นประโยชน์กันอย่างกว้างขวางในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ การค้นพบทรานซิสเตอร์ทำให้ความรู้และเทคโนโลยีของงานทางด้านต่าง ๆ ก้าวหน้าไปอย่างไม่รู้ที่สิ้นสุด วิศวกรแห่งบริษัทเบลล์ เทเลโฟน สร้างทรานซิสเตอร์เป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1948

โครงสร้างของทรานซิสเตอร์

ทรานซิสเตอร์ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ 3 ชั้น สารกึ่งตัวนำที่อยู่ตรงปลายเป็นชนิดเดียวกัน ชั้นที่อยู่ตรงกลางเป็นอีกชนิดหนึ่ง ทรานซิสเตอร์สร้างได้ 2 ชนิด คือ PNP และ NPN

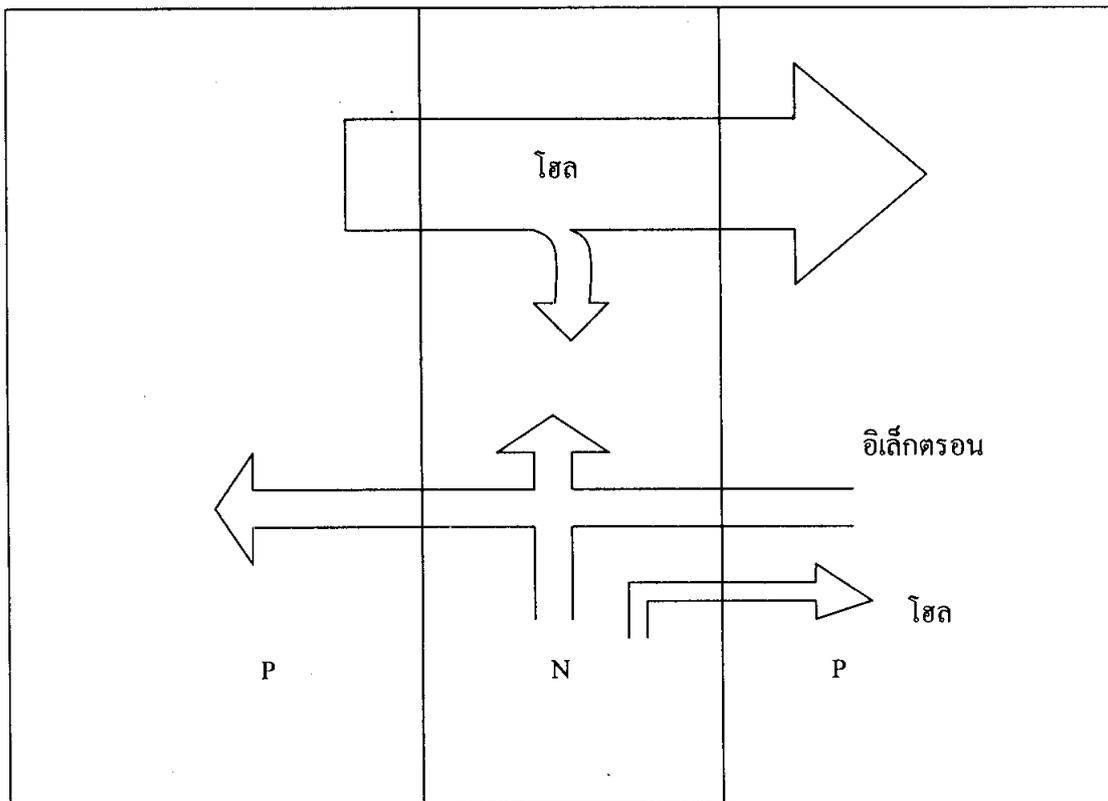
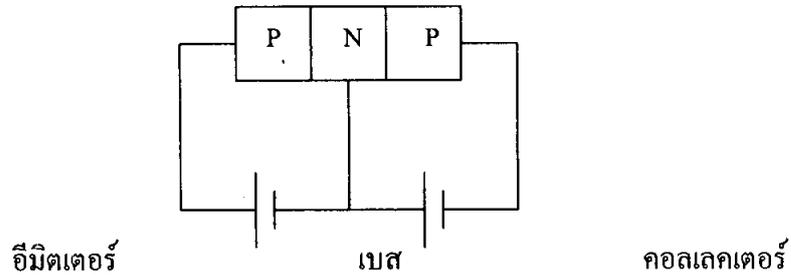


โดยทั่วไป เบสจะมีความกว้างและอะตอมสารเจือปนน้อยที่สุด อิมิตเตอร์กว้างปานกลาง มีอะตอมสารเจือปนมากที่สุด ส่วนคอลเลกเตอร์เป็นโครงสร้างส่วนใหญ่ทรานซิสเตอร์ ในปัจจุบันส่วนมาก เบสและอิมิตเตอร์จะสร้างอยู่บนชั้นสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นคอลเลกเตอร์



การทำงานของทรานซิสเตอร์

ถ้าคิดว่า ทรานซิสเตอร์เป็นไดโอด 2 ตัว ต่อกันโดยมีด้าที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกันในการทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของพาหะจะต้องให้ความต่างศักย์ 2 จุด จุดหนึ่งระหว่างอิมิตเตอร์กับเบส ต่อแบบฟอร์เวิร์ดไบแอส อีกจุดหนึ่งระหว่างเบสกับคอลเลคเตอร์ต่อแบบรีเวิร์ดไบแอส



พิจารณาทรานซิสเตอร์ชนิดพีเอ็นพี เมื่ออีมิเตอร์กับเบสถูกฟอร์เวิร์สไบแอส โวลซึ่งเป็นพาหะเอกในอีมิเตอร์จะเคลื่อนเข้าไปในเบส เนื่องจากเบสแคบและมีจำนวนพาหะเอก คือ อิเล็กตรอนน้อย ดังนั้น โวลส่วนมาก ประมาณ 98 % จะเคลื่อนที่ผ่านเบสไปยังคอลเลคเตอร์รวมตัวกับอิเล็กตรอนตรงขั้วลบของเบตเตอร์อีกชุดหนึ่งที่ คอลเลคเตอร์โวลส่วนน้อยประมาณ 2 % เท่านั้น ที่รวมกับอิเล็กตรอนในเบสเป็นกระแสเบส เนื่องจากกระแสเบสน้อย ดังนั้น กระแสคอลเลคเตอร์ประมาณเท่ากับกระแสอีมิเตอร์

$$I_E = I_C + I_B$$

นอกจากนี้ ยังมีการเคลื่อนที่ของพาหะรอง คือ อิเล็กตรอนในคอลเลคเตอร์และโวลในเบส โดยที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากคอลเลคเตอร์ข้ามรอยต่อไปยังเบส บางส่วนรวมตัวกับโวลเป็นกระแสเบส ส่วนที่เหลือรวมกับอิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะเอกในเบสเคลื่อนที่จากเบสข้ามรอยต่อไปยังอีมิเตอร์ ส่วนโวลในเบสจะเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อไปยังคอลเลคเตอร์ กระแสเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะเสริมกับกระแสเนื่องจากการเคลื่อนที่ของโวล เพราะว่า กระแสที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนมีทิศตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ดังนั้น กระแสคอลเลคเตอร์ จึงเท่ากับผลรวมของกระแสเนื่องจากพาหะเอก และกระแสเนื่องจากพาหะรอง

$$I_C = \underbrace{(I_C)}_{\text{พาหะเอก}} + \underbrace{(I_C)}_{\text{พาหะรอง}}$$

สรุป

1. สารกึ่งตัวนำที่ใช้กันโดยทั่วไป คือ ซิลิคอน และ เยอรมันเนียม เป็นธาตุที่อยู่ในแถวที่สี่ของตารางธาตุ
2. พาหะในสารกึ่งตัวนำ คือ อิเล็กตรอนและโฮล
3. ความนำจำเพาะของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ คือ

$$\sigma = (n\mu_n + p\mu_p)e$$

4. สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ แบ่งเป็นสองชนิด คือ ชนิดเอ็นและชนิดพี
5. กฎการแพร่ของฟิสิก

$$J = -D \frac{\partial n}{\partial x}$$

6. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ คือ ไดโอดและทรานซิสเตอร์