บทที่ 3
สภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

<u>วัตถุประสงค์</u>

1. เพื่อศึกษาถึงการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำทั้งชนิดอินทรินซิคและเอกซ์ทรินซิค โดยอาศัยกฎของโอห์มเป็นหลักในการหาค่าสภาพนำไฟฟ้า

2. ให้สามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นของพาหะนำประจุ คืออิเลคตรอนในแถบความนำและโฮลในแถบวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ ได้ เนื่องจากความหนาแน่นของพาหะนำประจุเป็นตัวแปรที่สำคัญมากตัวหนึ่ง ของสภาพนำไฟฟ้า

3. เพื่อให้ทราบถึงเรื่องราวของการโดปและการโดปซดเชย ซึ่งเป็นวิธีการที่สำคัญของการทำให้สารกึ่งตัวนำมีสภาพนำไฟฟ้าและชนิดของพาหะนำประจุเป็นไปตามต้องการ

4. ให้สามารถคำนวณหาระดับเฟอร์มิ ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่สำคัญมากในสารกึ่งตัวนำ

5. เพื่อศึกษาถึงผลของอุณหภูมิต่อสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำและความคล่องตัวของพาหะนำประจุ รวมทั้งวิธีการหาความกว้างของช่องว่างแถบพลังงาน

6. เพื่อให้เข้าใจถึงขบวนการแทรปและการรวมตัวกันใหม่ของอิเลคตรอนกับโฮลซึ่งมีผลต่อความหนาแน่นของพาหะนำประจุ และช่วงชีวิต

7. เพื่อศึกษาถึงกระบวนการแพร่ของพาหะนำประจุในสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นทฤษฎีพื้นฐานของการอธิบาย หรือคำนวณค่ากระแสต่างๆ ในสารกึ่งตัวนำที่มีความหนาแน่นของพาหะนำประจุไม่สม่ำเสมอ (ได้แก่พวกจังค์ชันต่างๆ เช่น พี-เอ็น จังค์ชัน)

<u>บทนำ</u>

จากกฎของโอห์ม เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสได้ว่า

$$\vec{J} = \sigma\vec{\varepsilon}$$

เมื่อ σ เป็นสภาพนำไฟฟ้าของของแข็งนั้นๆ และสำหรับโลหะซึ่งอิเลคตรอนในแถบความนำถือได้ว่าเป็นอิเลคตรอนอิสระนั้น

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$$

เมื่อ τ เป็นช่วงชีวิตของอิเลคตรอน (life time - mean collision time) n เป็นความหนาแน่นและ m เป็นมวลของอิเลคตรอน ในกรณีของสารกึ่งตัวนำสมการเหล่านี้ยังคงใช้ได้เพราะอิเลคตรอนในแถบความนำอยู่บริเวณตอนล่าง และโฮลในแถบวาเลนซ์อยู่บริเวณตอนบนของแถบพลังงาน ซึ่งพฤติกรรมของมันเป็นเช่นเดียวกับอิเลคตรอนในโลหะ โดยใช้มวลเป็นมวลยังผล (ดูบทที่ 2) และเนื่องจากมีพาหะนำประจุ 2 ชนิด คืออิเลคตรอนและโฮลดังนั้น

$$\sigma_{\text{สารกึ่งตัวนำ}} = \sigma_{\text{อิเลคตรอน}} + \sigma_{\text{โฮล}}$$

$$= \frac{ne^2\tau_e}{m_e^*} + \frac{pe^2\tau_h}{m_h^*}$$

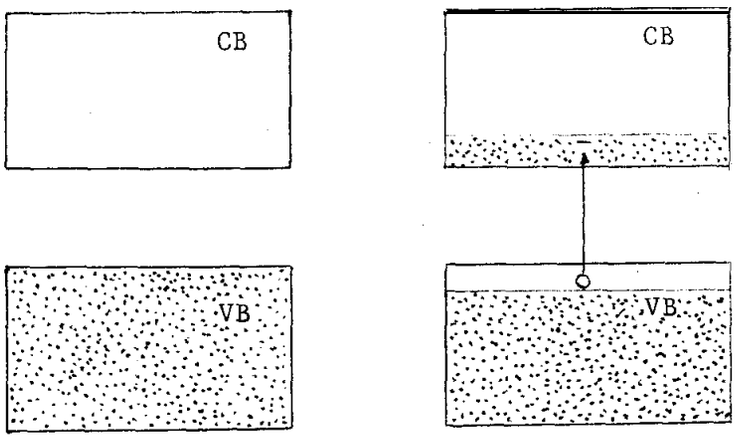
เมื่อ n และ p เป็นความหนาแน่นของอิเลคตรอนในแถบความนำและโฮลในแถบวาเลนซ์ ตามลำดับ

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าสิ่งสำคัญยิ่งสิ่งหนึ่งในการคำนวณหาค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ก็คือ ค่า n และ p

3.1 การนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำอินทรินซิค

3.1.1 สารกึ่งตัวนำอินทรินซิค

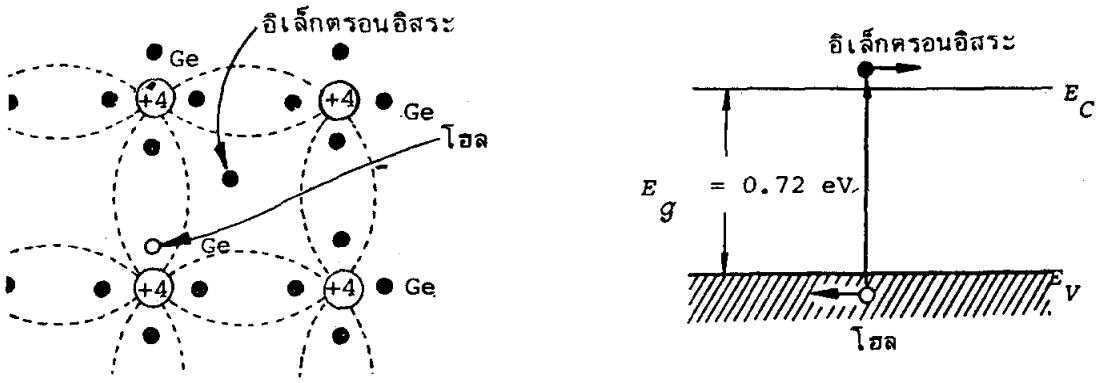
สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์หรือสารกึ่งตัวนำอินทรินซิค (Intrinsic semiconductors) คือสารกึ่งตัวนำที่ไม่มีอะตอมอื่นๆ มาเจือปน รูป 3.1 แสดงแถบพลังงานของสารดังกล่าวที่อุณหภูมิ 0 ^{o}K และที่อุณหภูมิ T > 0 ^{o}K ใดๆ



รูป 3.1 แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่ 0 ^{o}K และที่ T > 0 ^{o}K

ที่อุณหภูมิ 0°K สารกึ่งตัวนำจะไม่นำไฟฟ้า เนื่องจากในแถบความนำว่างเปล่าและในแถบวาเลนซ์มีอิเลคตรอนอยู่เต็ม เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอิเลคตรอนจากตอนบนของแถบวาเลนซ์จะโลดข้ามช่องว่างแถบพลังงานขึ้นไปยังตอนล่างของแถบความนำ อิเลคตรอนในแถบความนำจะทำให้สารกึ่งตัวนำนำไฟฟ้าได้ ขณะเดียวกันการเคลื่อนที่ของโฮลในแถบวาเลนซ์เมื่อมีสนามไฟฟ้าก็จะเป็นส่วน

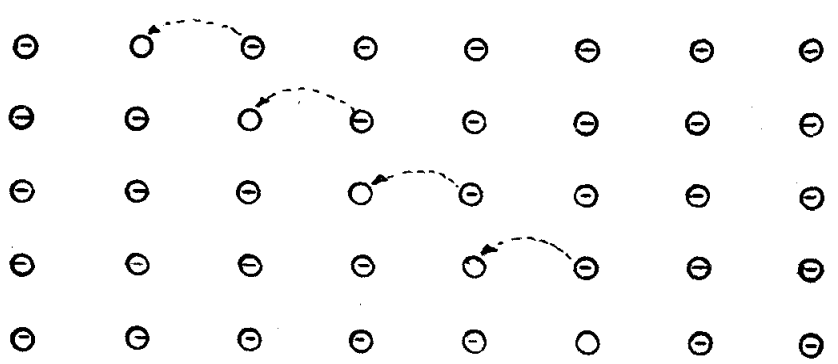
หนึ่งของการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำด้วย การเกิดอิเลคตรอนและโฮลนี้เราเรียกว่า "ขบวนการเกิดพาหะ (generation)" เมื่ออิเลคตรอนเหล่านี้ไปรวมตัวกับโฮล ทั้งอิเลคตรอนและโฮล



รูป 3.2 อิเลคตรอนที่ไลคออกไปจะทำให้เกิดสถานะว่างเรียกว่าโฮล

คู่นี้จะหายไป เราเรียกขบวนการนี้ว่า "การรวมตัวกันใหม่ (recombination)" ที่ภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิ $T > 0^{o}K$ ใดๆ ขบวนการเกิดพาหะและการรวมตัวกันใหม่จะเกิดขึ้นตลอดเวลา โดยจะมีความหนาแน่นของอิเลคตรอนในแถบความนำและโฮลในแถบวาเลนซ์คงที่ค่าหนึ่ง

รูป 3.3 แสดงการเคลื่อนที่ของโฮล ซึ่งจริงๆ แล้วก็คือการเคลื่อนที่ของอิเลคตรอนมารวมตัวกับโฮลแล้วเกิดโฮลขึ้นใหม่ ในสถานะที่อิเลคตรอนตัวนั้นจากบว นั่นเอง



รูป 3.3 การเคลื่อนที่ของโฮล

3.1.2 ความหนาแน่นของอิเลคตรอนและโฮล

ในกรณีของสารกึ่งตัวนำอินทรินซิค เนื่องจากการเกิดอิเลคตรอนและโฮลเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน เมื่ออิเลคตรอนตัวหนึ่งโลดขึ้นไปยังแถบความนำก็จะเกิดโฮลตัวหนึ่งในแถบวาเลนซ์ด้วย ดังนั้น ถ้ามีอิเลคตรอนอยู่ในแถบความนำเท่าใดก็จะมีโฮลอยู่เท่ากันในแถบวาเลนซ์ นั่นคือความหนาแน่นของอิเลคตรอนและโฮลมีค่าเท่ากัน

$$n = p = n_i \qquad \text{.....(3-1)}$$

เมื่อ n คือ ความหนาแน่นของอิเลคตรอนในแถบความนำ

p คือ ความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเ aui

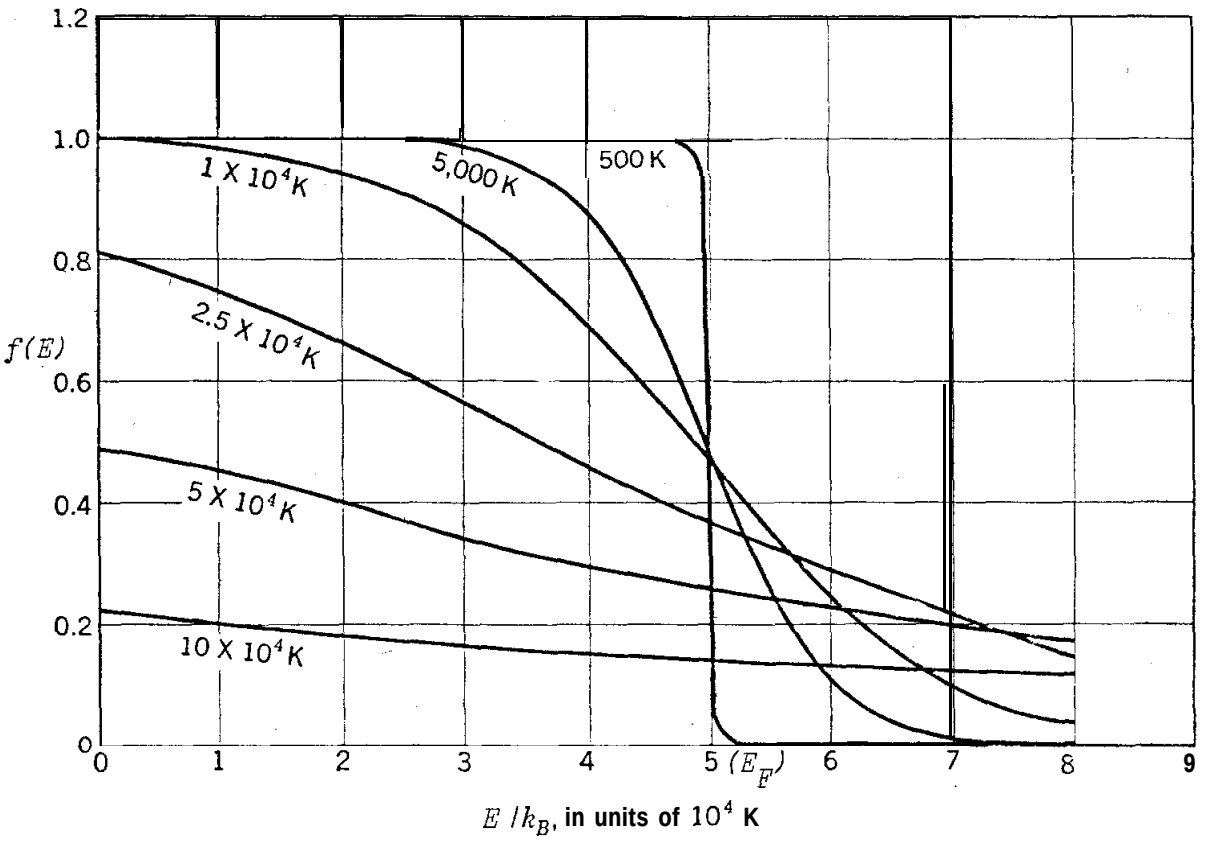
n_i คือ ความหนาแน่นของพาหะนำประจุอินทรินซิค (intrinsic concentration)

การคำนวณหาค่า n และ p สามารถหาได้จากฟังค์ชันการกระจายของเฟอร์มิ-ดิแรค

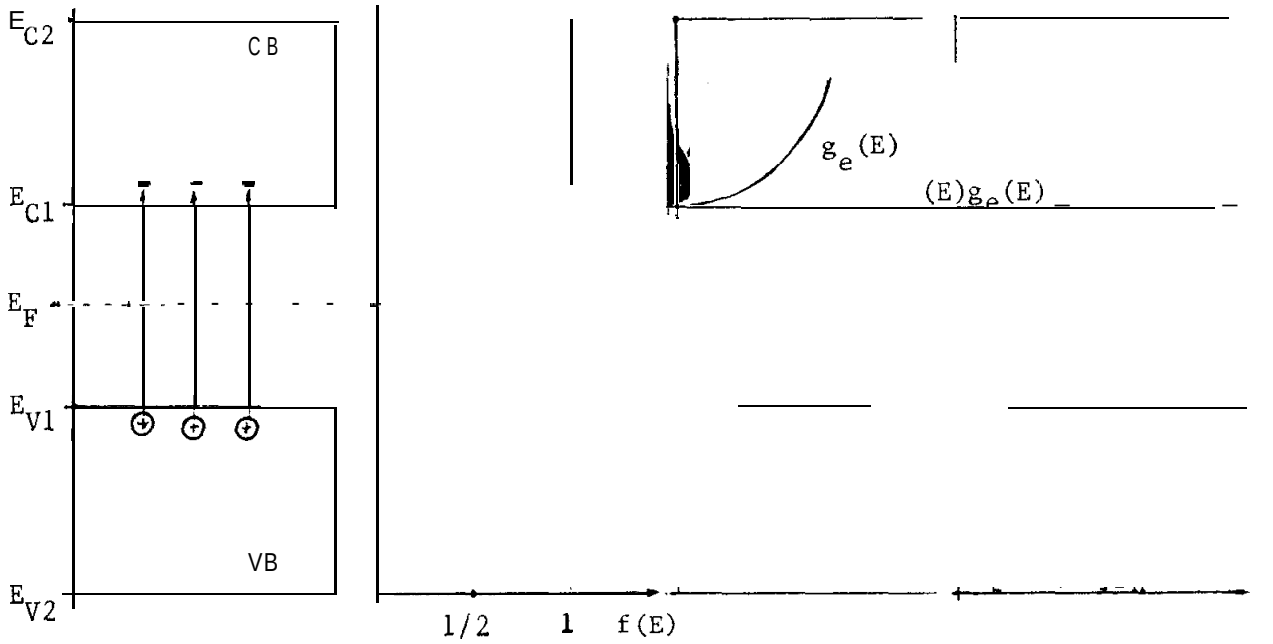
$$f(E) = (e^{(E-E_F)/k_BT} + 1)^{-1} \qquad \text{.....(3-2)}$$

$f(E)$ คือค่าความน่าจะเป็นที่จะพบอิเลคตรอนที่ระดับพลังงาน E เมื่อระบบสมดุลที่อุณหภูมิ T ใดๆ

รูป 3.4 เป็นการพลอต $f(E)$ เทียบกับ E ซึ่งจะสังเกตได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่วนหางของฟังค์ชัน (tail region) จะยืดออกไป นั่นคือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จำนวนอิเลคตรอนที่ระดับพลังงาน ($E > E_F$) จะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้จะเห็นว่าที่อุณหภูมิใดๆ $f(E_F)$ จะมีค่า $\frac{1}{2}$ นั่นคือที่ระดับเฟอร์มิ ความน่าจะเป็นที่จะพบอิเลคตรอนจะมีค่า $\frac{1}{2}$ เสมอ (ยกเว้นที่อุณหภูมิสูงมาก ซึ่งของแข็งมักจะหลอมเหลวไปก่อน)



รูป 3.4 ฟังค์ชันการกระจายของเฟอร์มิ-ดิแรค



ได้ง่าย (ที่อุณหภูมิห้อง f(E) จะมีรูปร่างเกือบเหมือน ที่อุณหภูมิ 0°K คือคล้าย step function)

เราสามารถคำนวณหาความหนาแน่นของอิเลคตรอนในแถบความนำได้ดังต่อไปนี้ คือ ให้ $g_e(E)$ เป็นความหนาแน่นของสถานะของอิเลคตรอน ดังนั้นจำนวนสถานะของอิเลคตรอนต่อ 1 หน่วยปริมาตร จากระดับพลังงาน E ถึง E + dE ใดๆ จะมีค่า $g_e(E)dE$ และเนื่องจากแต่ละสถานะมีความน่าจะเป็นที่อิเลคตรอนจะเข้าไปครอบครองเท่ากับ f(E) ดังนั้นจำนวนอิเลคตรอนต่อ 1 หน่วยปริมาตรในช่วงพลังงาน E ถึง E + dE ใดๆ จึงมีค่า

$$f(E)g_e(E)dE$$