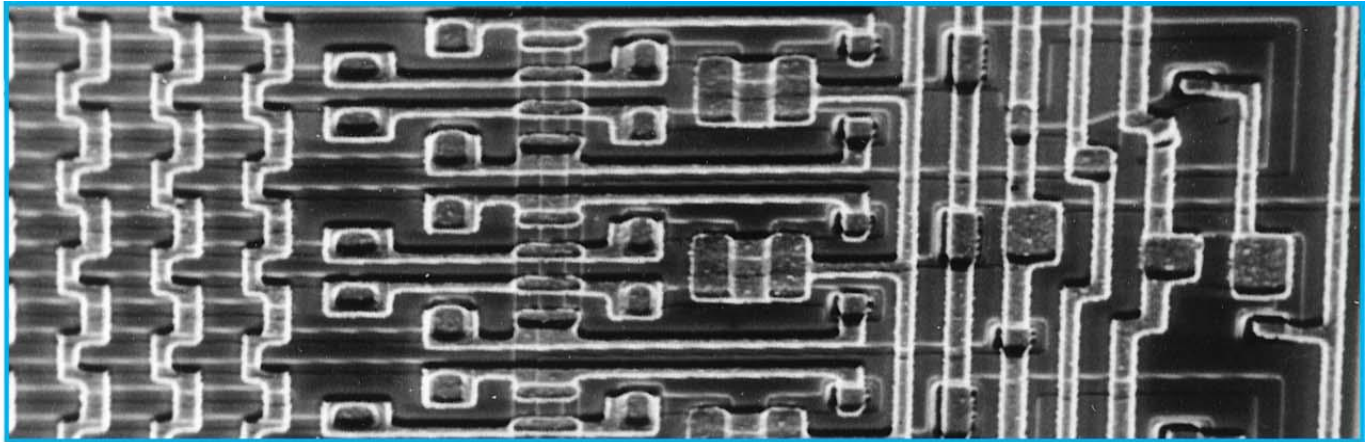


คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ

Electrical Properties



Learning Objectives

เป็นการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ เช่น การนำไฟฟ้าของโลหะ และสารกึ่งตัวนำ นอกจากนี้ก็ยังอธิบายความสามารถในการนำไฟฟ้า โดยทฤษฎีโครงสร้างแถบพลังงาน (electron band structure)

ELECTRICAL CONDUCTION

- Ohm's Law:

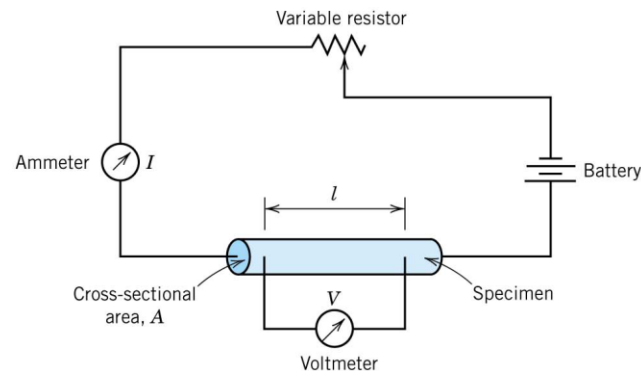
$$V = IR$$

voltage (volts) → current (amps) → resistance (Ohms)

- Resistivity, ρ เป็นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าที่ให้ ซึ่งเป็นค่าคงที่ของวัสดุที่อุณหภูมิใดๆ

$$\rho = \frac{RA}{l} = \frac{VA}{Il}$$

$$\text{unit} : \Omega \cdot m$$



- Conductivity, σ เป็นปฏิภาคส่วนกลับกับค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า

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

Electrical Conductivity

Conductors

- ส่วนมากจะเป็นโลหะ (Metals) จะทำตัวเป็นตัวนำที่ดี ซึ่งจะมีค่าสภาพการนำไฟฟ้าประมาณ $10^7 (\Omega\text{-m})^{-1}$

Insulators

- เป็นวัสดุที่มีค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำมากๆซึ่งมีค่าสภาพการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง $10^{-10} - 10^{-20} (\Omega\text{-m})^{-1}$

Semiconductors

- เป็นวัสดุที่มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าอยู่ประมาณ $10^{-6}-10^4 (\Omega\text{-m})^{-1}$

ตารางแสดงสภาพการนำไฟฟ้าของโลหะและอโลหะที่อุณหภูมิห้อง

	Electrical Conductivity ($\Omega\text{-m}$) ⁻¹
METALS	
Silver	6.8×10^7
Copper	6.0×10^7
Iron	1.0×10^7
SEMICONDUCTORS	
Silicon	4×10^{-4}
Germanium	2.2
GaAs	10^{-6}
CERAMICS	
Soda-lime glass	$10^{-10} - 10^{-11}$
Concrete	10^{-9}
Aluminum oxide	$<10^{-13}$
POLYMERS	
Polystyrene	$<10^{-14}$
Polyethylene	$10^{-15} - 10^{-17}$

Energy Band Structures in Solids

การพิจารณาถึงโครงสร้างแถบพลังงาน (Energy Band Structures) ของโลหะจะช่วยให้สามารถเข้าใจถึงกลไกการนำไฟฟ้าของโลหะได้มากยิ่งขึ้น ซึ่งความสามารถการนำไฟฟ้าของโลหะนั้น จะขึ้นอยู่กับ จำนวนอิเล็กตรอนที่มีส่วนร่วมในกระบวนการนำไฟฟ้า ซึ่งไม่ว่าอะตอมทั้งหมดจะสามารถถูกเร่งให้เกิดสนามไฟฟ้าได้ จำนวนอะตอมที่มีส่วนร่วมในการเกิดสภาพการนำไฟฟ้านั้นจะขึ้นกับการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนในชั้น electron state หรือระดับของอิเล็กตรอนซึ่งมีความสัมพันธ์กับพลังงาน

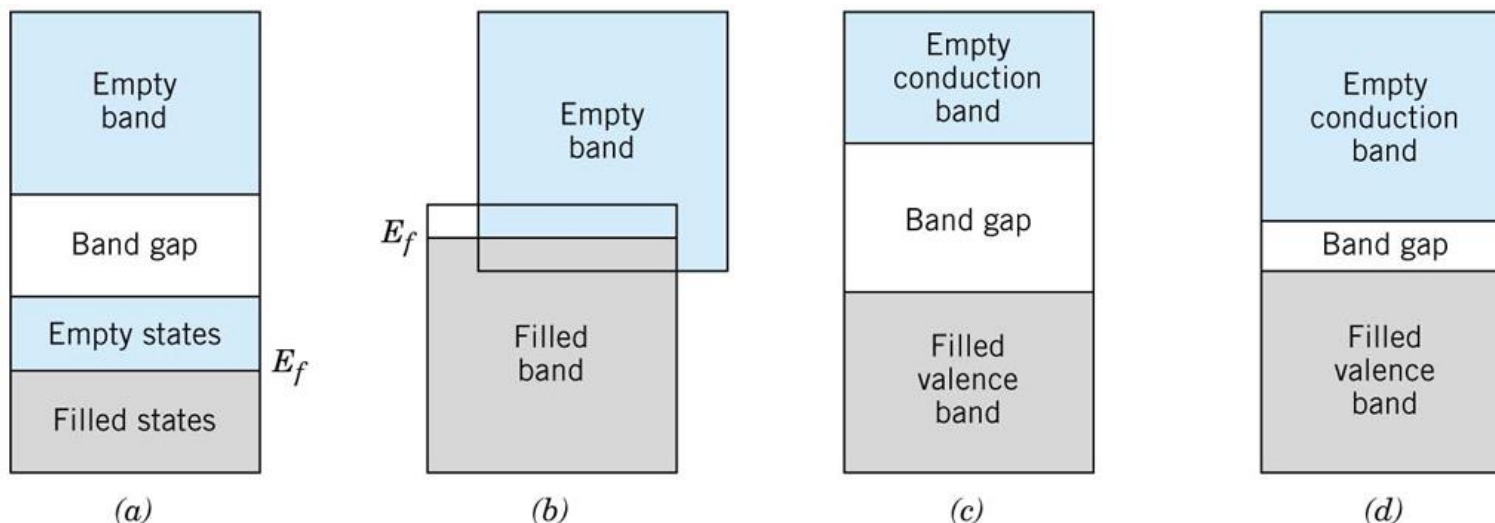


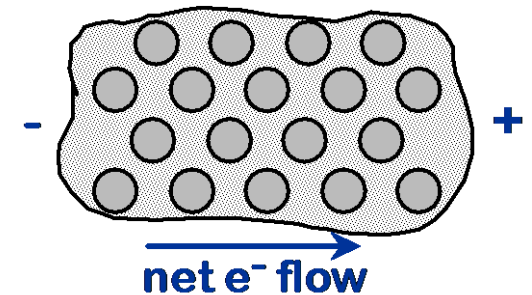
FIGURE 18.4 The various possible electron band structures in solids at 0 K. (a) The electron band structure found in metals such as copper, in which there are available electron states above and adjacent to filled states, in the same band. (b) The electron band structure of metals such as magnesium, wherein there is an overlap of filled and empty outer bands. (c) The electron band structure characteristic of insulators; the filled valence band is separated from the empty conduction band by a relatively large band gap (>2 eV). (d) The electron band structure found in the semiconductors, which is the same as for insulators except that the band gap is relatively narrow (<2 eV).

E_f : **Fermi Energy** = เป็นพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นให้อิเล็กตรอนข้ามไปในระดับพลังงานที่สูงขึ้น

CONDUCTION & ELECTRON TRANSPORT

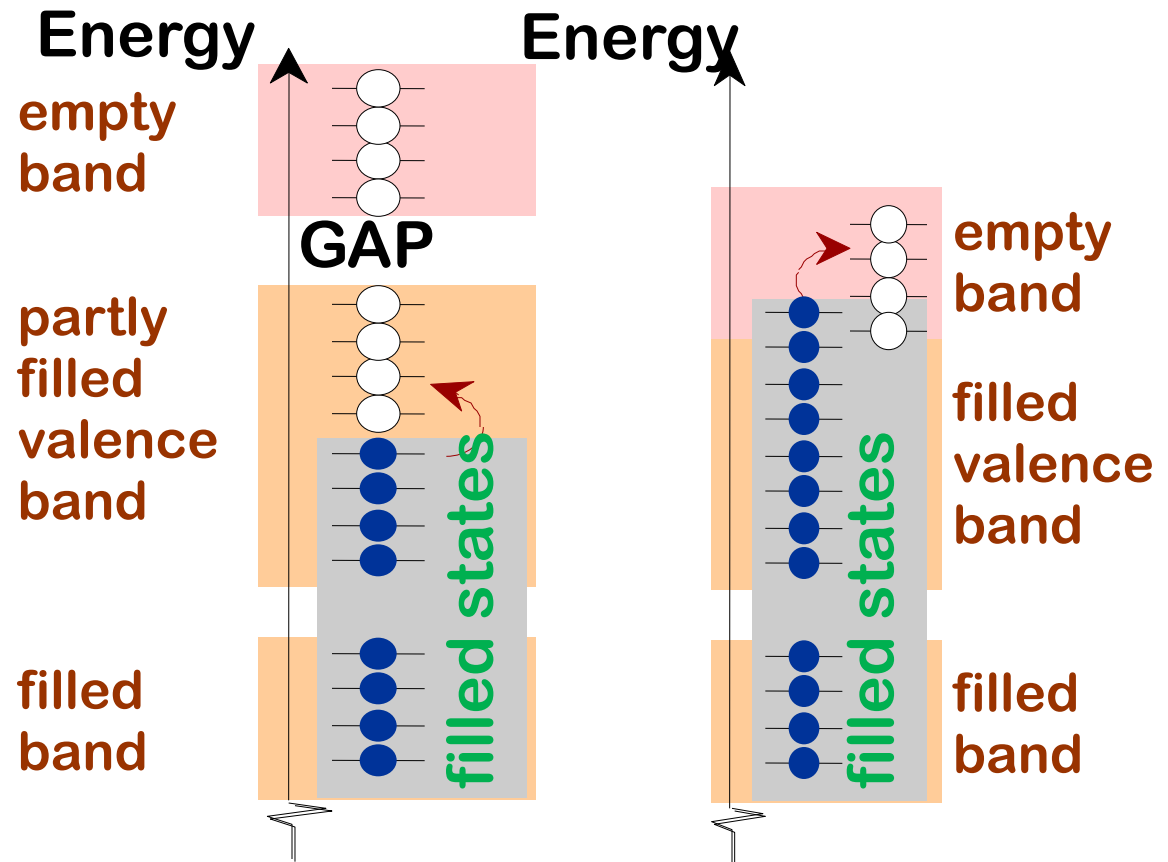
- **Metals:**

- Thermal energy puts many electrons into a higher energy state.



- Energy States:

- the cases below for metals show that nearby energy states are accessible by thermal fluctuations.

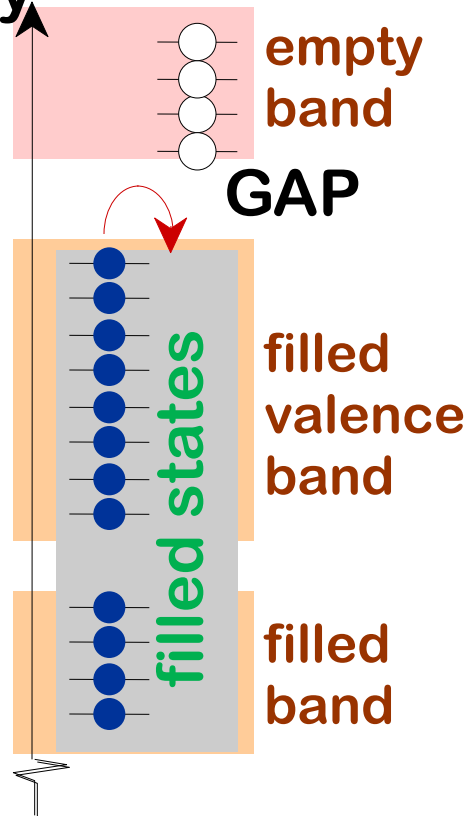


ENERGY STATES: INSULATORS AND SEMICONDUCTORS

- Insulators:**

--Higher energy states not accessible due to gap.

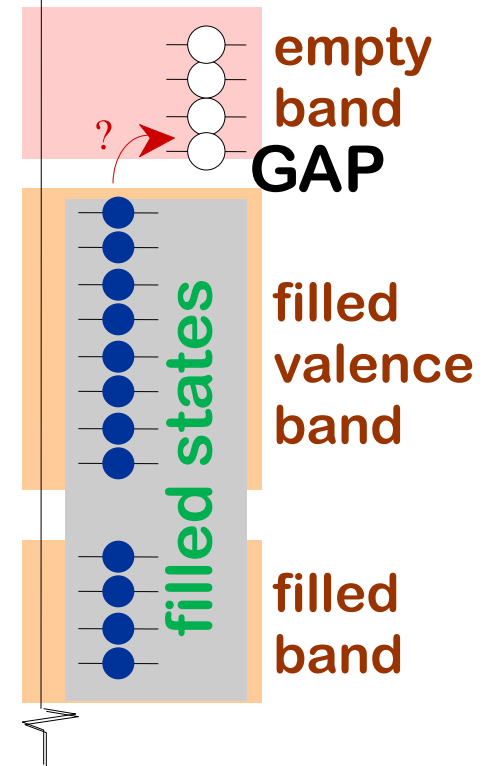
Energy



- Semiconductors:**

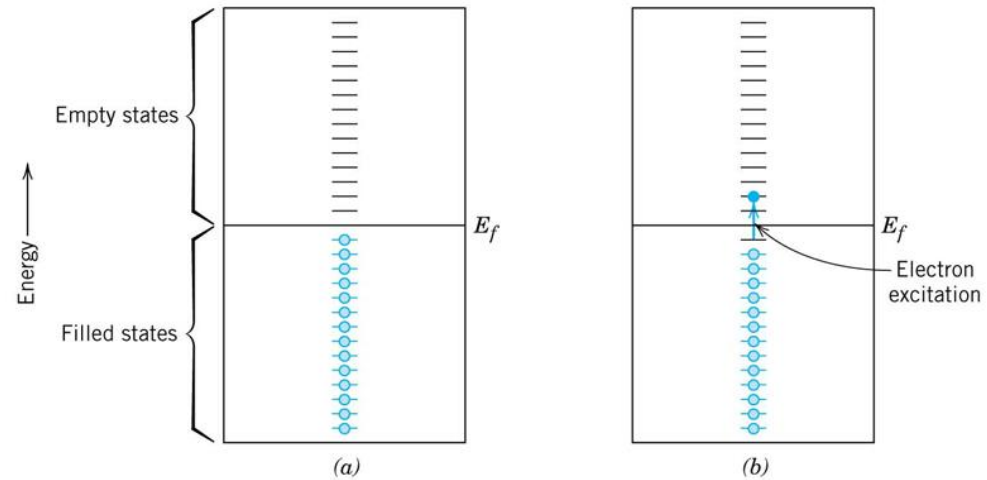
--Higher energy states separated by a smaller gap.

Energy



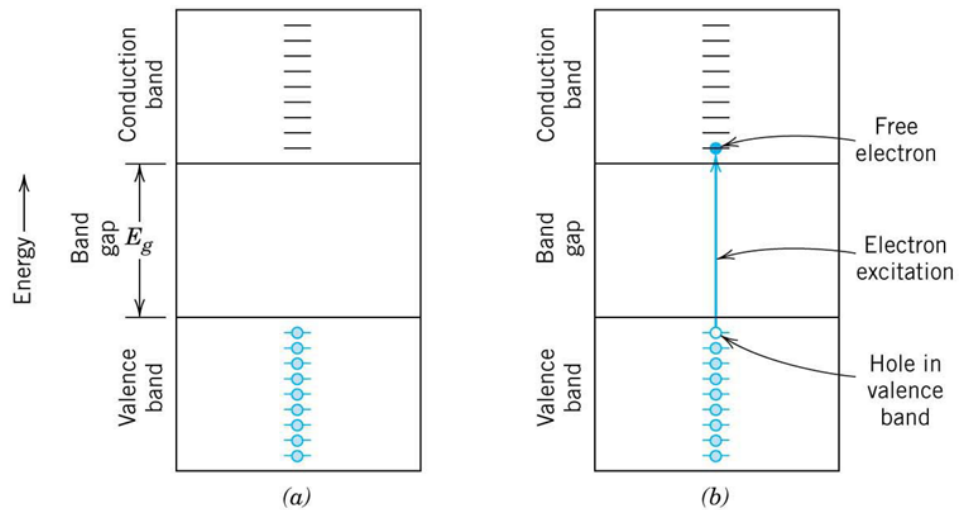
Metals

FIGURE 18.5 For a metal, occupancy of electron states (a) before and (b) after an electron excitation.



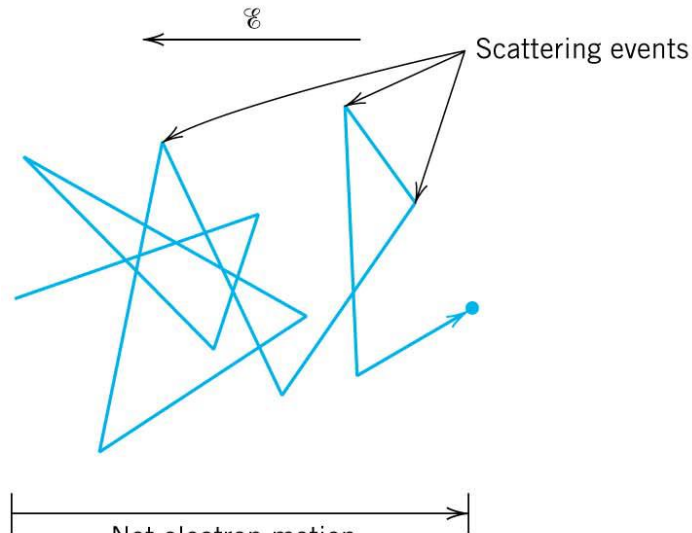
Insulators and Semiconductors

FIGURE 18.6 For an insulator or semiconductor, occupancy of electron states (a) before and (b) after an electron excitation from the valence band into the conduction band, in which both a free electron and a hole are generated.



ความเร็วลอยเลื่อน (Average electron drift velocity : v_d)

ถ้าความเข้มของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ E ถูกใส่เข้าไปในตัวนำ อิเล็กตรอนจะถูกเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วค่าหนึ่งในทิศทางตรงข้ามกับสนามไฟฟ้าที่ใส่เข้าไป ซึ่งอิเล็กตรอนจะมีค่าเฉลี่ยของความเร็วลอยเลื่อน (average electron drift velocity) เท่ากับ v_d ซึ่งเป็นปฏิภาคโดยตรงกับสนามไฟฟ้า E ดังสมการ

$$v_d = \mu_e E$$


สภาพการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน Electron mobility) : μ_e ($\text{m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)

สภาพต้านทานไฟฟ้าของโลหะ

(ELECTRICAL RESISTIVITY OF METALS)

เป็นค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของโลหะ ซึ่งประมาณได้จาก

$$\rho = \rho_t + \rho_i + \rho_d \quad (\text{Matthiessen's rule})$$

โดย ρ_t เป็นค่าความต้านทานที่เกิดจากการสั่นของอิเล็กตรอนในโครงสร้างเนื่องจากอุณหภูมิสูงขึ้น (Temperature)

ρ_i เป็นค่าความต้านทานที่เกิดจากความบกพร่องภายในเนื้อโลหะ เช่น สารเจือปน (Impurity)

ρ_d เป็นค่าความต้านทานที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปของวัสดุ (Deformation)

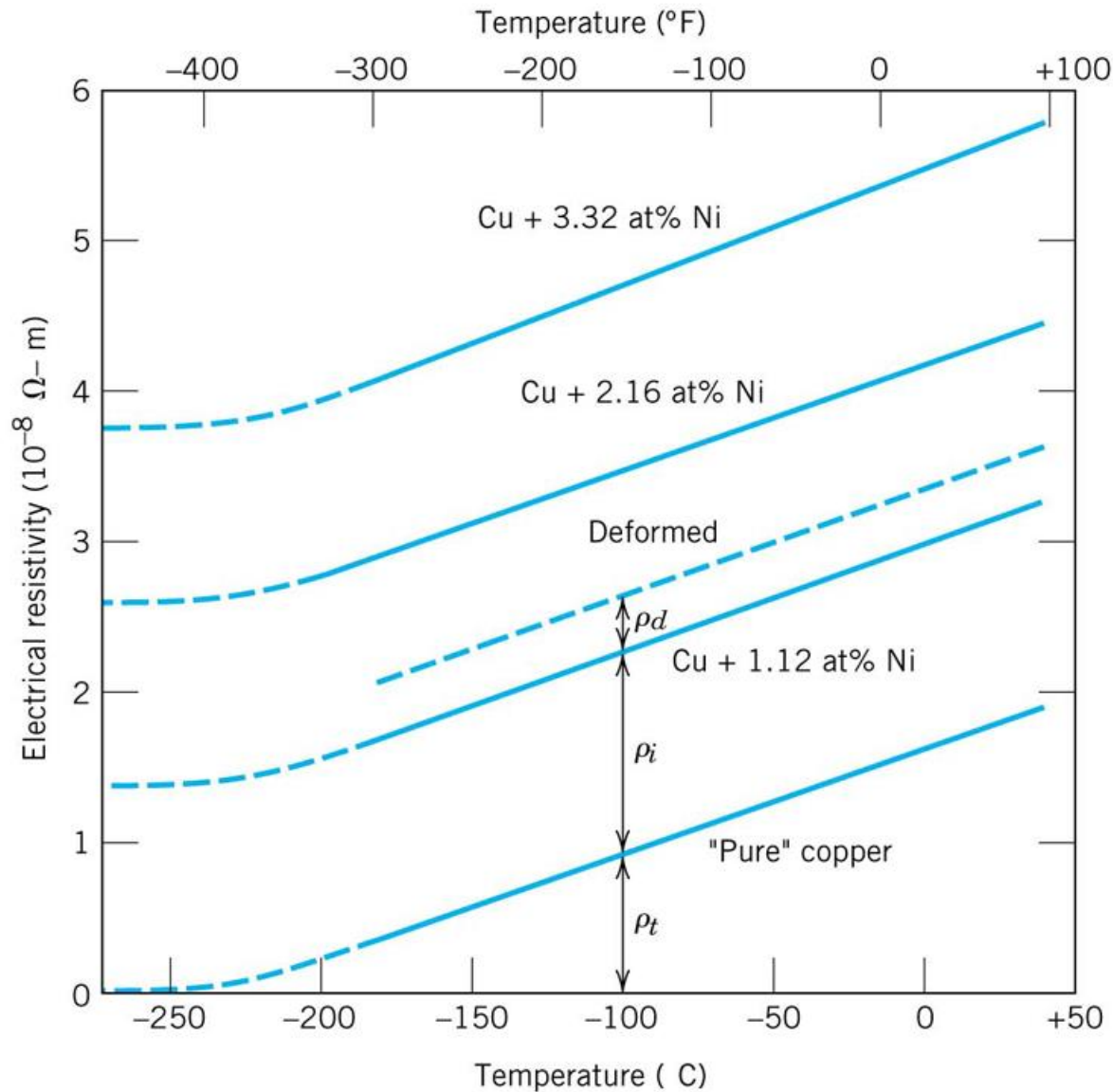


FIGURE 18.8 The electrical resistivity versus temperature for copper and three copper-nickel alloys, one of which has been deformed. Thermal, impurity, and deformation contributions to the resistivity are indicated at $-100^{\circ}C$. [Adapted from J.O. Linde, *Ann. Physik*, **5**, 219 (1932); and C.A. Wert and R. M. Thomson, *Physics of Solids*, 2nd edition, McGraw-Hill Book Company, New York, 1970]

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า

- Temperature

$$\rho_t = \rho_0 + aT$$

ρ_0 และ a เป็นค่าคงที่ของโลหะแต่ละชนิด

•Impurity

$$\rho_i = A c_i (1 - c_i)$$

A : composition-independent constant

c_i : atom fraction (at % /100)

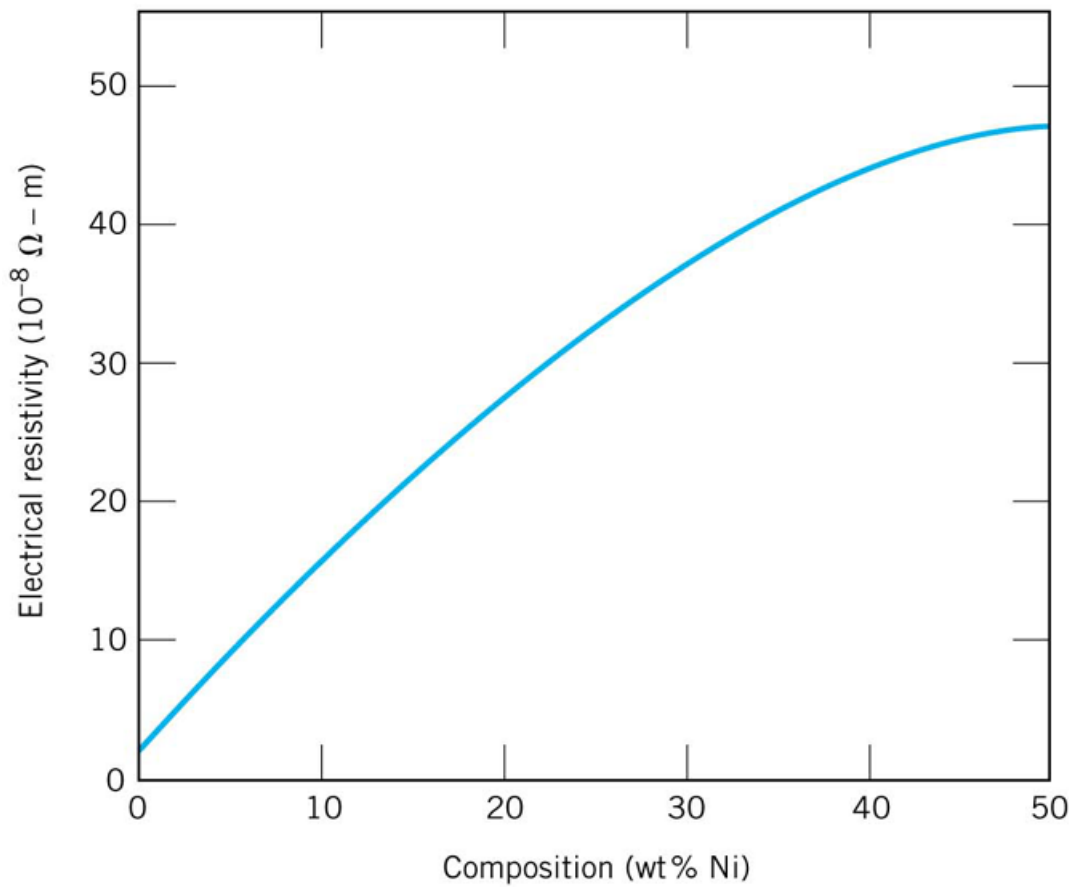


FIGURE 18.9 Room-temperature electrical resistivity versus composition for copper–nickel alloys.

Semiconductivity

สภาพการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) จะไม่สูงเหมือนกับโลหะ ซึ่งสารกึ่งตัวนำจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

- - Intrinsic semiconductor
 - เป็นสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์
- - Extrinsic semiconductor
 - เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีส่วนประกอบของสารเจือปน (impurity atom)

Intrinsic Semiconductor

- Concept of a hole

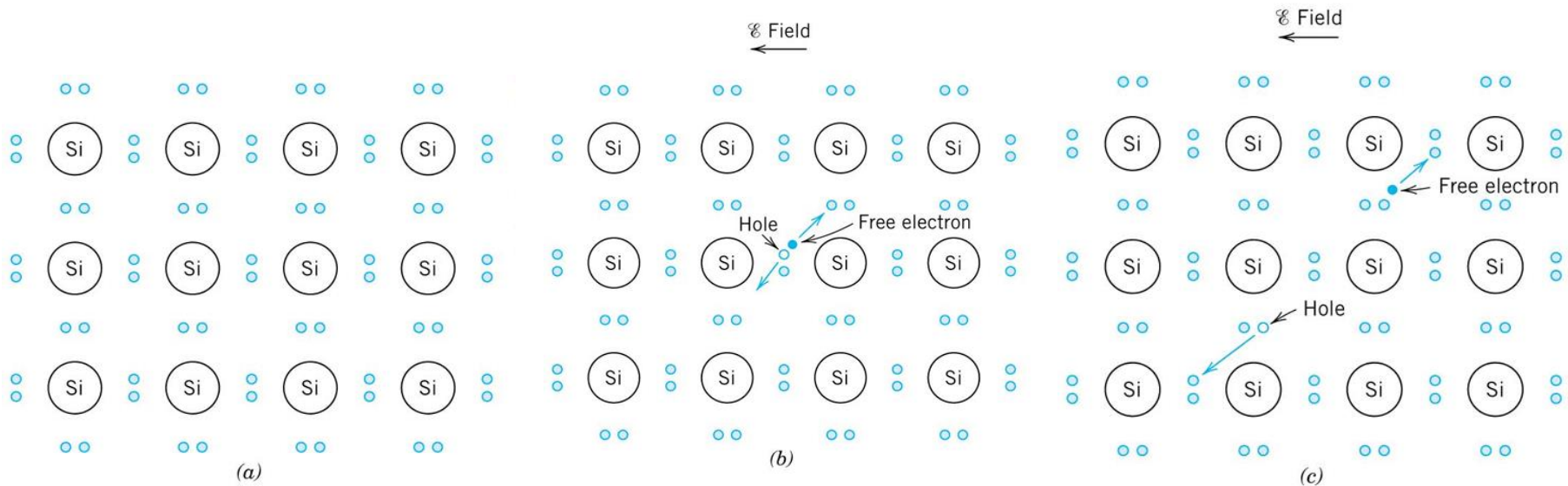


FIGURE 18.10 Electron bonding model of electrical conduction in intrinsic silicon: (a) before excitation, (b) and (c) after excitation (the subsequent free-electron and hole motions in response to an external electric field).

Intrinsic Conductivity

$$\sigma = n|e|\mu_e + p|e|\mu_h$$

p : จำนวนหลุม (hole) ต่อลูกบาศก์เมตร

n : จำนวนอิเล็กตรอน ต่อหน่วยปริมาตร

e : ค่าสัมบูรณ์ของประจุอิเล็กตรอนและหลุม (1.6×10^{-19} C)

μ_e, μ_h : สภาพการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและหลุม ตามลำดับ

ในกรณี intrinsic semiconductor ค่า $\mu_h < \mu_e$ และ $n = p = n_i$

n_i : ความเข้มข้นของพาหะ (intrinsic carrier concentration)

$$\sigma = n|e|(\mu_e + \mu_h) = p|e|(\mu_e + \mu_h) = n_i|e|(\mu_e + \mu_h)$$

Table 18.2 Band Gap Energies, Electron and Hole Mobilities, and Intrinsic Electrical Conductivities at Room Temperature for Semiconducting Materials

<i>Materials</i>	<i>Band Gap (eV)</i>	<i>Electrical Conductivity [[Ω-m)⁻¹]</i>	<i>Electron Mobility [m²/V-s)</i>	<i>Hole Mobility [m²/V-s)</i>
Si	1.11	4×10^{-4}	0.14	0.05
Ge	0.67	2.2	0.38	0.18
GaP	2.25	-	0.03	0.015
GaAs	1.42	10^{-6}	0.85	0.04
InSb	0.17	2×10^4	7.7	0.07
CdS	2.40	-	0.03	-
ZnTe	2.26	-	0.03	0.01

Extrinsic Semiconductor

เป็นสารละลายของแข็งแบบแทนที่แบบเจือจาง (dilute substitutional solid solution) ที่มีตัวทำละลายซึ่งมีค่าวาเลนซ์อิเล็กตรอนแตกต่างกับตัวทำละลาย ความเข้มข้นของสารตัวถูกละลายหรือสารเจือปนที่เติมเข้าไปจะมีค่าประมาณ 1 อะตอมใน 10^{12} อะตอม

สารกึ่งตัวนำแบบ extrinsic สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

- 1. แบบ n (negative type)
- 2. แบบ p (positive type)

n-type Extrinsic Semiconduction

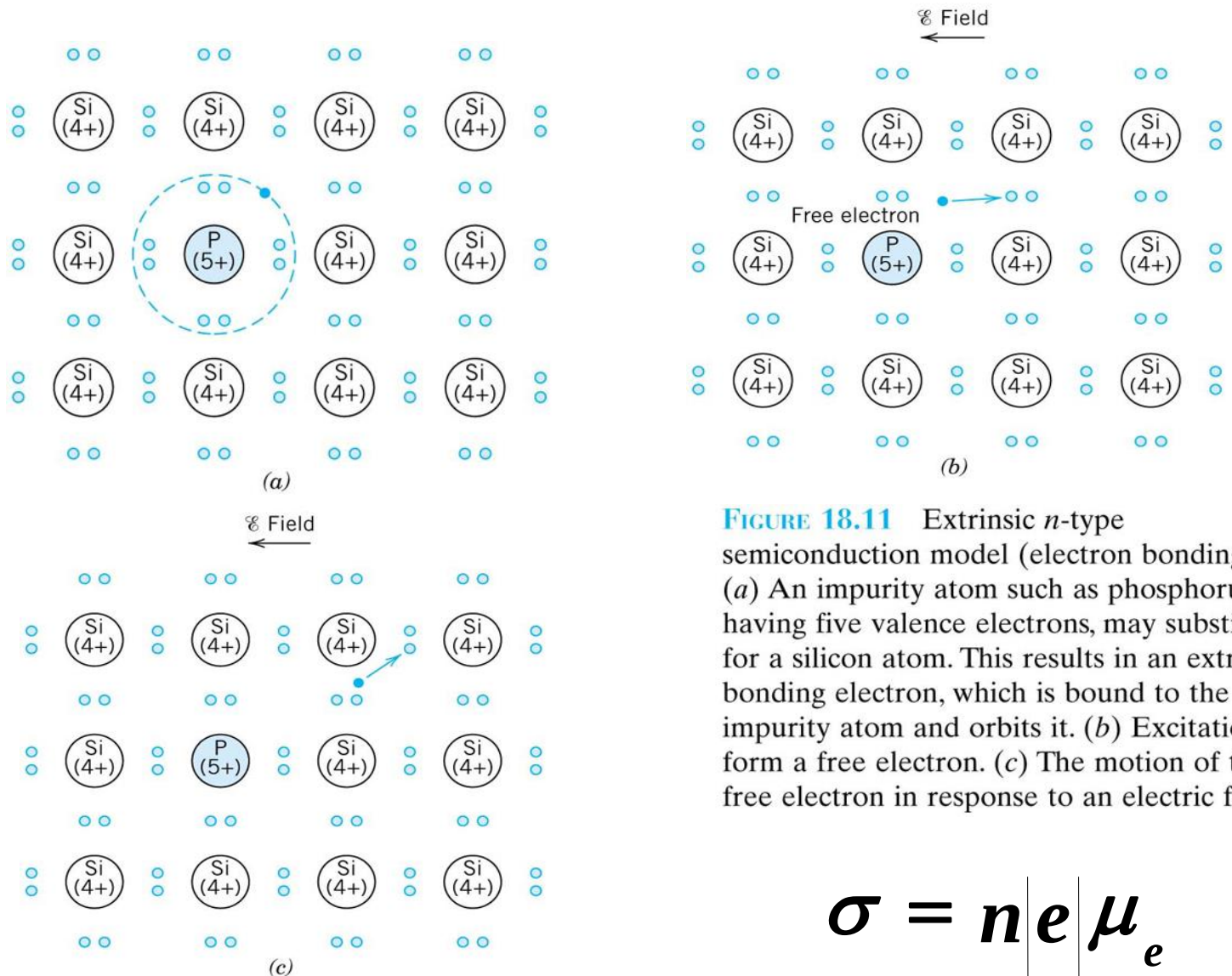


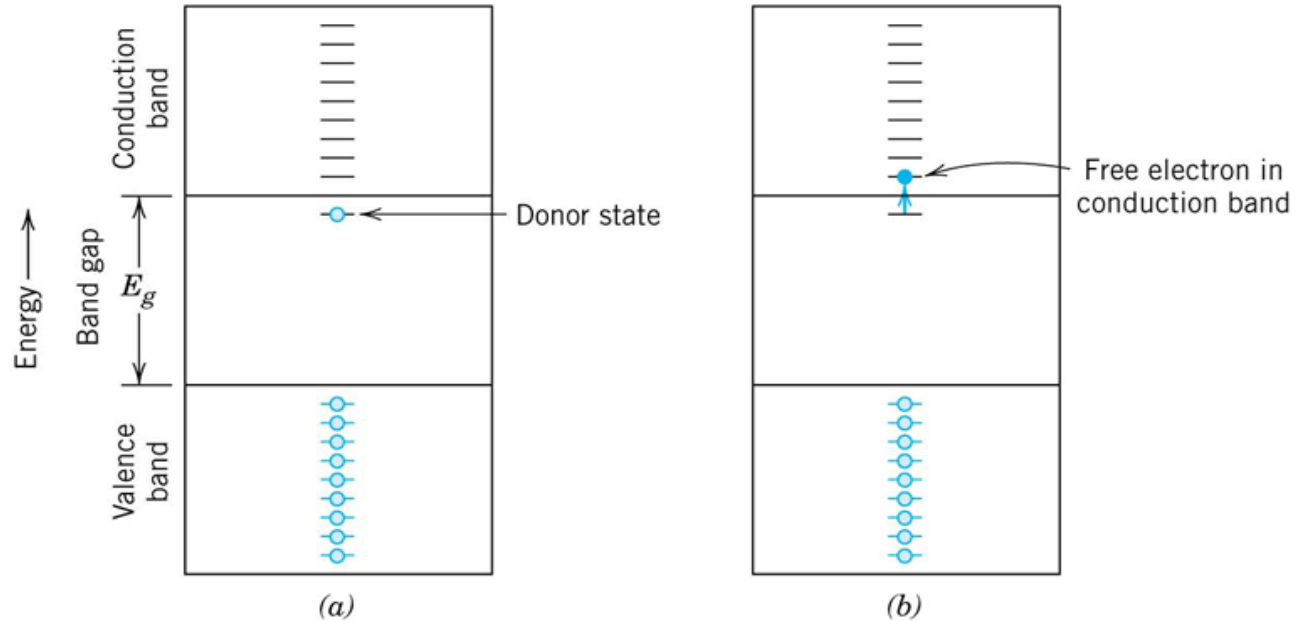
FIGURE 18.11 Extrinsic *n*-type semiconduction model (electron bonding). (a) An impurity atom such as phosphorus, having five valence electrons, may substitute for a silicon atom. This results in an extra bonding electron, which is bound to the impurity atom and orbits it. (b) Excitation to form a free electron. (c) The motion of this free electron in response to an electric field.

$$\sigma = n e \mu_e$$

FIGURE 18.12

(a) Electron energy band scheme for a donor impurity level located within the band gap and just below the bottom of the conduction band.

(b) Excitation from a donor state in which a free electron is generated in the conduction band.



p-type Extrinsic Semiconduction

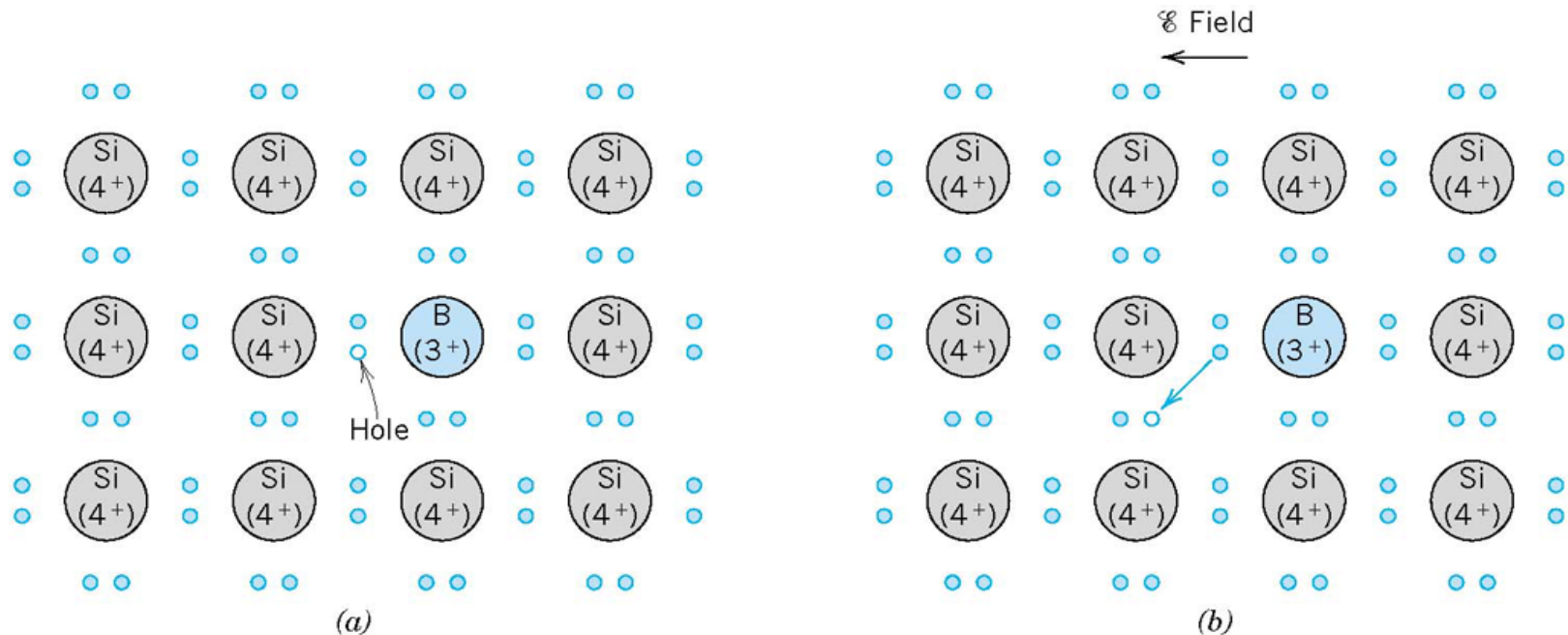
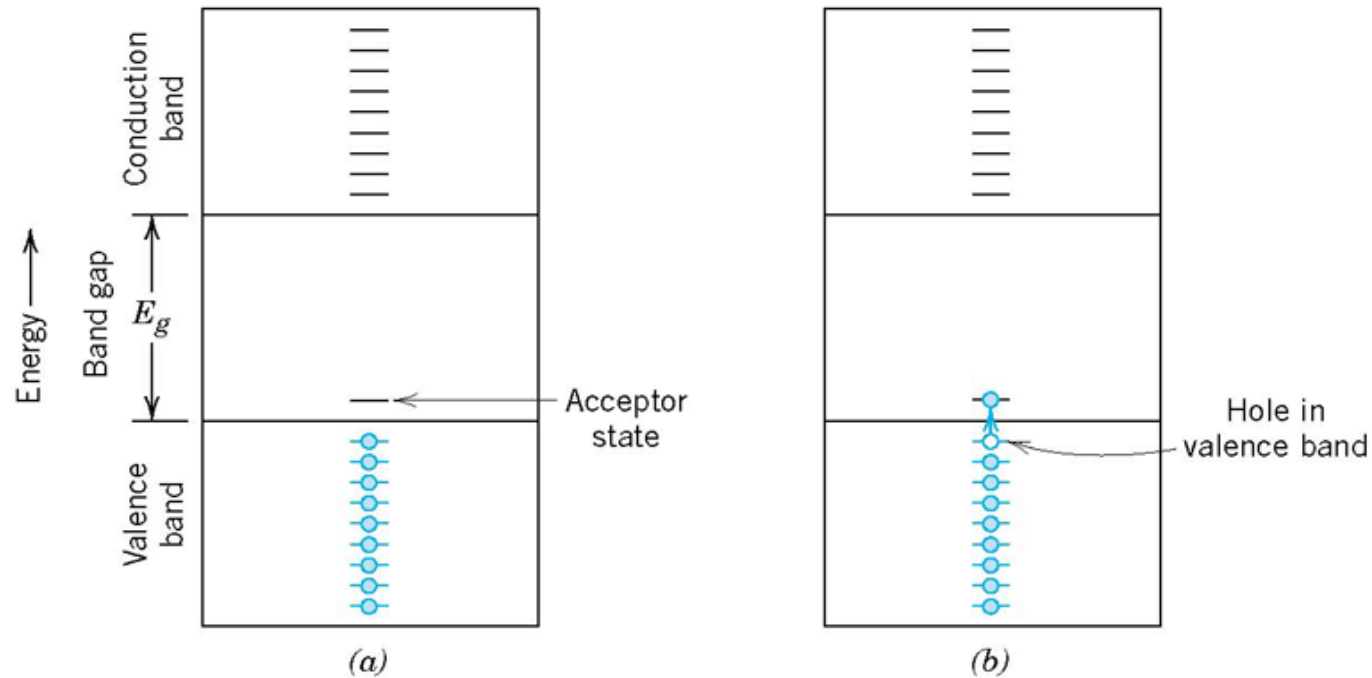


FIGURE 18.13 Extrinsic *p*-type semiconduction model (electron bonding). (a) An impurity atom such as boron, having three valence electrons, may substitute for a silicon atom. This results in a deficiency of one valence electron, or a hole associated with the impurity atom. (b) The motion of this hole in response to an electric field.

$$\sigma = p |e| \mu_h$$

FIGURE 18.14

(a) Energy band scheme for an acceptor impurity level located within the band gap and just above the top of the valence band.
(b) Excitation of an electron into the acceptor level, leaving behind a hole in the valence band.



ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่า N_i (CARRIER CONCENTRATION)

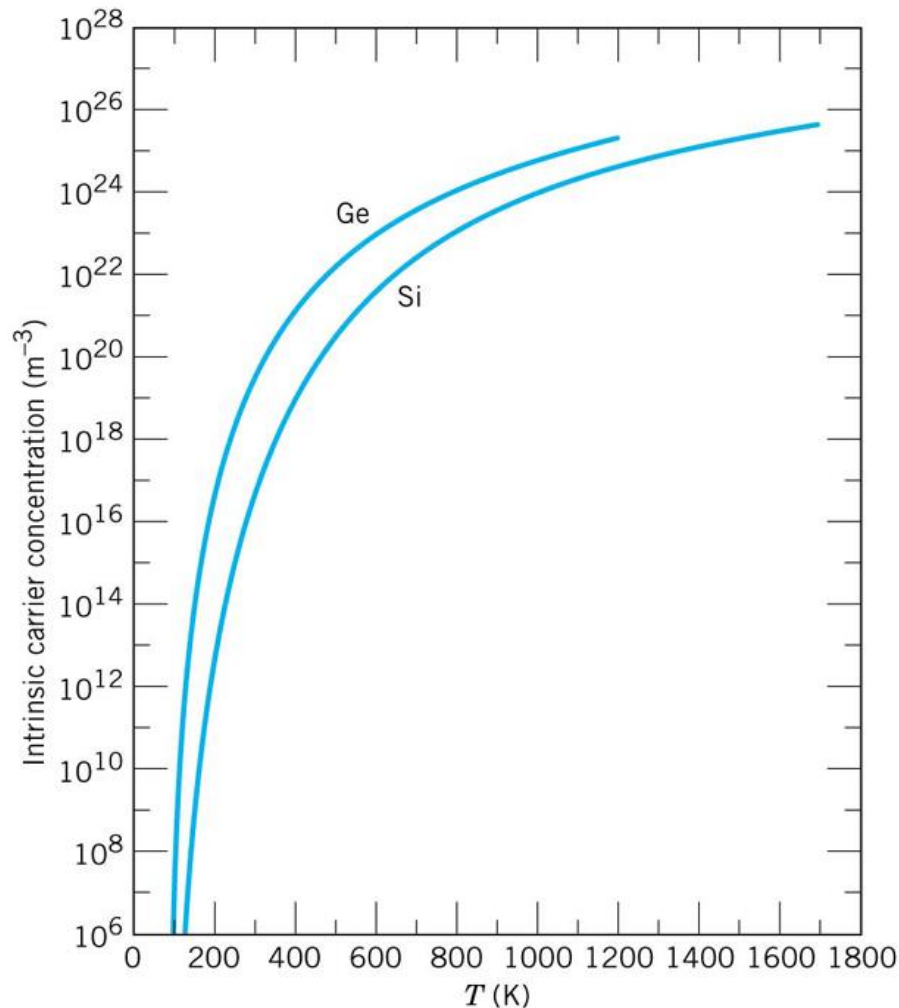


FIGURE 18.15 Intrinsic carrier concentration (logarithmic scale) as a function of temperature for germanium and silicon. (From C. D. Thurmond, "The Standard Thermodynamic Functions for the Formation of Electrons and Holes in Ge, Si, GaAs, and GaP," *Journal of The Electrochemical Society*, **122**, [8], 1139 (1975). Reprinted by permission of The Electrochemical Society, Inc.)

ปัจจัยที่มีผลกระทบกับค่าสภาพเคลื่อนที่ได้ (MOBILITY)

•Dopant Content

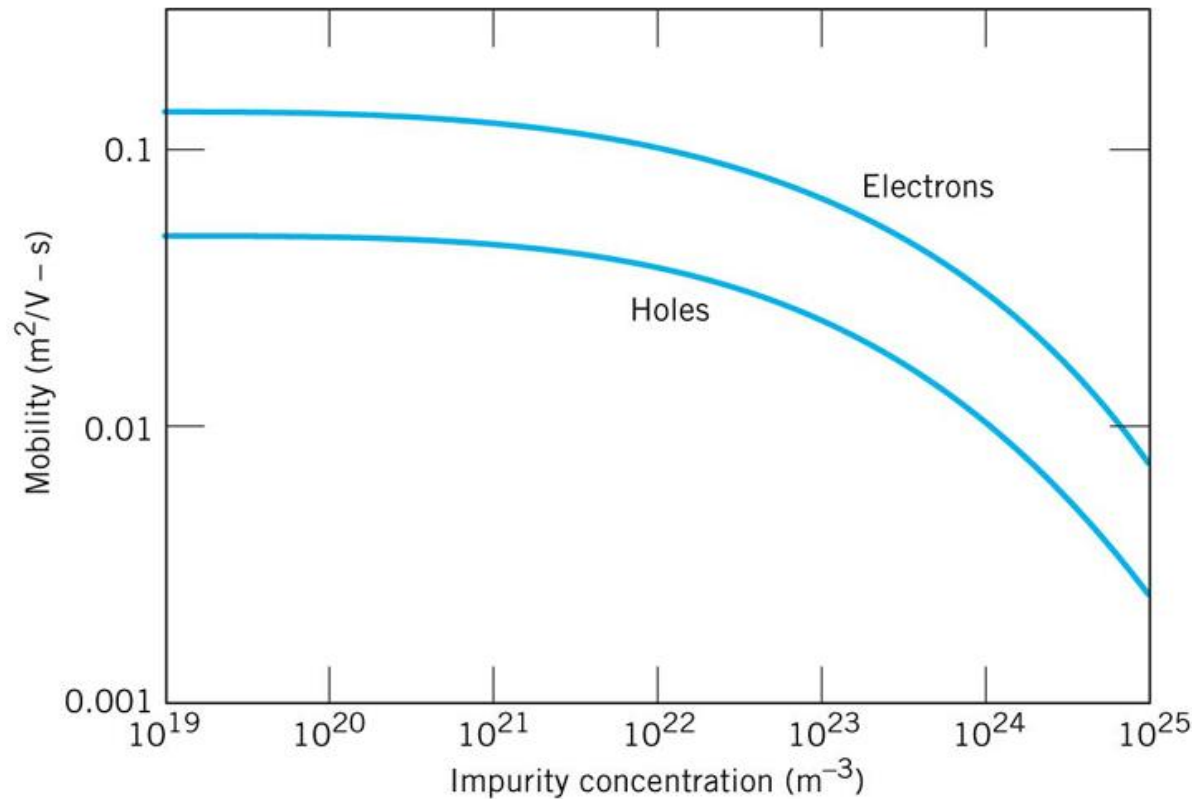


FIGURE 18.17 For silicon, dependence of room-temperature electron and hole mobilities (logarithmic scale) on dopant concentration (logarithmic scale). (Adapted from W. W. Gärtner, "Temperature Dependence of Junction Transistor Parameters," *Proc. of the IRE*, **45**, 667, 1957. Copyright © 1957 IRE now IEEE.)

ปัจจัยที่มีผลกระทบกับค่าสภาพเคลื่อนที่ได้ (MOBILITY)

•Temperature

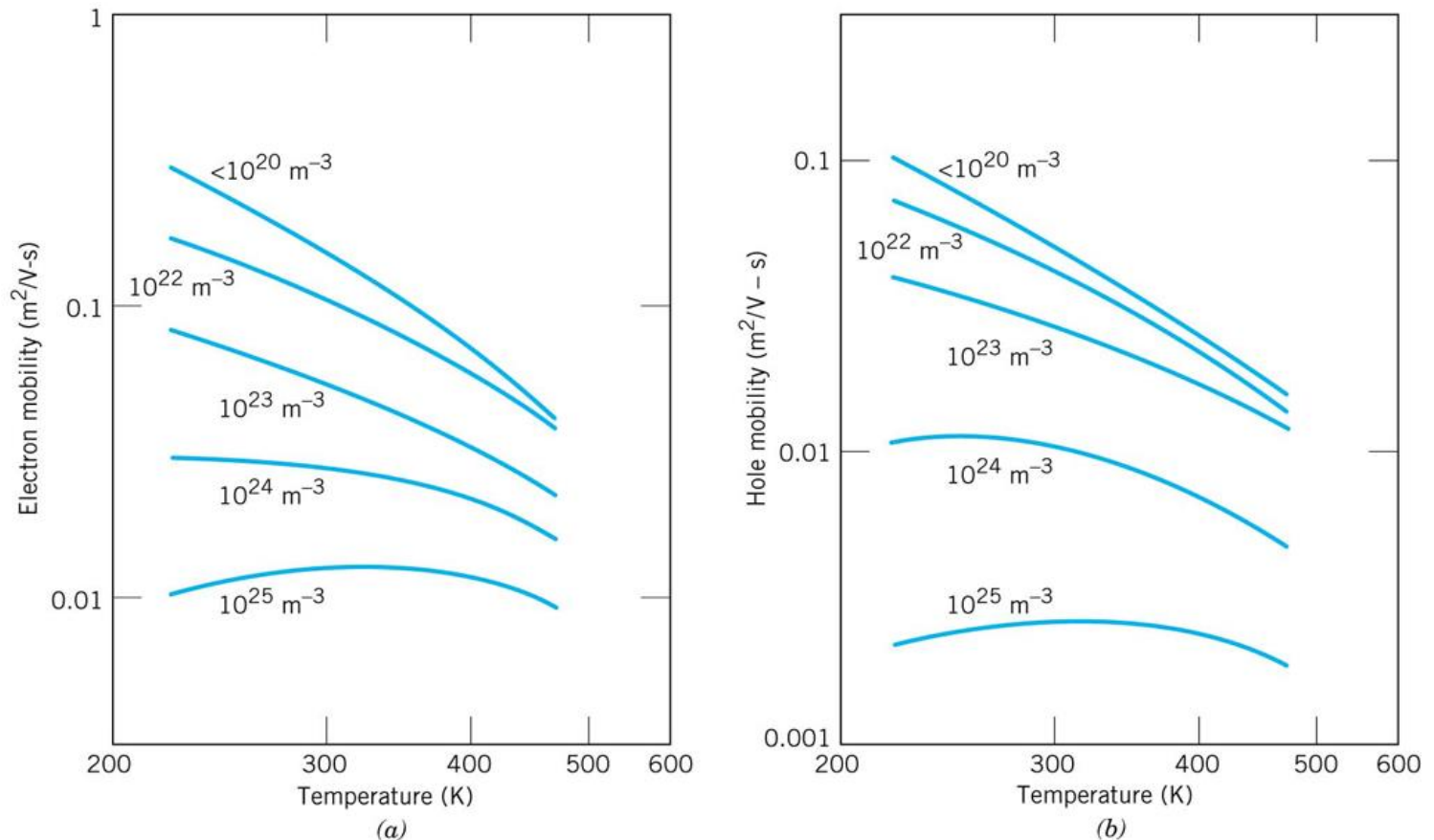


FIGURE 18.18 Temperature dependence of (a) electron and (b) hole mobilities for silicon that has been doped with various donor and acceptor concentrations. Both sets of axes are scaled logarithmically. (From W. W. Gärtner, "Temperature Dependence of Junction Transistor Parameters," *Proc. of the IRE*, **45**, 667, 1957. Copyright © 1957 IRE now IEEE.)

Example

- 1. Calculate the electrical conductivity of intrinsic silicon at 150°C (423 K)
- 2. To high-purity silicon is added 10^{23} m^{-3} arsenic atoms.
 - (a) Is this material n-type or p-type?
 - (b) Calculate the room-temperature electrical conductivity of this material.
 - (c) Compute the conductivity at 100°C (373 K)