

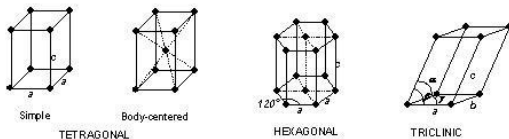
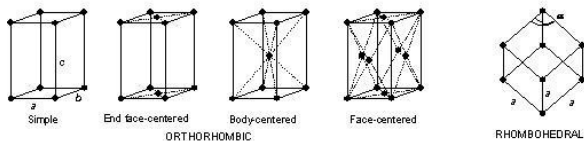
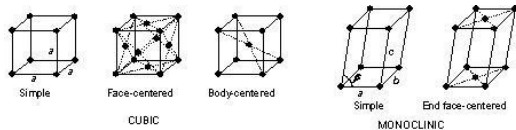
บรรยาย 16 ผลึกของแข็ง สารกึ่งตัวนำและอุปกรณ์  
SCPY152, ฟิสิกส์-คณะวิทยาศาสตร์-มหิดล, ภาคปลาย 2564-65

อุดม รอบคอบ

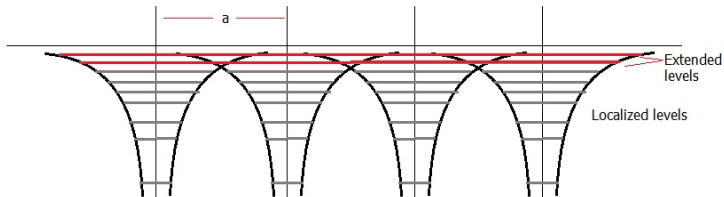
23 มีนาคม 2565

# ผลึกของแข็ง

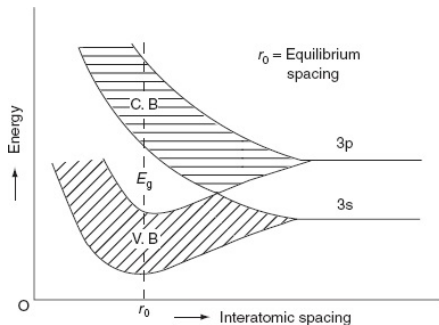
- ▶ พิจารณาสารในสถานะของแข็ง (solids) และมีโครงสร้างเป็นผลึก (crystal) รูปแบบของผลึกมีความหลากหลาย ขึ้นอยู่กับอิเล็กตรอนวาเลนซ์ของอะตอมในผลึก ดังปรากฏตามรูป



- ▶ พิสิกส์สนใจโครงสร้างพลังงานของอิเล็กตรอนของอะตอมในผลึก
- ▶ สำหรับผลึกในแถวเดียว ที่มีระยะระหว่างอะตอม  $a$  จะปรากฏการซ้อนทับของบ่อพลังงานศักย์คูลอมบ์ ของอะตอมที่อยู่ใกล้กัน ระดับพลังงานอะตอมบางส่วนจะขยายไปตลอดผลึก (extended levels) ในขณะที่ระดับพลังงานอะตอมส่วนอื่นยังคงอยู่กับอะตอม (localized levels)

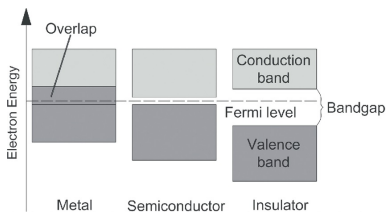


- ▶ ระดับพลังงานขยาย จะรวมกันเป็นแถบพลังงาน (energy band)



- ▶ แถบพลังงานสูงสุดที่มีอิเล็กตรอน คือแถบวาเลนซ์ (valence band: VB) แถบพลังงานต่ำสุดที่ไม่มีอิเล็กตรอน คือแถบนำ (conduction band: CB)
- ▶ ช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (energy gap) มักจะปรากฏในสารกึ่งตัวนำและฉนวนไฟฟ้า แต่ไม่ปรากฏในสารตัวนำไฟฟ้า

▶ แผนภาพแถบพลังงานของสารตัวนำ กึ่งตัวนำ และฉนวนไฟฟ้า

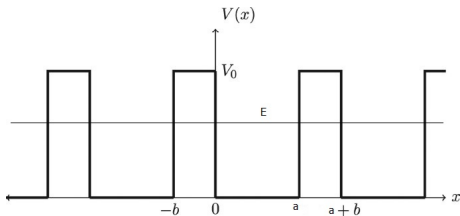


$$E_g(C) = 5.4\text{eV}, \quad E_g(\text{Si}) = 1.1\text{eV}, \quad E_g(\text{Ge}) = 0.7\text{eV}$$

Properties	Conductor	Semiconductor	Insulator
Resistivity	$10^{-6} - 10^{-8} \Omega\text{m}$	$10^{-4} - 0.5 \Omega\text{m}$	$10^7 - 10^{16} \Omega\text{m}$
Conductivity	$10^6 - 10^8 \text{ mho/m}$	$10^4 - 0.5 \text{ mho/m}$	$10^{-7} - 10^{-16} \text{ mho/m}$
Temp. Coefficient of resistance ( $\alpha$ )	Positive	Negative	Negative
Current	Due to free electrons	Due to electrons and holes	No current
Forbidden energy gap	$\cong 0\text{eV}$	$\cong 0 - 1\text{eV}$	$\geq 6\text{eV}$
Example	Pt, Al, Cu, Ag	Ge, Si, C, GaAs, GaF <sub>2</sub>	Wood, plastic, Diamond, Mica

# ทฤษฎีแถบพลังงาน

- ▶ แถบพลังงานมีกำเนิดจากบ่อพลังงานศักย์ที่เป็นคาบ (periodic potential well) ซึ่งแสดงได้ด้วยแบบจำลองพลังงานศักย์ง่ายๆ ของ Kronig-Penney



- ▶ มีความแตกต่างของบ่อพลังงานสองส่วน คือ  $0 < x < a$  และ  $a < x < a + b$  และมีคาบ (periodicity) เท่ากับ  $a + b$  หมายความว่าคลื่นอิเล็กตรอนที่  $x = a$  จะเหมือนกับคลื่นอิเล็กตรอนที่  $x = -b$

► คำนวณฟังก์ชันคลื่นอิเล็กตรอนในสองส่วนของบ่อพลังงานศักย์

$$0 < x < a: \quad \varphi_I'' + k^2 \varphi_I = 0, \quad k^2 = \frac{2mE}{\hbar^2}$$
$$\mapsto \varphi_I(x) = Ae^{+ikx} + Be^{-ikx} \quad (1)$$

$$a < x < a + b: \quad \varphi_{II}'' - \kappa^2 \varphi_{II} = 0, \quad \kappa^2 = \frac{2m}{\hbar^2}(V_0 - E)$$
$$\mapsto \varphi_{II}(x) = Ce^{+\kappa x} + De^{-\kappa x} \quad (2)$$

เชื่อมต่อฟังก์ชันคลื่นอิเล็กตรอนเข้าด้วยกัน

$$x = 0 \quad \varphi_I(0) = \varphi_{II}(0) \mapsto A + B = C + D \quad (3)$$

$$\varphi_I'(0) = \varphi_{II}'(0) \mapsto ik(A - B) = \kappa(C - D) \quad (4)$$

$$x = a \quad \varphi_I(a) = \varphi_{II}(a) \equiv e^{iK(a+b)} \varphi_{II}(-b), \quad K = \frac{2\pi}{a+b}$$
$$Ae^{ika} + Be^{-ika} = e^{iK(a+b)}(Ce^{-\kappa b} + De^{\kappa b}) \quad (5)$$

$$\varphi_I'(a) = \varphi_{II}'(a) \equiv e^{iK(a+b)} \varphi_{II}'(-b)$$
$$\mapsto ik(Ae^{ika} - Be^{-ika}) = e^{iK(a+b)} \kappa(Ce^{-\kappa b} - De^{\kappa b})$$

► แก้มการ (3,4,5,6) สำหรับ  $A, B, C, D$  โดยใช้วิธีการเมตริกซ์

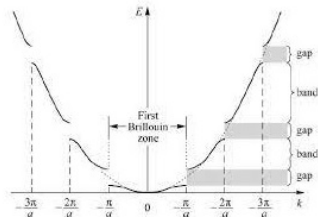
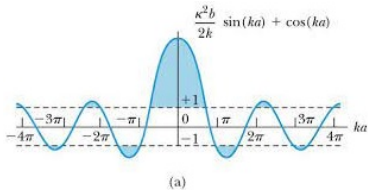
$$\underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 & -1 \\ ik & -ik & \kappa & -\kappa \\ e^{ika} & e^{-ika} & e^{iK(a+b)-\kappa b} & e^{iK(a+b)+\kappa b} \\ ike^{ika} & -ike^{-ika} & \kappa e^{iK(a+b)-\kappa b} & -\kappa e^{iK(a+b)+\kappa b} \end{pmatrix}}_M \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{pmatrix} = 0$$

เงื่อนไขของการมีคำตอบ คือ  $\det[M] = 0$  นั่นคือ

$$\begin{aligned} \cos[K(a+b)] &= \cos(ka) \cosh(\kappa b) + \frac{(\kappa^2 - k^2)}{2k\kappa} \sin(ka) \sinh(\kappa b) \\ \xrightarrow{b \rightarrow 0, \kappa \gg k} &\simeq \cos(ka) + \frac{\kappa^2 b}{2k} \sin(ka) \end{aligned} \quad (8)$$



▶ กราฟในกรณี  $b \rightarrow 0, \kappa \gg k$



จะพบการเกิดแถบพลังงานของอิเล็กตรอน (energy band)  
และมีช่องว่าง ระหว่างแถบพลังงาน (band gap)

# สารกึ่งตัวนำ

- ▶ กลุ่มอะตอมที่มีผลผลิตเชิงที่มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ

IIB	IIIA	IVA	VA	VIA
			<sup>7</sup> N Nitrogen	<sup>8</sup> O Oxygen
	<sup>13</sup> Al Aluminum	<sup>14</sup> Si Silicon	<sup>15</sup> P Phosphorus	<sup>16</sup> S Sulfur
<sup>30</sup> Zn Zinc	<sup>31</sup> Ga Gallium	<sup>32</sup> Ge Germanium	<sup>33</sup> As Arsenic	<sup>34</sup> Se Selenium
<sup>48</sup> Cd Cadmium	<sup>49</sup> In Indium		<sup>51</sup> Sb Antimony	<sup>52</sup> Te Tellurium
<sup>80</sup> Hg Mercury				

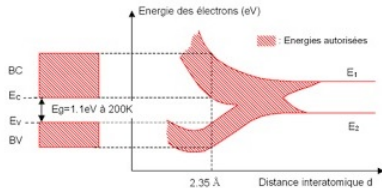
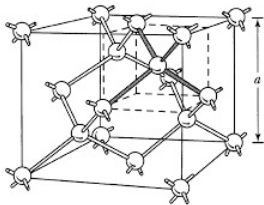
- ▶ กลุ่ม IVA - Si, Ge
- ▶ กลุ่ม IIIA-VA - GaAs InSb
- ▶ กลุ่ม IIA-VIA - ZnSe, CdTe

## ▶ คุณสมบัติทางไฟฟ้า

<i>Material</i>	<i>Band Gap (eV)</i>	<i>Electrical Conductivity [<math>(\Omega\text{-m})^{-1}</math>]</i>	<i>Electron Mobility (<math>\text{m}^2/\text{V}\cdot\text{s}</math>)</i>	<i>Hole Mobility (<math>\text{m}^2/\text{V}\cdot\text{s}</math>)</i>
<b>Elemental</b>				
Si	1.11	$4 \times 10^{-4}$	0.14	0.05
Ge	0.67	2.2	0.38	0.18
<b>III-V Compounds</b>				
GaP	2.25	—	0.03	0.015
GaAs	1.42	$10^{-6}$	0.85	0.04
InSb	0.17	$2 \times 10^4$	7.7	0.07
<b>II-VI Compounds</b>				
CdS	2.40	—	0.03	—
ZnTe	2.26	—	0.03	0.01

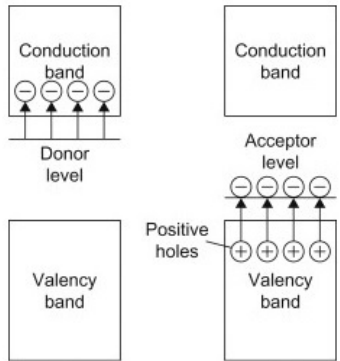
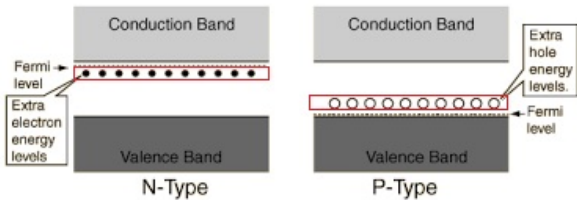
# อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

- ▶ พิจารณาจาก Si เป็นหลัก

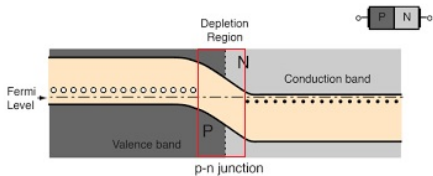


- ▶ Doping คือการเติมสารเจือปน (impurity) เพื่อเพิ่มจำนวนประจุในการนำไฟฟ้า
  - ▶ n-doped เพิ่มประจุลบ (electron)
  - ▶ p-doped เพิ่มประจุบวก (hole)

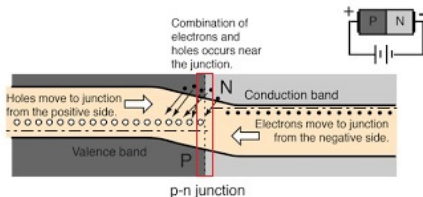
► มุมมองการ doping จากแถบพลังงาน



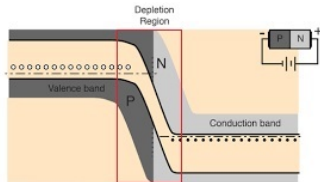
► Unipolar-junction device (Diode) มุมมองจากแถบพลังงาน



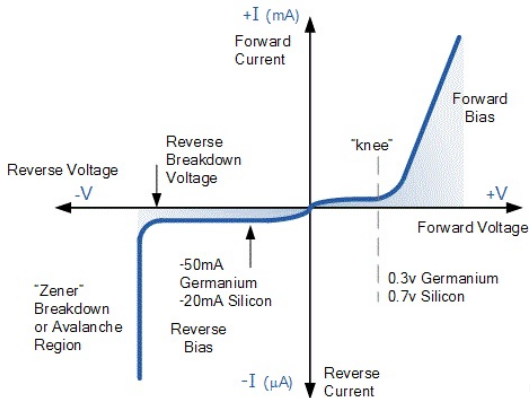
► Forward bias



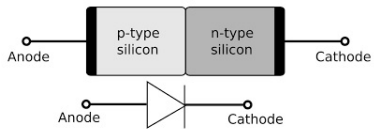
► Reverse bias



► I-V characteristic

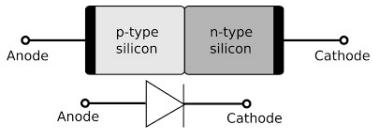


## ▶ Diode symbol

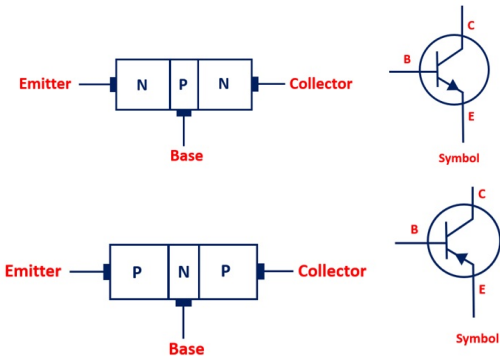




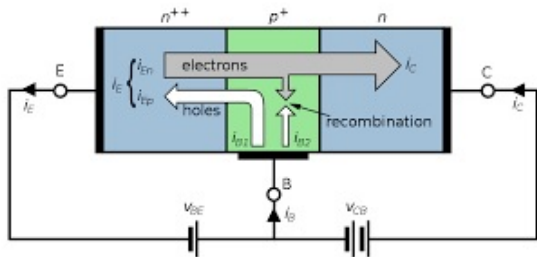
► Diode symbol



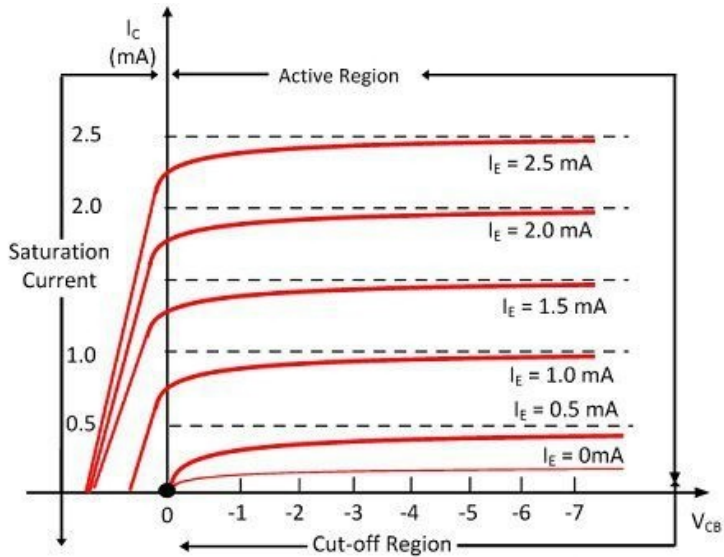
► Bipolar-junction devices



► Bipolar-junction device I-V characteristic (npn)



► IV-characteristic curve



- ▶ The first transistor was invented in 1947 by John Bardeen, William Shockley, and Walter Brattain

