

Chương 2

Dải năng lượng và nồng độ hạt dẫn ở cân bằng nhiệt

Nội dung

1. Vật liệu bán dẫn
2. Cấu trúc tinh thể cơ bản
3. Liên kết hóa trị
4. Dải năng lượng
5. Nồng độ hạt dẫn nội tại
6. Các chất donor và acceptor.
7. Nồng độ hạt dẫn trong bán dẫn loại N và P

2.1 Vật liệu bán dẫn

Control of Conductivity is the Key to Modern Electronic Devices

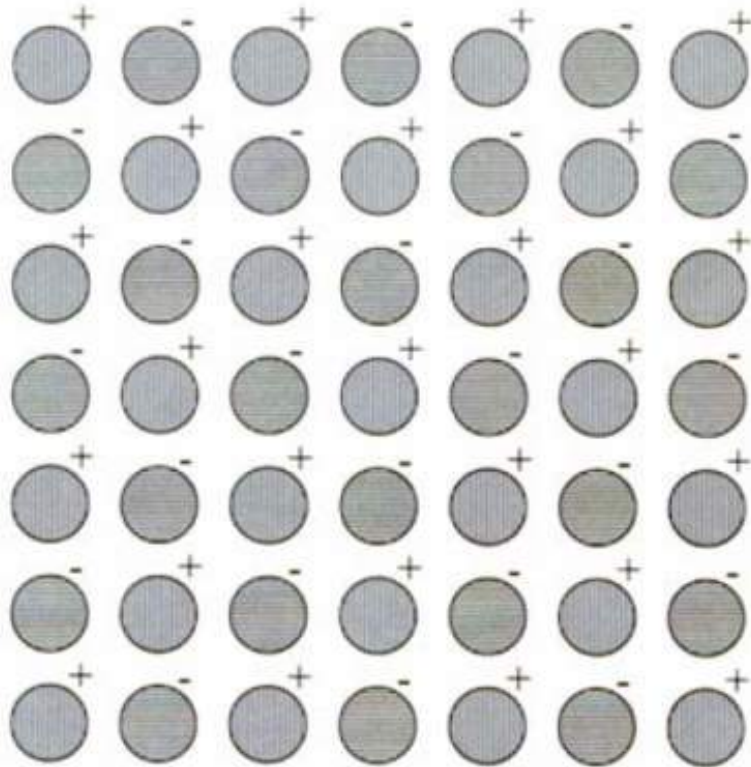
- Conductivity, σ , is the ease with which a given material conducts electricity.
- Ohms Law: $V=IR$ or $J=\sigma E$ where J is current density and E is electric field.
 - Metals: High conductivity
 - Insulators: Low Conductivity
 - Semiconductors: Conductivity can be varied by several orders of magnitude.
- It is the ability to control conductivity that make semiconductors useful as “current/voltage control elements”. “Current/Voltage control” is the key to switches (digital logic including microprocessors etc...), amplifiers, LEDs, LASERs, photodetectors, etc...

Classifications of Electronic Materials

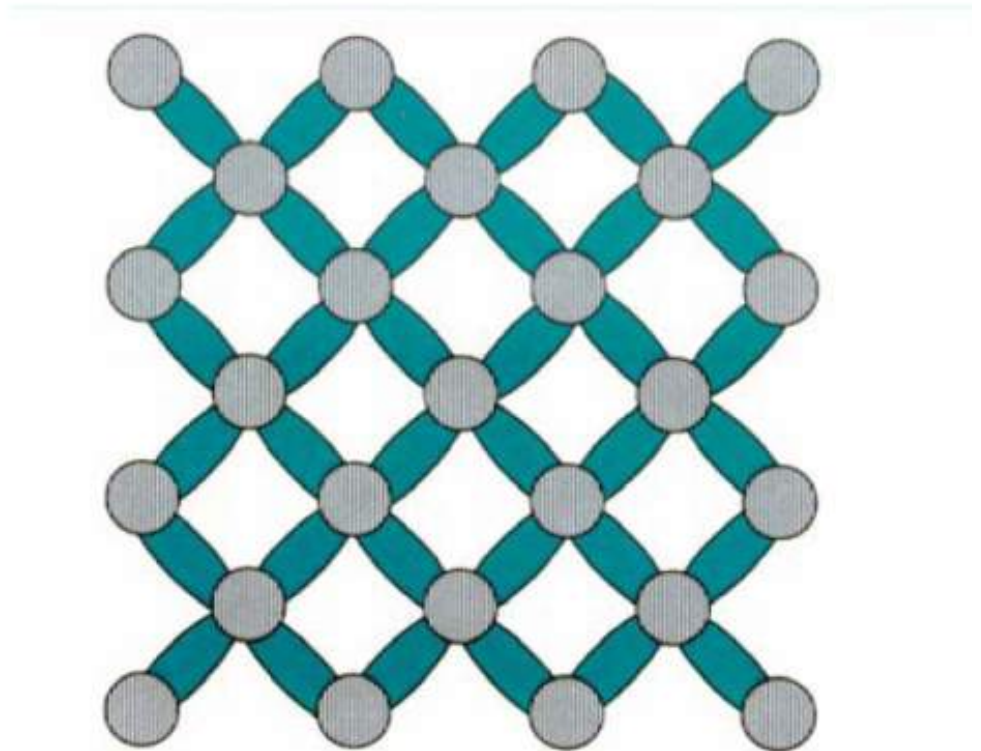
- Electrical/Computer engineers like to classify materials based on electrical behavior (insulating, semi-insulating, and metals).
- Materials Engineers/Scientists classify materials based on bond type (covalent, ionic, metallic, or van der Waals), or structure (crystalline, polycrystalline, amorphous, etc...).
- In 20-50 years, EE's may not be using semiconductors at all!! Polymers or bio-electronics may replace them! However the materials science will be the same!

Material Classifications based on Bonding Method

- Bonds can be classified as metallic, Ionic, Covalent, and van der Waals.

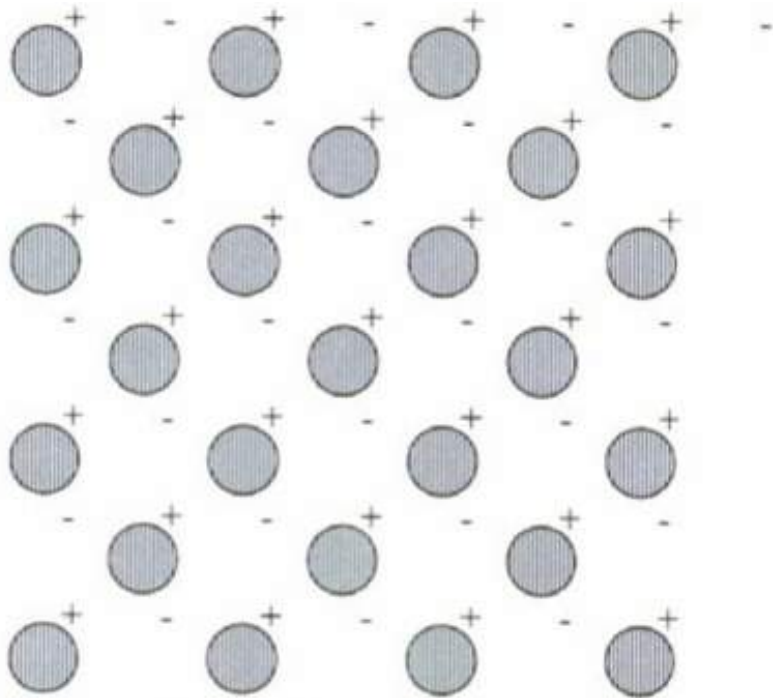


Ionic Bonding: One atom acquires and holds the electron(s) of an adjacent atom. Bonding is coulombic and strong.

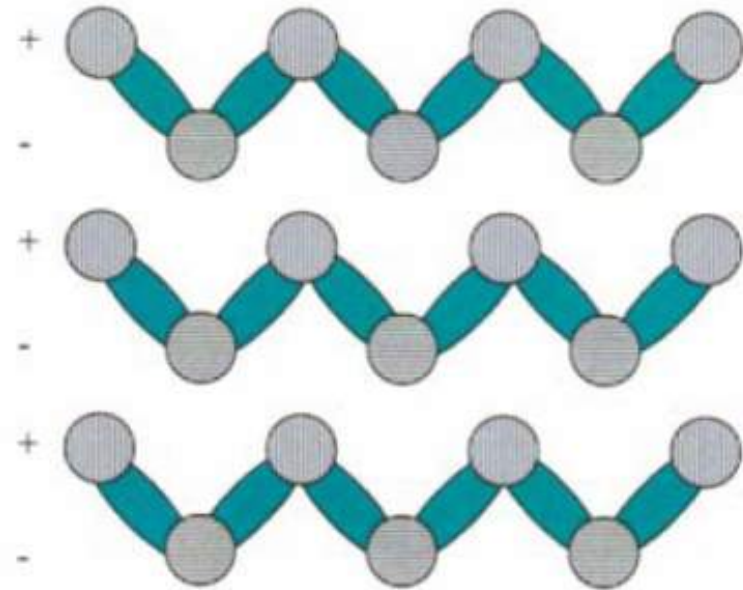


Covalent Bonding: Atoms share electrons with the surrounding atoms. Bonding is moderately weak.

Material Classifications based on Bonding Method



Metallic Bonding: Atoms give up electrons to the surrounding regions, forming an “electron cloud”. Bonding is coulombic but weak due to screening of charge.



Van der Waals Bonding: Neutrally charged molecules form dipoles which are attracted to other dipoles. Bonding is extremely weak, but long chains can form.

Phân loại vật liệu dựa trên cấu trúc tinh thể

□ *Amorphous Materials (Vật liệu vô định hình)*

Các nguyên tử không có trật tự như cấu trúc tinh thể. TD: SiO_2 , Si vô định hình, Si_3N_4 , ... Mặc dù không hoàn chỉnh như vật liệu tinh thể, lớp vật liệu này cũng rất hữu dụng.

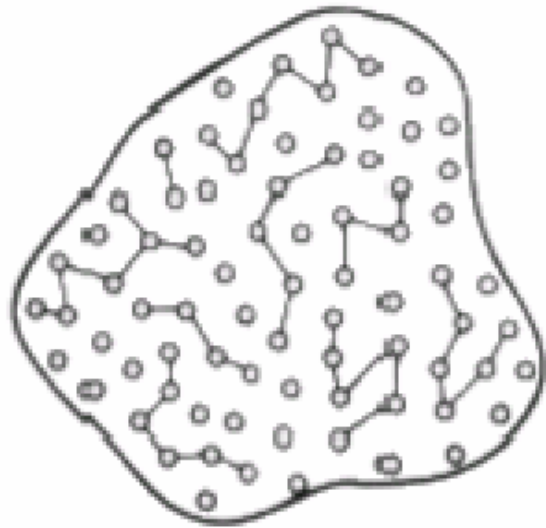
□ *Crystalline Materials (Vật liệu [đơn] tinh thể)*

Được đặc trưng bởi đối xứng nguyên tử lặp lại trong không gian. Dạng của tế bào đơn vị phụ thuộc vào sự liên kết của vật liệu. Các Cấu trúc tế bào đơn vị thông dụng nhất là kim cương, zincblende (một dẫn xuất của cấu trúc kim cương), hexagonal, và muối đá (lập phương đơn giản).

□ *Polycrystalline Materials (Vật liệu đa tinh thể)*

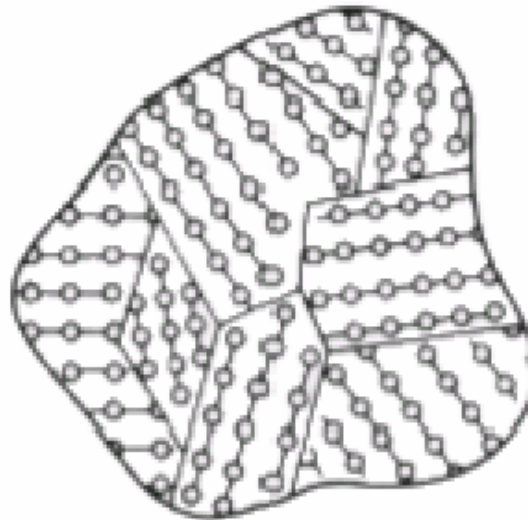
Gồm nhiều miền vật liệu tinh thể. Mỗi miền được định hướng khác với các miền khác. Tuy nhiên trong mỗi miền, vật liệu là tinh thể. Kích thước mỗi miền có thể vài nm^3 đến nhiều cm^3 .

Phân loại vật liệu dựa trên cấu trúc tinh thể



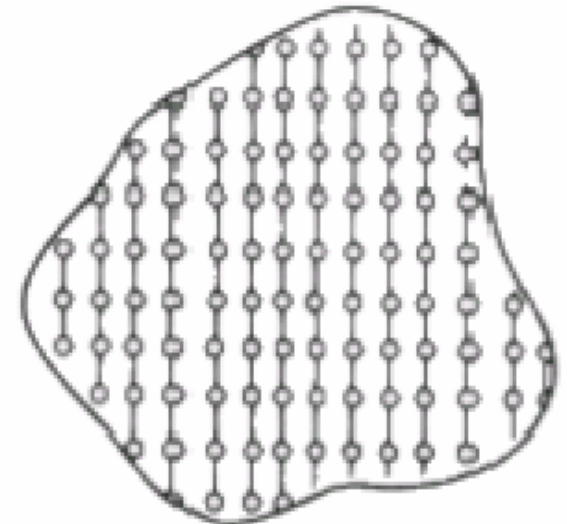
(a) Amorphous

No recognizable
long-range order



(b) Polycrystalline

Completely ordered
in segments

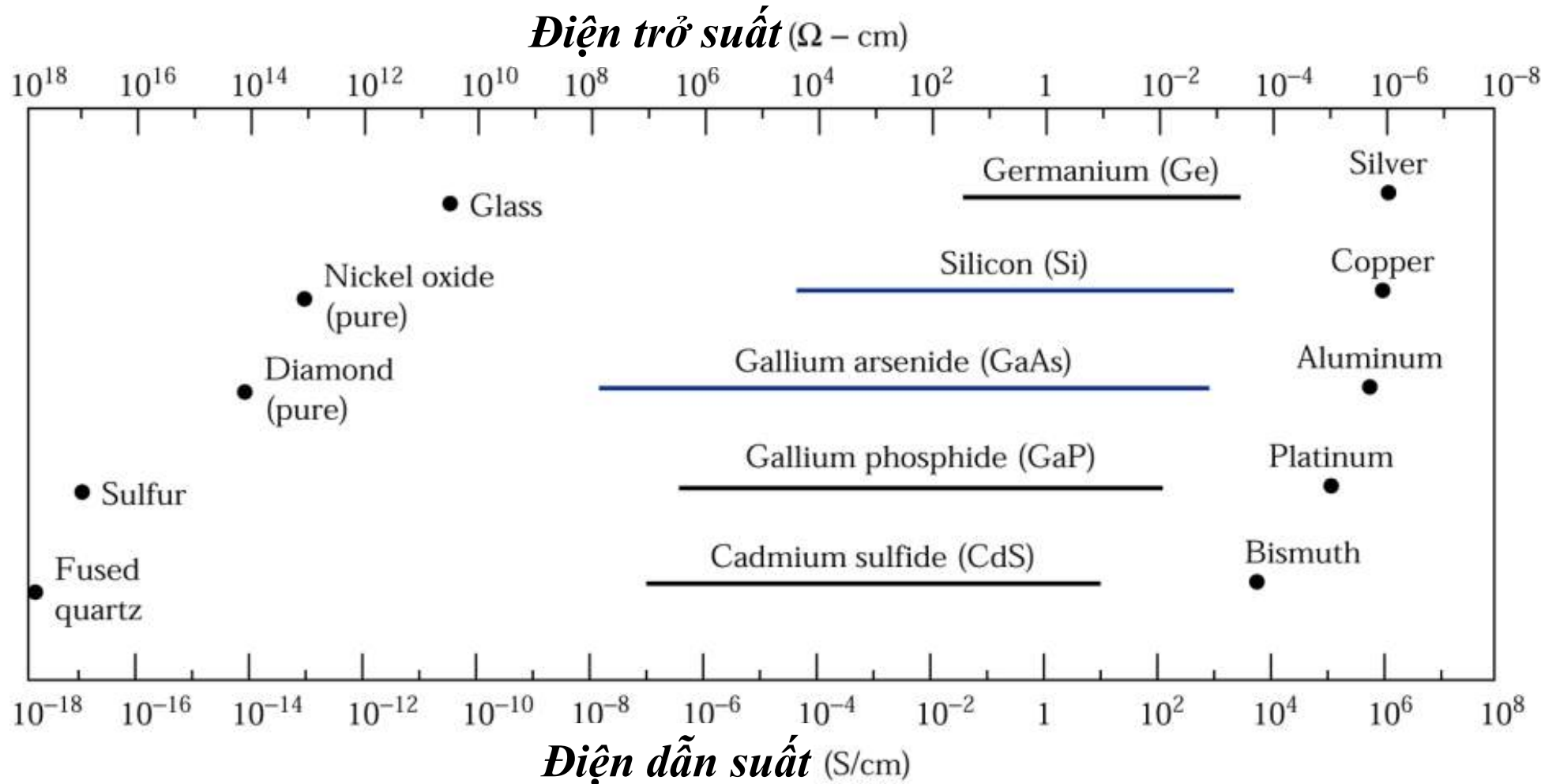


(c) Crystalline

Entire solid is made up of
atoms in an orderly array

General classification of solids based on the degree of atomic order: (a) amorphous, (b) polycrystalline, and (c) crystalline.

Điện dẫn suất và điện trở suất của chất cách điện, bán dẫn và dẫn điện



Element Semiconductors (Các chất bán dẫn nguyên tố)

Bảng phân loại tuần hoàn của vật liệu bán dẫn

Period	Column II	III	IV	V	VI
2		B Boron	C Carbon	N Nitrogen	O Oxygen
3	Mg Magnesium	Al Aluminum	Si Silicon	P Phosphorus	S Sulfur
4	Zn Zinc	Ga Gallium	Ge Germanium	As Arsenic	Se Selenium
5	Cd Cadmium	In Indium	Sn Tin	Sb Antimony	Te Tellurium
6	Hg Mercury		Pb Lead		

Compound Semiconductors

(Các chất bán dẫn hỗn hợp)

[Hợp chất bán dẫn]

- Những năm gần đây người ta sử dụng nhiều các chất bán dẫn hỗn hợp trong nhiều loại dụng cụ bán dẫn.
- Có các chất bán dẫn hỗn hợp từ 2 nguyên tố (nhị hợp), 3 nguyên tố (tam hợp) và 4 nguyên tố (tứ hợp).
- Nhiều chất bán dẫn có các tính chất điện và quang khác với Silicon. Đặc biệt là GaAs được dùng làm vật liệu chính để chế tạo các dụng cụ trong các ứng dụng quang điện tử và chuyển mạch tốc độ cao

Các chất bán dẫn nguyên tố và hỗn hợp

TABLE 2 Semiconductor Materials²

General Classification	Semiconductor	
	Symbol	Name
Element	Si	Silicon
	Ge	Germanium
Binary compound		
IV-IV - - - - -	SiC	Silicon carbide
III-V - - - - -	AlP	Aluminum phosphide
	AlAs	Aluminum arsenide
	AlSb	Aluminum antimonide
	GaN	Gallium nitride
	GaP	Gallium phosphide
	GaAs	Gallium arsenide
	GaSb	Gallium antimonide
	InP	Indium phosphide
	InAs	Indium arsenide
	InSb	Indium antimonide
- - - - -	- - -	- - -

Các chất bán dẫn nguyên tố và hỗn hợp (tt)

II-VI -----	ZnO	Zinc oxide
	ZnS	Zinc sulfide
	ZnSe	Zinc selenide
	ZnTe	Zinc telluride
	CdS	Cadmium sulfide
	CdSe	Cadmium selenide
	CdTe	Cadmium telluride
	HgS	Mercury sulfide
	PbS	Lead sulfide
	PbSe	Lead selenide
IV-VI -----	PbTe	Lead telluride
	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	Aluminum gallium arsenide
	$\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$	Aluminum indium arsenide
Ternary compound	$\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$	Gallium arsenic phosphide
	$\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$	Gallium indium arsenide
	$\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$	Gallium indium phosphide
	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$	Aluminum gallium arsenic antimonide
Quaternary compound	$\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{P}_y$	Gallium indium arsenic phosphide

2.2 Cấu trúc tinh thể cơ bản

Khái niệm mạng và tế bào đơn vị

- Ta sẽ nghiên cứu vật liệu bán dẫn đơn tinh thể, mà trong đó các nguyên tử được sắp xếp tuần hoàn trong không gian. Sự sắp xếp tuần hoàn của các nguyên tử trong tinh thể được gọi là *mạng (lattice)*.
- Trong tinh thể, nguyên tử sẽ dao động (do nhiệt) quanh 1 vị trí cố định.
- Với bán dẫn cho trước, có *tế bào đơn vị (unit cell)* đại diện cho toàn bộ mạng [tinh thể]; bằng cách lặp lại tế bào đơn vị trong tinh thể ta có toàn bộ mạng tinh thể.

Tế bào đơn vị

- Tế bào đơn vị có thể được đặc trưng bằng vector $\mathbf{R}$ (được tạo thành từ các vector $\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$, $\mathbf{c}$ [các vector này không nhất thiết phải vuông góc với nhau và chiều dài của chúng có thể bằng hay không bằng nhau] và các số nguyên m , n và p)

$$\mathbf{R} = m\mathbf{a} + n\mathbf{b} + p\mathbf{c}$$

- Các vector $\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$, và $\mathbf{c}$ được gọi là các *hằng số mạng (lattice constants)*.

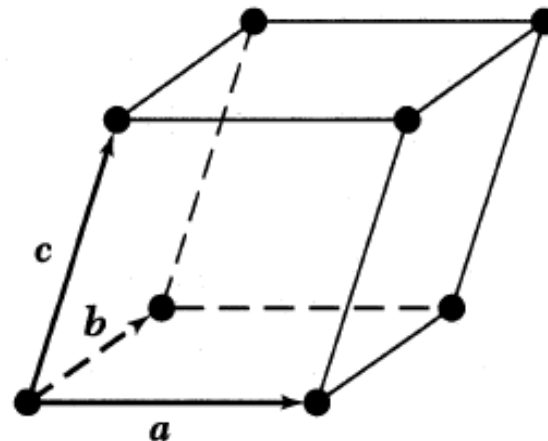


Fig. 2 A generalized primitive unit cell.

Một số tế bào đơn vị tinh thể lập phương cơ bản

- Các tế bào đơn vị khác nhau dựa trên các tế bào đơn vị lập phương: tế bào đơn vị lập phương đơn giản (SC), tế bào đơn vị lập phương tập trung bên trong (BCC), và tế bào đơn vị lập phương tập trung bề mặt (FCC)

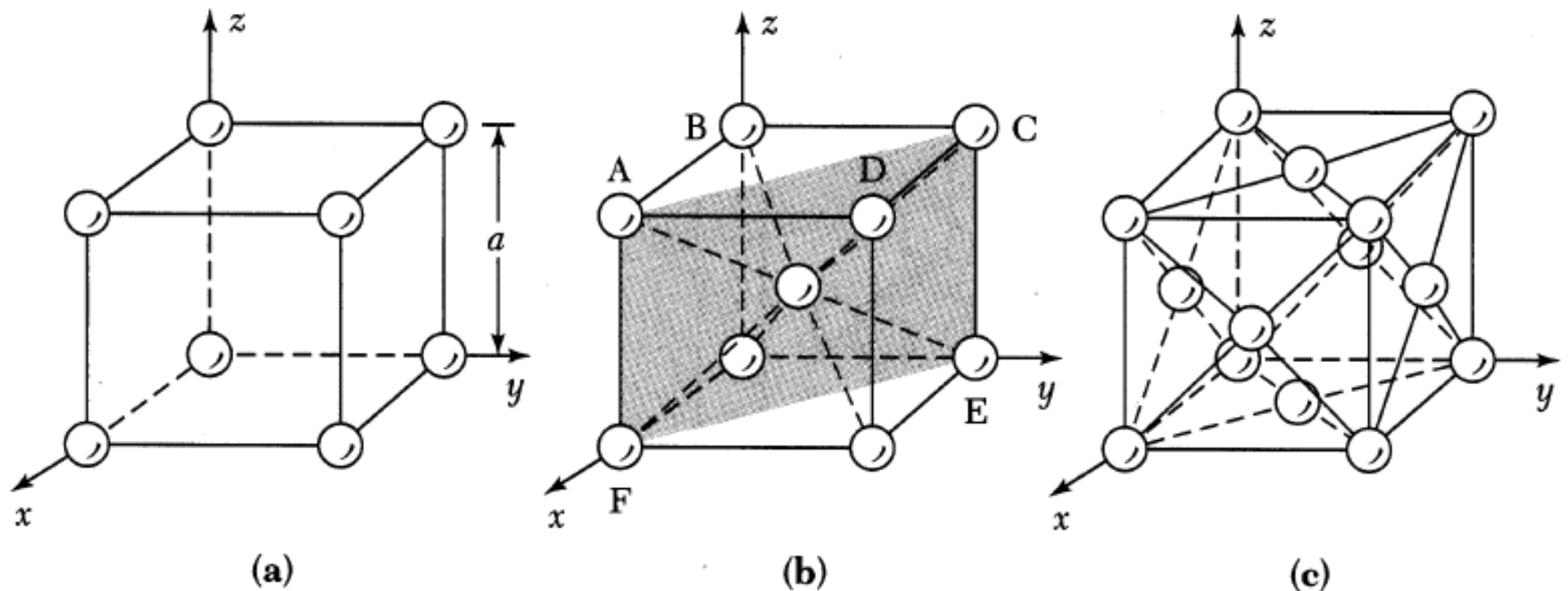
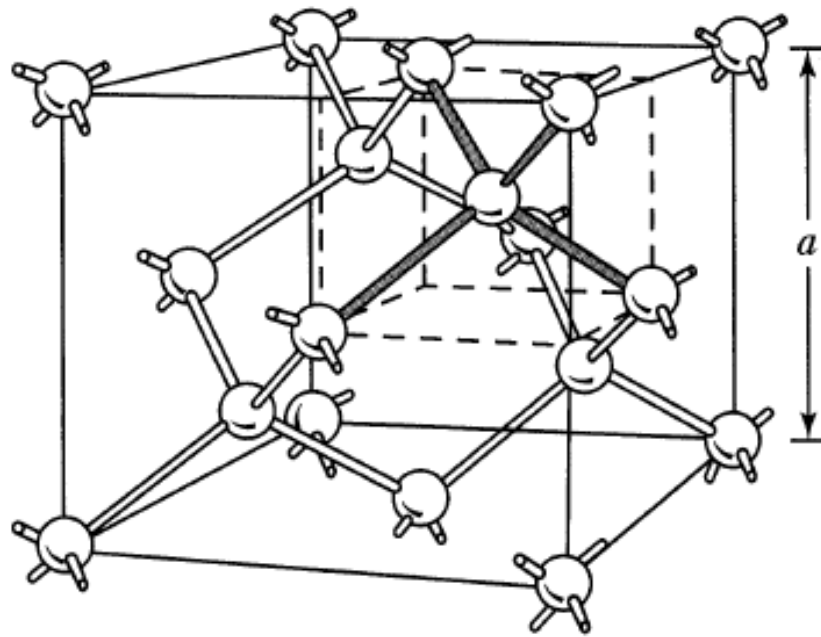


Fig. 3 Three cubic-crystal unit cells. (a) Simple cubic. (b) Body-centered cubic. (c) Face-centered cubic.

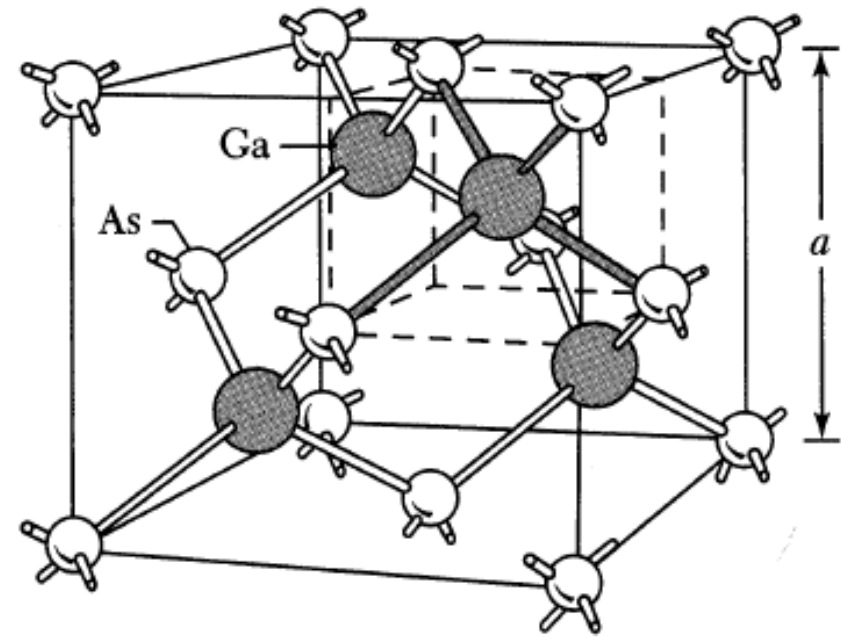
Cấu trúc mạng tinh thể kim cương

- ❑ Silicon và germanium có một cấu trúc tinh thể kim cương.
- ❑ Cấu trúc silicon thuộc về lớp những tế bào đơn vị lập phương tập trung bề mặt. Tế bào đơn vị silicon gồm có tám nguyên tử silicon.
- ❑ Cấu trúc có thể được nhìn thấy như hai mạng tinh thể con (bề mặt) thâm nhập nhau với một mạng con được đổi chỗ bởi một mạng con khác bằng $\frac{1}{4}$ khoảng cách dọc theo đường chéo bên trong khối lập phương
- ❑ Hầu hết những chất bán dẫn III/V tăng trưởng theo mạng tinh thể zincblende, mà đồng nhất với một mạng tinh thể kim cương chỉ có điều một trong số những mạng tinh thể con tế bào lập phương tập trung bề mặt có nguyên tử gallium (Ga) và những nguyên tử arsenic (As) khác.

Cấu trúc mạng tinh thể kim cương (tt)



(a)

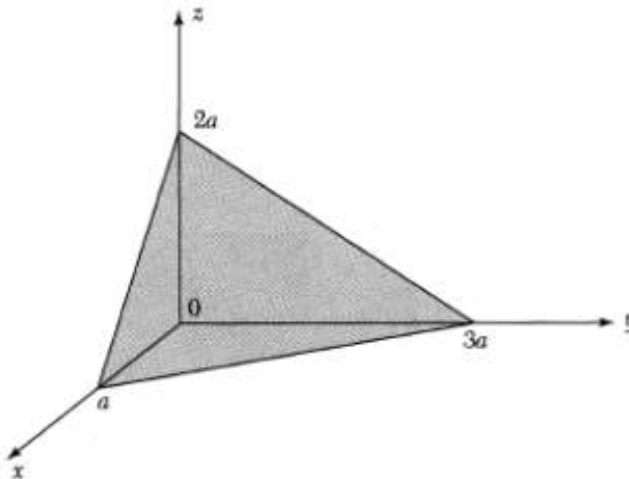


(b)

Fig. 4 (a) Diamond lattice. (b) Zincblende lattice.

Các mặt phẳng tinh thể và chỉ số Miller

- Các tính chất tinh thể theo những mặt phẳng khác nhau thì khác nhau và những tính chất điện, nhiệt, và cơ có thể phụ thuộc vào hướng tinh thể.
- Các **chỉ số [Miller]** dùng để định nghĩa những mặt phẳng trong tinh thể.
- **Thí dụ:** Xác định mặt phẳng tinh thể
Mặt phẳng giao với các trục tọa độ tại a , $3a$, và $2a$. Lấy nghịch đảo của các tọa độ này ta được 1 , $1/3$ và $1/2$. Ba số nguyên nhỏ nhất có các tỉ số 6 , 2 và 3 . Như vậy mặt phẳng này có thể được xem như mặt phẳng (623) .



Các mặt phẳng tinh thể và chỉ số Miller (tt)

Các qui ước định nghĩa chỉ số Miller:

- (hkl) : một mặt phẳng
- $[hkl]$: hướng tinh thể là điểm trong mạng tinh thể gần gốc tọa độ nhất theo hướng mong muốn.
- $\{hkl\}$: họ các mặt phẳng tương đương đối xứng

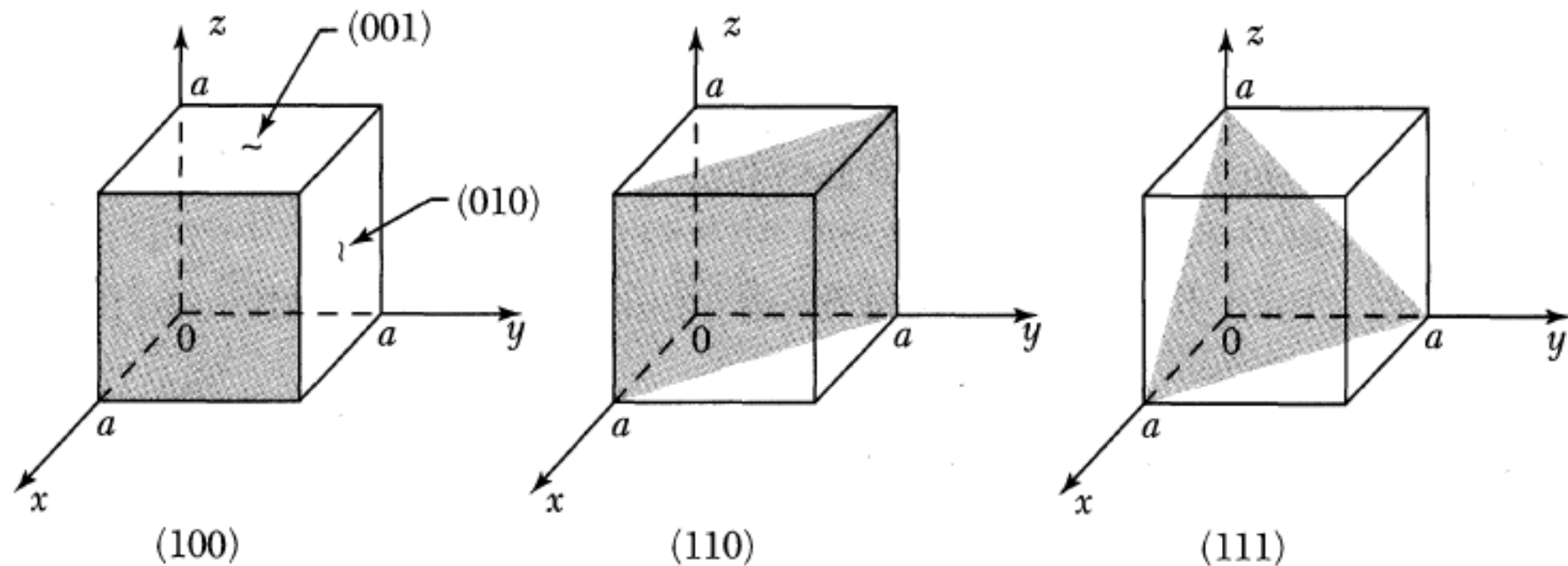
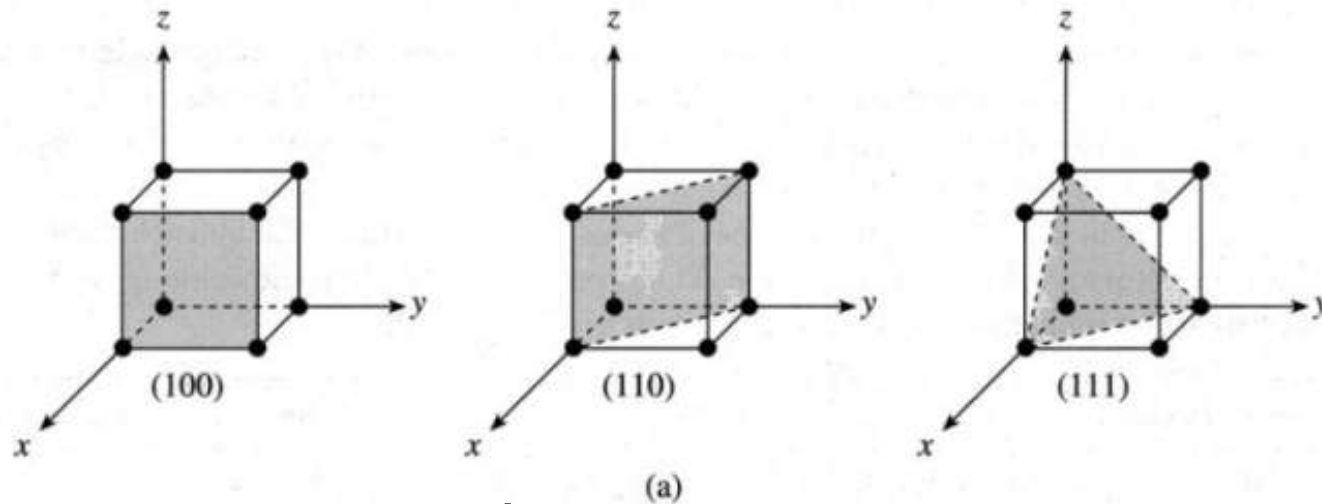


Fig. 6 Miller indices of some important planes in a cubic crystal.

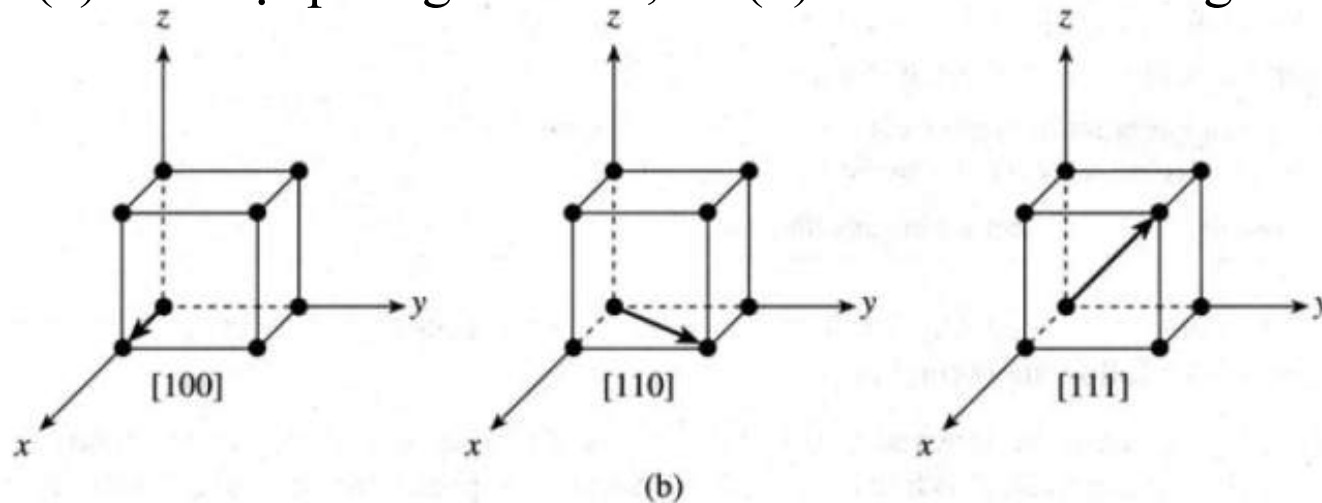
Các mặt phẳng tinh thể và chỉ số Miller (tt)

- Khi có tọa độ âm thì ghi số dương tương ứng và có đường gạch trên con số, thí dụ hướng tinh thể có tọa độ $-1, -1, 1$ thì người ta ghi là $[\bar{1}\bar{1}1]$



Các chỉ số Miller thường gặp:

(a) các mặt phẳng tinh thể, và (b) các vector hướng



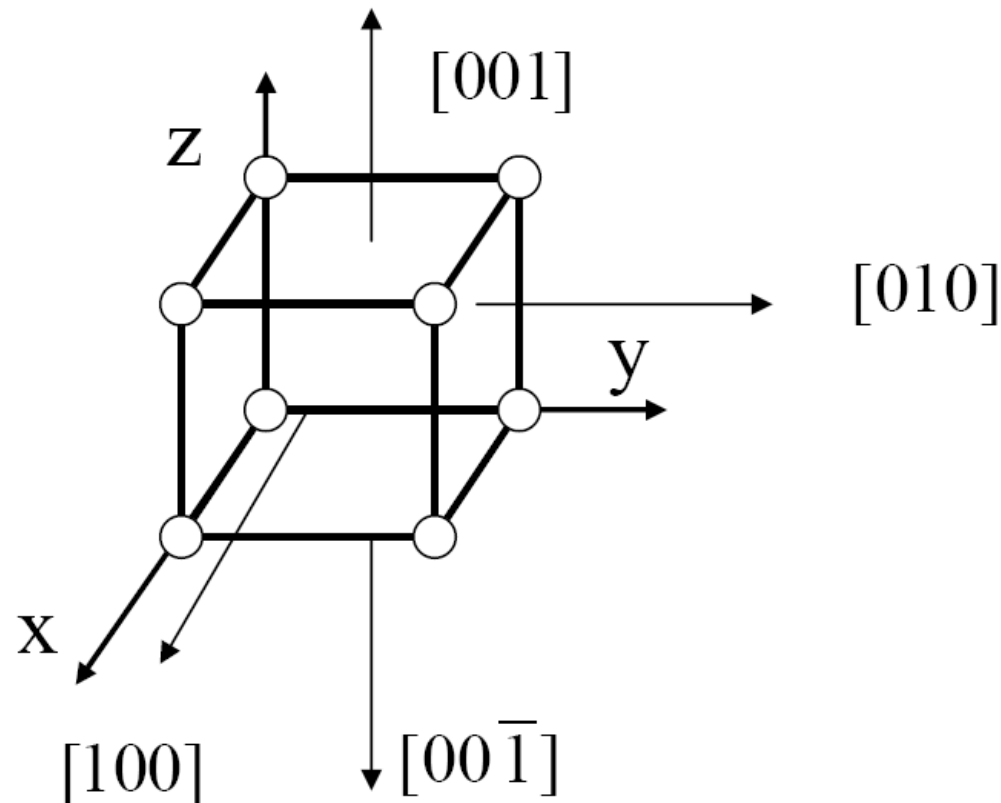
Các mặt phẳng tinh thể và chỉ số Miller (tt)

Trong các mạng tinh thể lập phương, hướng $[hkl]$ vuông góc với mặt phẳng (hkl) .

Thí dụ: họ mặt phẳng $\{100\}$ là:

$$\{100\} = (100), (010), (001), (\bar{1}00), (0\bar{1}0), (00\bar{1})$$

□ Thí dụ một số hướng tinh thể



2.3 Kỹ thuật tăng trưởng tình thế cơ bản

- Tự đọc thêm trong sách

2.4 Các liên kết hóa trị (Valence bonds)

Liên kết đồng hóa trị và liên kết ion

Trong các dụng cụ bán dẫn có thể gặp các liên kết sau:

- Liên kết đồng hóa trị (covalent bonding)
- Liên kết ion (ionic bonding)

Trong bán dẫn nguyên tố dùng các liên kết đồng hóa trị; còn trong bán dẫn hỗn hợp thì sử dụng cả liên kết đồng hóa trị và liên kết ion.

The periodic table

1A	2A								8A
Li	Be								He
Na	Mg		3A	4A	5A	6A	7A		Ne
K	Ca		Al	Si	P	S	Cl		Ar
Rb	Sr	2B	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Cs	Ba		Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Fr	Rd		Hg	Ti	Pb	Bi	Po	At	Rn

Groups 3B,4B,5B,6B
7B,8B,1B lie in here

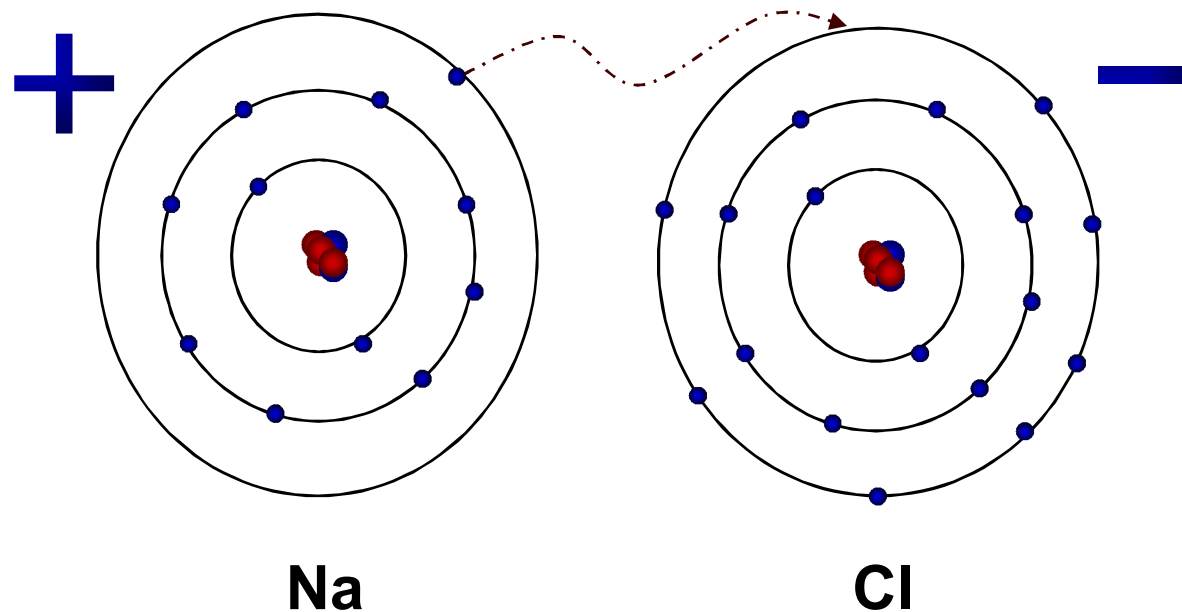
A section of the periodic table

Liên kết ion (Ionic bonding)

- Liên kết ion do *lực hút tĩnh điện giữa các ion tích điện dương và âm* (giữa 1A và 7A).
- Quá trình này dẫn đến chuyển điện tử và tạo thành các ion có tích điện; ion tích điện dương do nguyên tử mất điện tử và ion tích điện âm do nguyên tử có thêm điện tử.
- Tất cả các hỗn hợp ion là chất rắn đơn tinh thể ở nhiệt độ phòng.
- NaCl và CsCl là các thí dụ tiêu biểu cho liên kết ion.
- Các tinh thể ion thì có điểm nóng chảy cao, rắn giòn và có thể hòa tan được trong các chất lỏng thông thường.

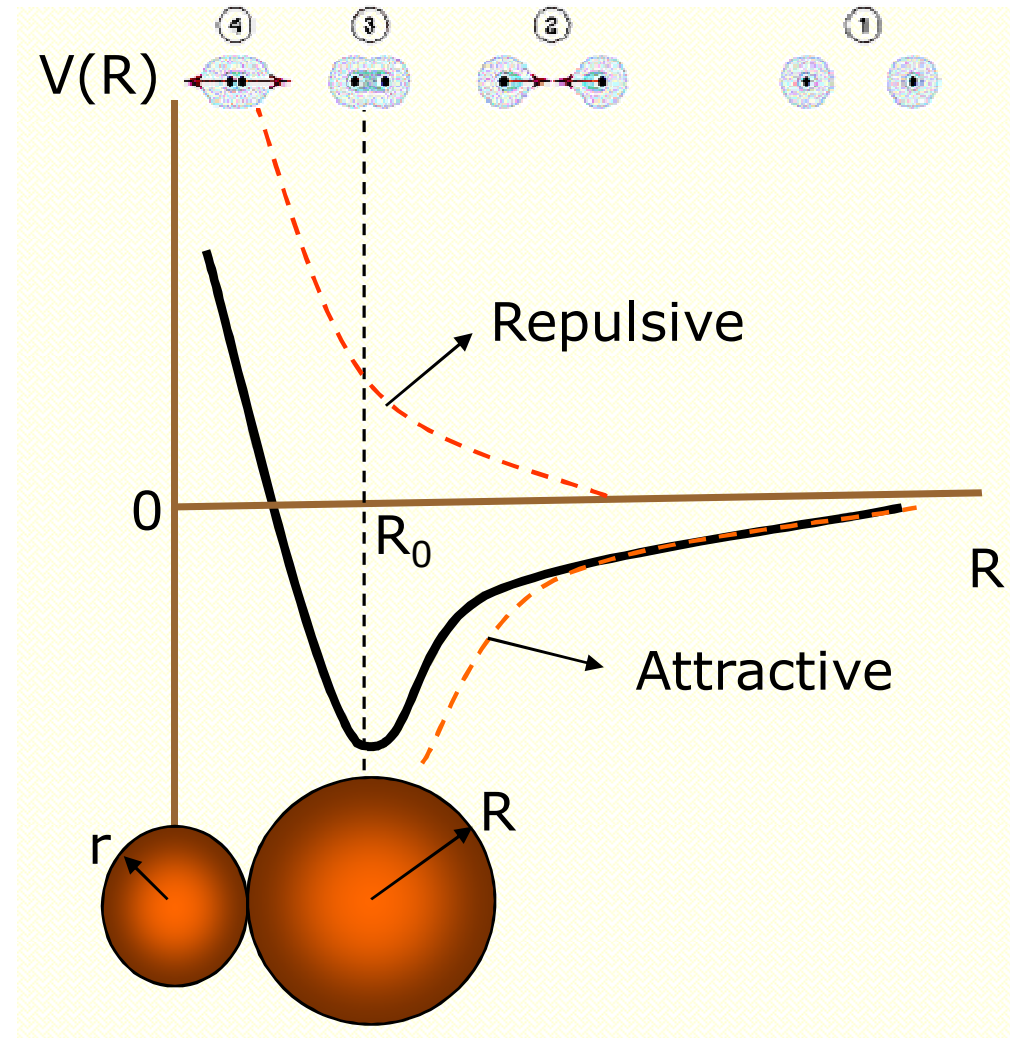
Ionic bonding

The metallic elements have only up to the valence electrons in their outer shell will lose their electrons and become positive ions, whereas electronegative elements tend to acquire additional electrons to complete their octet and become negative ions, or anions.



Ionic bonding

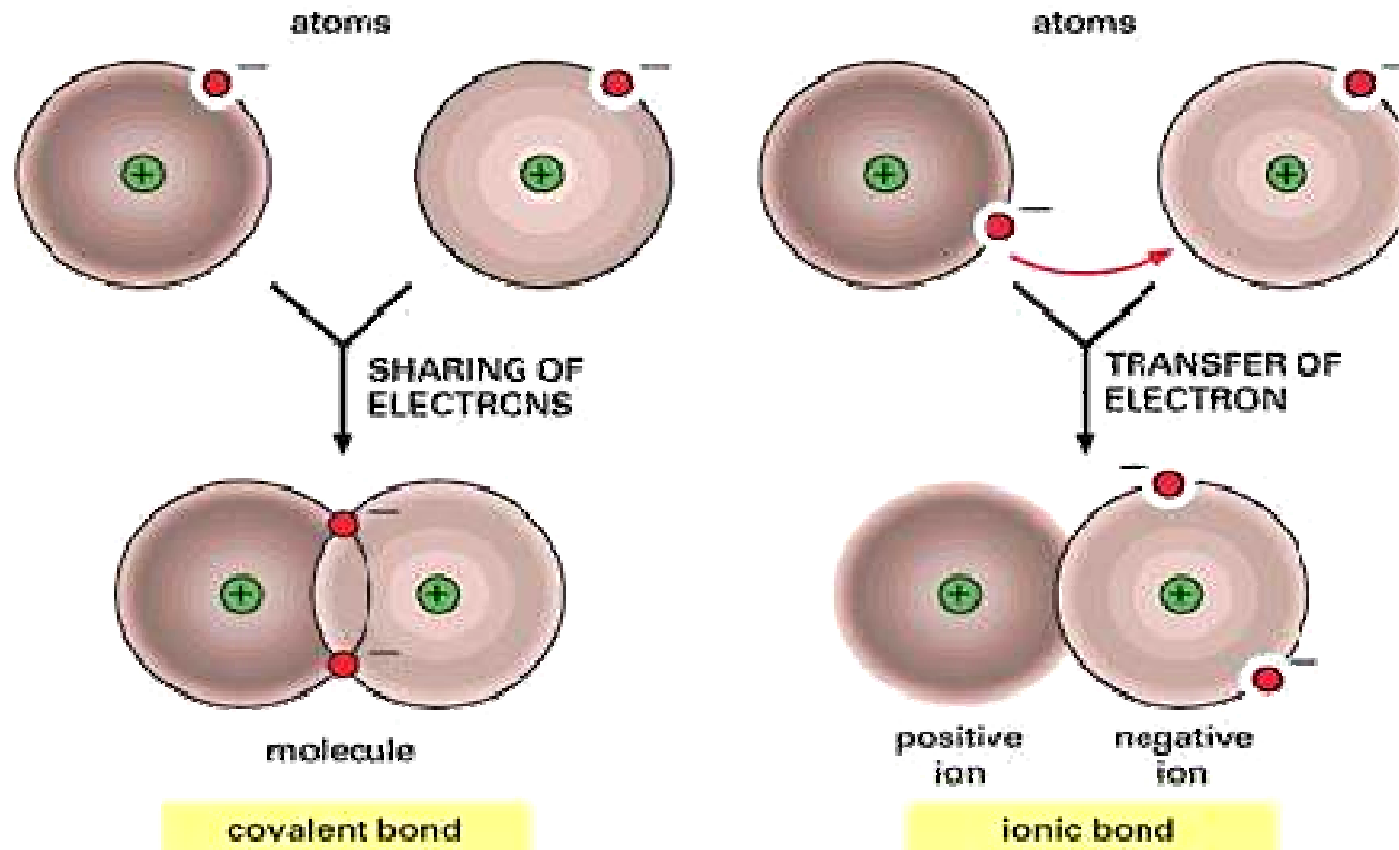
- This typical curve has a minimum at equilibrium distance R_0
- $R > R_0$;
 - the potential increases gradually, approaching 0 as $R \rightarrow \infty$
 - the force is attractive
- $R < R_0$;
 - the potential increases very rapidly, approaching ∞ at small radius.
 - the force is repulsive



Liên kết đồng hóa trị (Covalent bonding)

- Các chất bán dẫn nguyên tố Si, Ge và kim cương được liên kết bằng cơ chế này và chúng thuần đồng hóa trị.
- Liên kết này là do dùng chung các điện tử. (mỗi cặp điện tử tạo nên liên kết đồng hóa trị)
- Các chất rắn có liên kết đồng hóa trị thì có điểm nóng chảy cao, rắn và không hòa tan trong các chất lỏng thông thường.
- Các bán dẫn hỗn hợp sử dụng cả các liên kết đồng hóa trị và liên kết ion.

Comparison of Ionic and Covalent Bonding



Thí dụ liên kết đồng hóa trị với các chất có 4 điện tử hóa trị

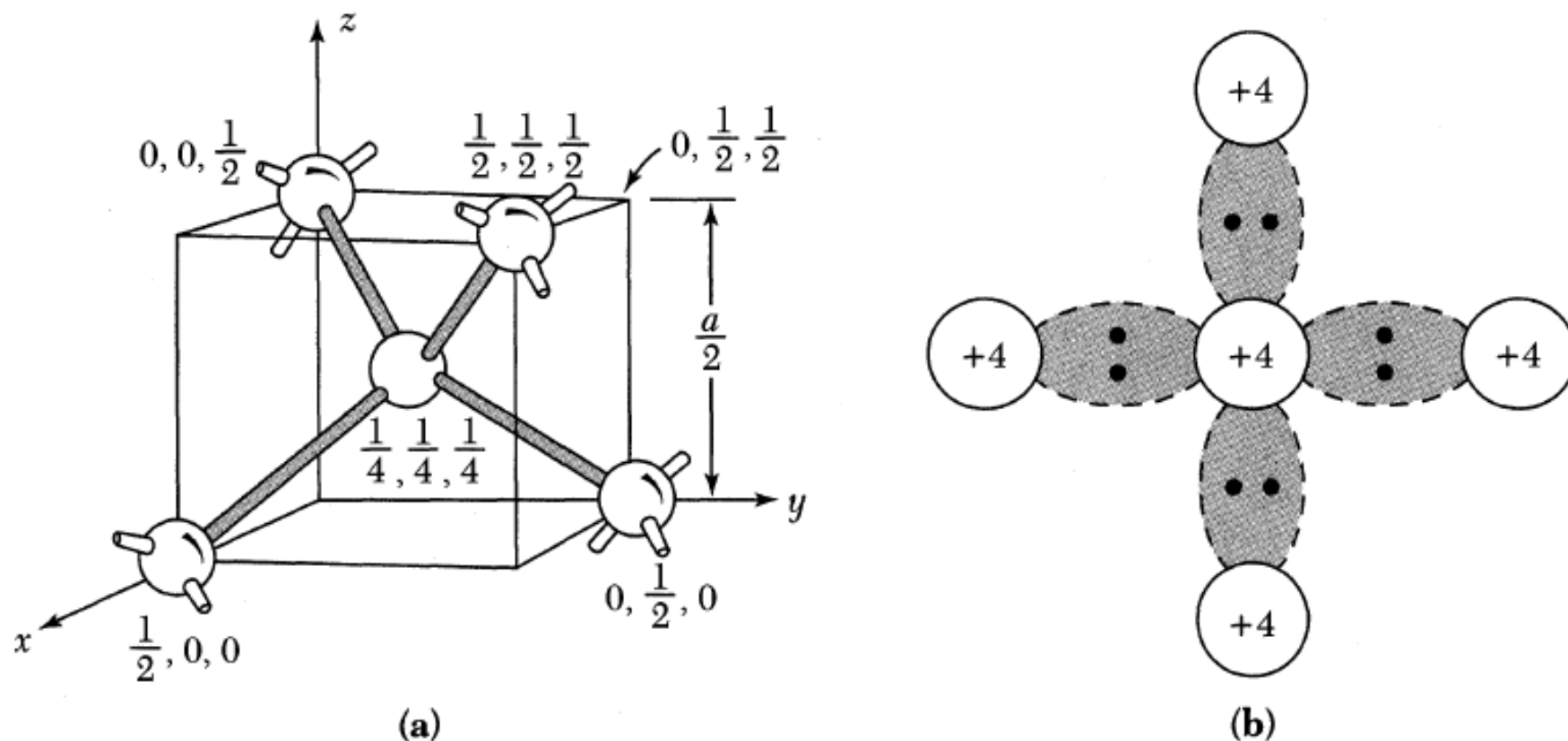


Fig. 11 (a) A tetrahedron bond. (b) Schematic two-dimensional representation of a tetrahedron bond.

- Ở nhiệt độ thấp các điện tử được ràng buộc theo mạng tinh thể tứ diện tương ứng.
- Khi nhiệt độ cao hơn thì các dao động nhiệt sẽ làm gãy các liên kết đồng hóa trị.

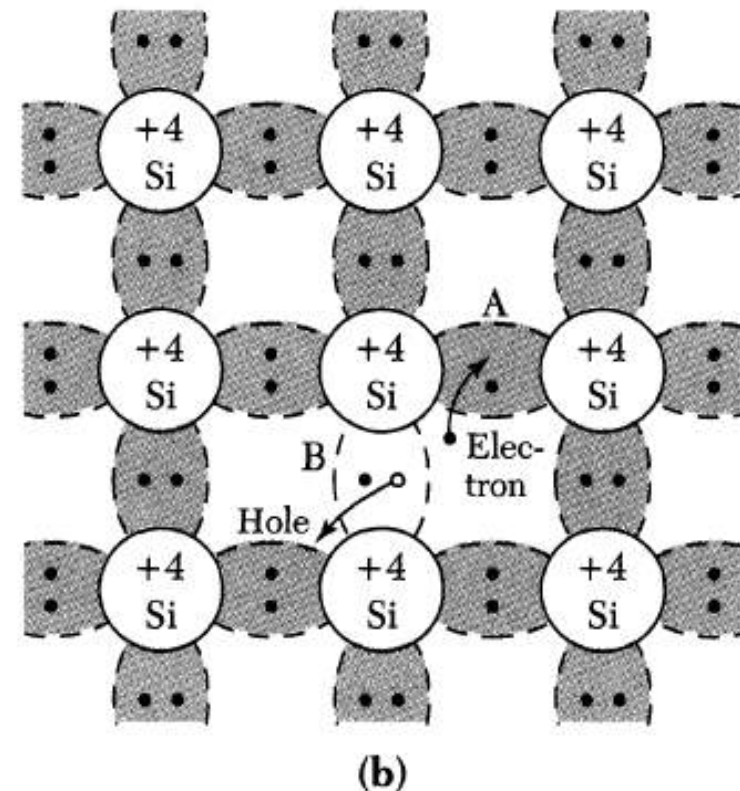
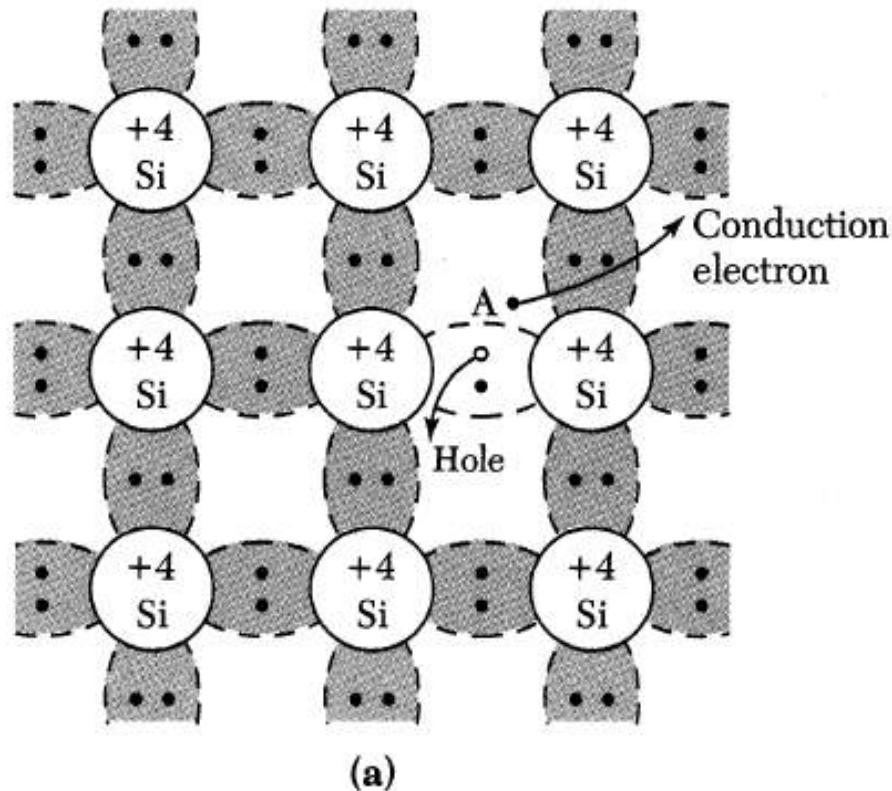


Fig. 12 The basic bond representation of intrinsic silicon. (a) A broken bond at position A, resulting in a conduction electron and a *hole*. (b) A broken bond at position B.

2.5 Các dải năng lượng (Energy bands)

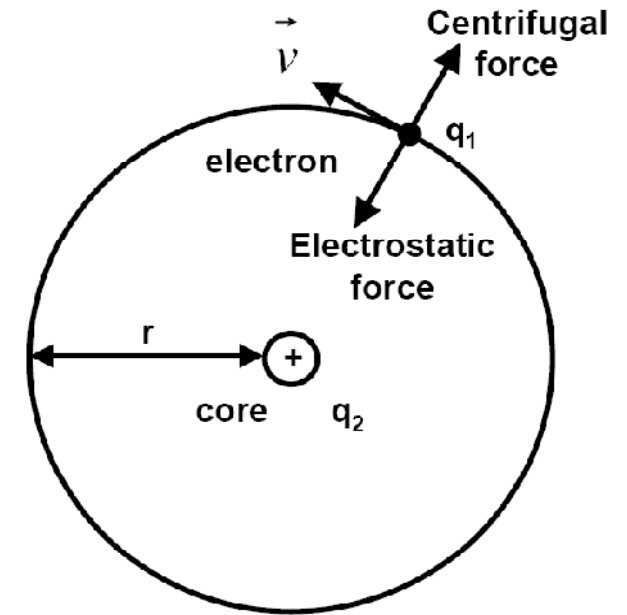
2.5.1 Những mức năng lượng của nguyên tử được cách ly

- ❑ Để hiểu những tính chất của những chất bán dẫn, ta cần phải hiểu những tính chất của những nguyên tử tạo thành chúng.
- ❑ Theo mô hình của Bohr thì nguyên tử gồm có một lõi, mà về cơ bản chứa toàn bộ khối lượng của nguyên tử. Vỏ gần như không có khối lượng. Hầu như mọi khối lượng được tập trung trong lõi có đường kính nhỏ 10^{-15} m , khi đó so sánh với đường kính vỏ 10^{-10} m = 0.1 nm = 1 Å (Ångstrom).
- ❑ Lõi gồm có những neutron và những proton. Lõi mang điện tích dương. Vỏ (vỏ điện tử) mang điện tích âm vì có những điện tử trên các quỹ đạo trong vỏ. Nhưng toàn bộ nguyên tử thì không có điện tích hay trung hòa điện.
- ❑ Những điện tử như những vệ tinh. Chúng quay xung quanh lõi trên quỹ đạo nhất định. Những điện tử được làm ổn định trên những quỹ đạo của chúng do sự cân bằng của những lực ly tâm và Coulomb.

Nguyên tử Hydrogen

- Do sự cân bằng giữa lực ly tâm và lực tĩnh điện, tồn tại một liên hệ vận tốc điện tử và bán kính của lõi. Vận tốc của mỗi điện tử liên hệ với bán kính quỹ đạo với tâm ở lõi. Vì một điện tử có thể có những năng lượng khác nhau, nó có thể có những bán kính khác nhau đến lõi của nguyên tử. Tuy nhiên, mô hình có những vấn đề sau:

- Theo điện động học cổ điển, hạt có tích điện trên quỹ đạo dẫn đến tạo thành một lưỡng cực từ mà bức xạ năng lượng. Do mất mát năng lượng, hạt sẽ bị hút nhiều hơn vào lõi, mà dẫn đến đường đi như hình xoắn ốc. Cuối cùng hạt sẽ rơi vào lõi của nguyên tử.



Nguyên tử Hydrogen (tt)

- Để giải quyết vấn đề này, ông Bohr đã đề nghị tiên đề sau: các mức năng lượng của nguyên tử và bán kính quỹ đạo được lượng tử hóa. Các mức năng lượng được cho phép của nguyên tử Hydrogen được cho bởi:

$$E_n = -\frac{E_B}{n^2} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

với E_B là **năng lượng Bohr** và n là **số lượng tử nguyên tắc** (principle quantum number). Năng lượng Bohr được cho bởi:

$$E_B = \frac{q^2}{8\pi\epsilon_0 a_B}$$

với a_B là bán kính Bohr, q là điện tích điện tử (là điện tích cơ bản) và ϵ_0 là hằng số điện môi chân không. Những năng lượng điện tử giữa những mức năng lượng E_n không được cho phép.

Nguyên tử Hydrogen (tt)

- ❑ Khi những năng lượng điện tử được lượng tử hóa và những bán kính của những mức năng lượng (energy levels) cũng được lượng tử hóa.
- ❑ Những mức năng lượng của một nguyên tử là duy nhất.
- ❑ Sự tạo thành hay tách ra của những mức năng lượng này cho phép tạo thành những **dải năng lượng** (energy bands).
- ❑ Những năng lượng, mà ở giữa những năng lượng đã được định nghĩa, được gọi là những dải năng lượng cấm (forbidden energy bands) hay những **dải cấm**.
- ❑ Người ta thường dùng đơn vị của năng lượng là eV (electronvolt). Đại lượng eV là đơn vị năng lượng tương ứng điện tử có được khi thế của nó tăng thêm 1V ($1\text{eV}=1.6 \times 10^{-19}\text{AVs}=1.6 \times 10^{-19}\text{J}$).
- ❑ Bán kính Bohr được cho bởi:

$$a_B = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi \cdot m_e q^2}$$

với h là hằng số Planck và m_e là khối lượng của điện tử.

Nguyên tử Hydrogen (tt)

- Mô hình nguyên tử của Bohr có thể kết hợp với lý thuyết quang tử (photon) của Einstein. Hiệu số năng lượng giữa 2 mức năng lượng n và m (năng lượng photon) được cho bởi:

$$E_n - E_m = h \cdot f_{n,m} \quad n > m$$

E_n ứng với mức năng lượng cao hơn.

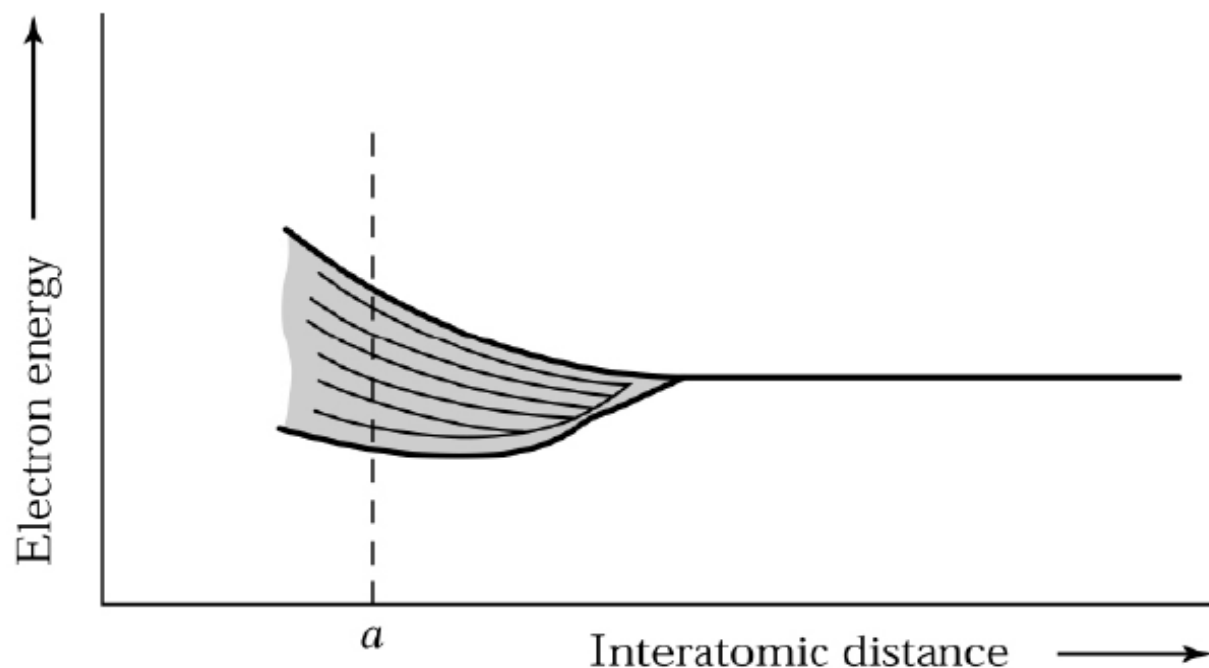
- Chuyển tiếp từ mức năng lượng cao hơn xuống thấp hơn dẫn đến mất năng lượng. Năng lượng được giải phóng dưới dạng photon, với f là tần số của ánh sáng được phát xạ. Tần số f và bước sóng λ tương ứng của ánh sáng được cho bởi:

$$f_{n,m} = \frac{q^4 m_e}{8 \epsilon_0^2 h^2} \cdot \left| \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right|$$

$$\lambda_{n,m} = \frac{c}{f_{n,m}}$$

Những dải năng lượng

- Ta chuyển việc khảo sát từ nguyên tử đơn sang khảo sát chất rắn.
- Với một nguyên tử cách ly, các điện tử có các mức năng lượng rời rạc. Khi số p các nguyên tử cách ly được gom lại với nhau để tạo thành chất rắn, quỹ đạo của các điện tử ngoài cùng phủ lấp nhau và tương tác với nhau. Sự tương tác này bao gồm những lực hút và đẩy giữa các nguyên tử. Những lực hút giữa các nguyên tử gây ra sự dịch các mức năng lượng. Thay vì tạo thành những mức đơn, như trong trường hợp đơn nguyên tử, p mức năng lượng được tạo



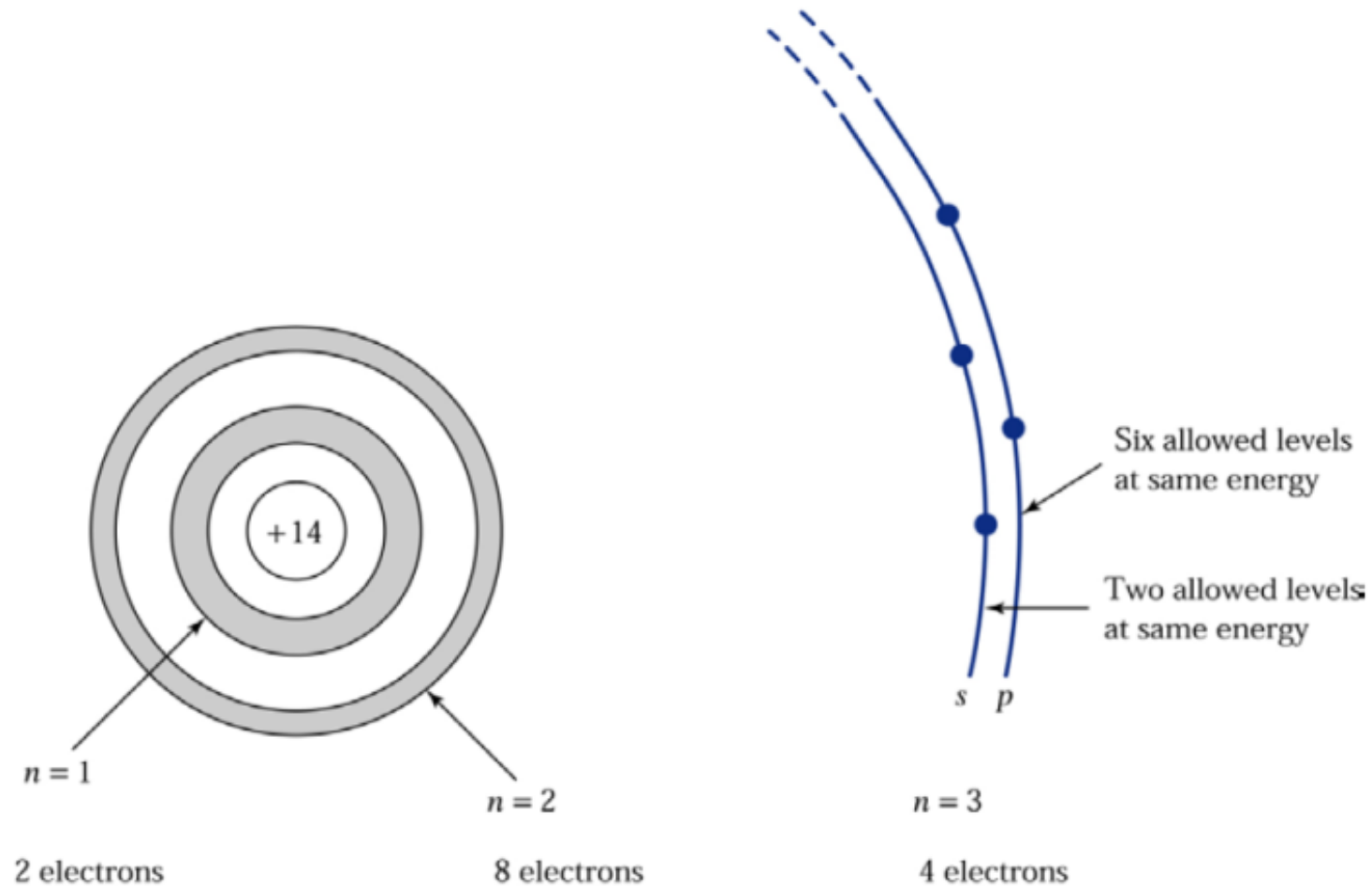
Sơ đồ minh họa việc tách các trạng thái suy biến thành dải liên tục của các trạng thái [được] cho phép.

do

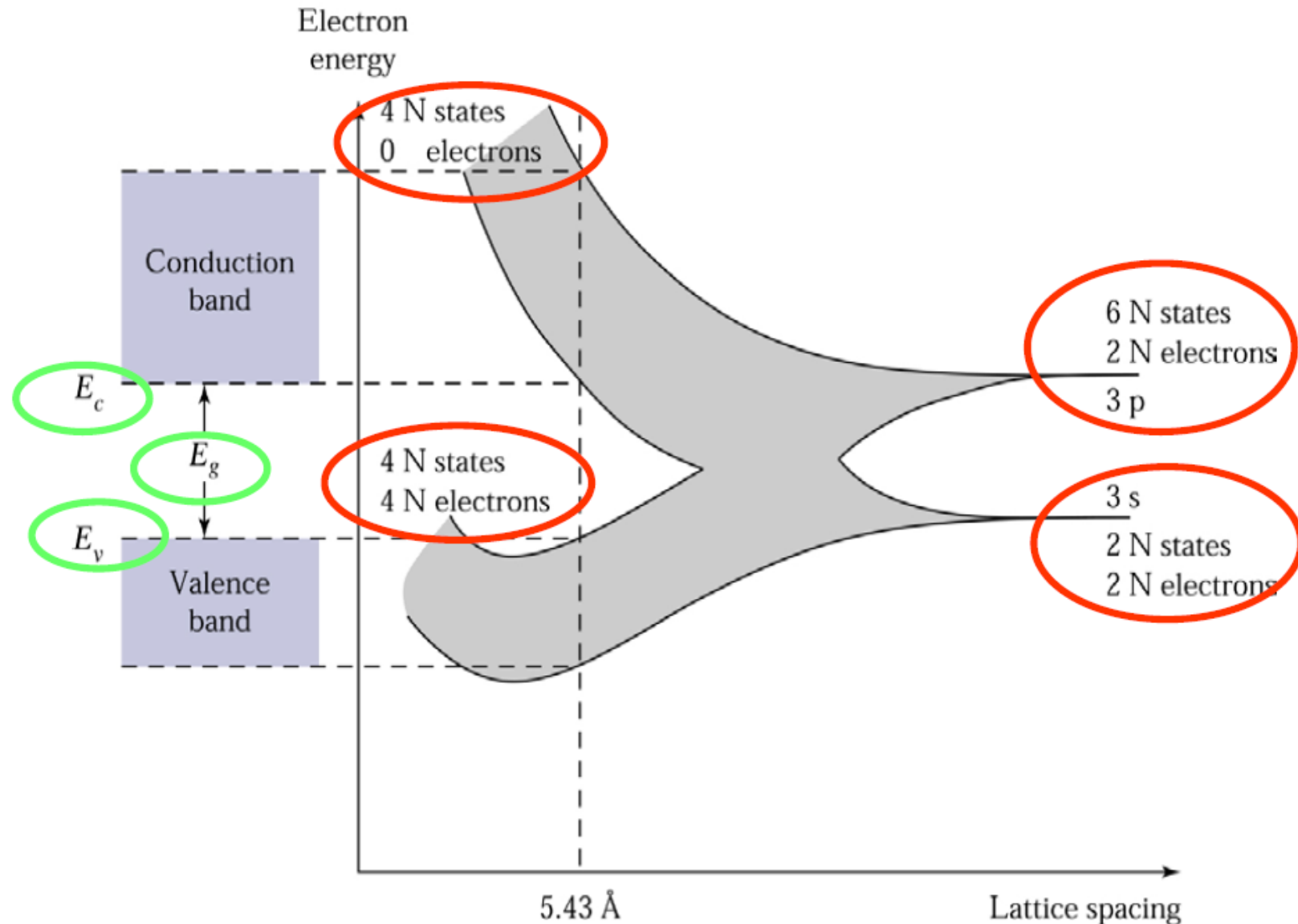
Cấu trúc dải năng lượng của bán dẫn

- Bây giờ chúng ta chuyển từ mô tả tổng quát cấu trúc dải năng lượng trong chất rắn sang trường hợp cụ thể hơn của silicon. Một nguyên tử silicon cách ly có 14 điện tử. Trong 14 điện tử, có 10 điện tử chiếm những mức năng lượng sâu hơn. Do đó, bán kính quỹ đạo nhỏ hơn lực tách giữa những phân tử trong tinh thể. 10 điện tử bị liên kết chặt với các nguyên tử.
- Bốn điện tử dải hóa trị còn lại có liên kết yếu với lõi và có thể tham gia vào các phản ứng hóa học. Do đó, chúng ta có thể tập trung vào lớp vỏ ngoài cùng (mức $n=3$). Mức $n=3$ gồm các lớp vỏ con 3s ($n=3$ và $l=0$) và 3p ($n=3$ và $l=1$). Lớp vỏ con 3s có 2 mức trạng thái cho phép trên 1 nguyên tử và cả hai trạng thái được lấp bởi 1 điện tử (ở 0°K). Lớp vỏ con 3p có 6 trạng thái cho phép và 2 trong các trạng thái này được lấp bởi những điện tử còn lại.

Biểu diễn sơ đồ của nguyên tử silicon cách ly



Sự tạo thành những dải năng lượng trong silicon theo hàm khoảng cách giữa các nguyên tử trong mạng tinh thể.



Khe năng lượng (bandgap)

- Đáy của dải dẫn được gọi là E_C và đỉnh của dải hóa trị được gọi là E_V . Hiệu số năng lượng giữa đáy dải dẫn và đỉnh dải hóa trị được gọi là khe năng lượng E_G .
- Khe năng lượng $E_G = E_C - E_V$ ở giữa đáy dải dẫn và đỉnh dải hóa trị bằng bề rộng dải cấm. E_G là năng lượng cần để phá vỡ liên kết trong bán dẫn để cho một điện tử trong dải dẫn và để một lỗ trống trong dải hóa trị.
- Sự thiếu hụt một điện tử trong dải hóa trị được coi là một lỗ [trống tự do]. Sự thiếu hụt trong dải hóa trị có thể được lấp bằng điện tử lân cận, mà dẫn đến sự dịch chuyển vị trí thiếu hụt, xem như lỗ di chuyển. Lỗ có điện tích dương. Cả hai điện tử và lỗ góp phần vào tạo nên dòng điện.

2.5.2 Giải đồ năng lượng-momentum

- Nếu 1 điện tử được kích thích vào dải dẫn, nó có thể di chuyển tự do trong tinh thể, từ đó điện tử có thể được xem như một hạt trong không gian tự do. Sự truyền lan của điện tử tự do có thể được mô tả bằng hàm sóng, là lời giải của phương trình Schrödinger. Hàm sóng cho điện tử tự do được cho bởi

$$\psi = A_1 \exp(ikx) + B_1 \exp(-ikx)$$

với k là vector sóng có phương trình sau:

$$k = \frac{p}{h/2\pi}$$

p là momentum (mô-măn) của điện tử.

- Do biểu thức này, năng lượng điện tử có thể được cho trước theo hàm của vector sóng. Ta nói về biểu diễn không gian k . Các dải năng lượng lúc này có thể được xác định theo hàm của vector k .

Giải đồ năng lượng-momentum (tt)

Ta xét điện tử trong không gian tự do, khi đó điện tử có năng lượng E và momentum p như sau:

$$E_n = \frac{m_e v^2}{2}$$

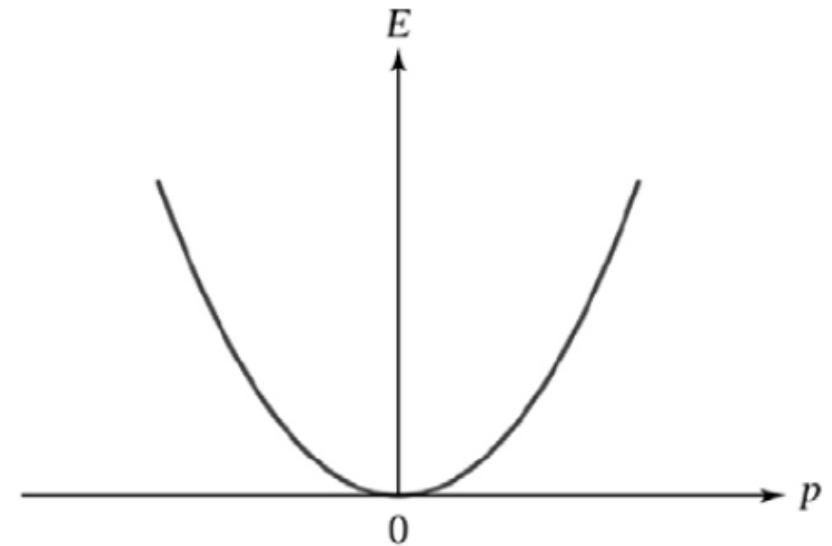
và

$$p = m_e v$$

Từ đó ta có thể biểu diễn E_n theo p như sau:

$$E_n = \frac{m_e v^2}{2} = \frac{p^2}{2m_e}$$

với E_n : năng lượng của điện tử tự do
 m_e : khối lượng của điện tử
 V : vận tốc của điện tử



Energy momentum diagram for a free electron

- **Khối lượng hiệu dụng của điện tử m_n** phụ thuộc vào tính chất của bán dẫn. Nếu ta có quan hệ năng lượng-momentum như sau

$$E = \frac{p^2}{2m_n}$$

thì ta có thể tính được khối lượng hiệu dụng qua đạo hàm bậc 2 của E theo p:

$$m_n \equiv \left(\frac{d^2 E}{dp^2} \right)^{-1}$$

- Do đó khi parabola càng hẹp, tương ứng với đạo hàm bậc 2 càng lớn, thì khối lượng hiệu dụng càng nhỏ. Ta có biểu thức tương tự với lỗ (có khối lượng hiệu dụng m_p). Khái niệm khối lượng hiệu dụng rất hữu ích vì nó giúp xem điện tử và lỗ như các hạt tích điện cổ điển.

TD về giản đồ năng lượng - momentum

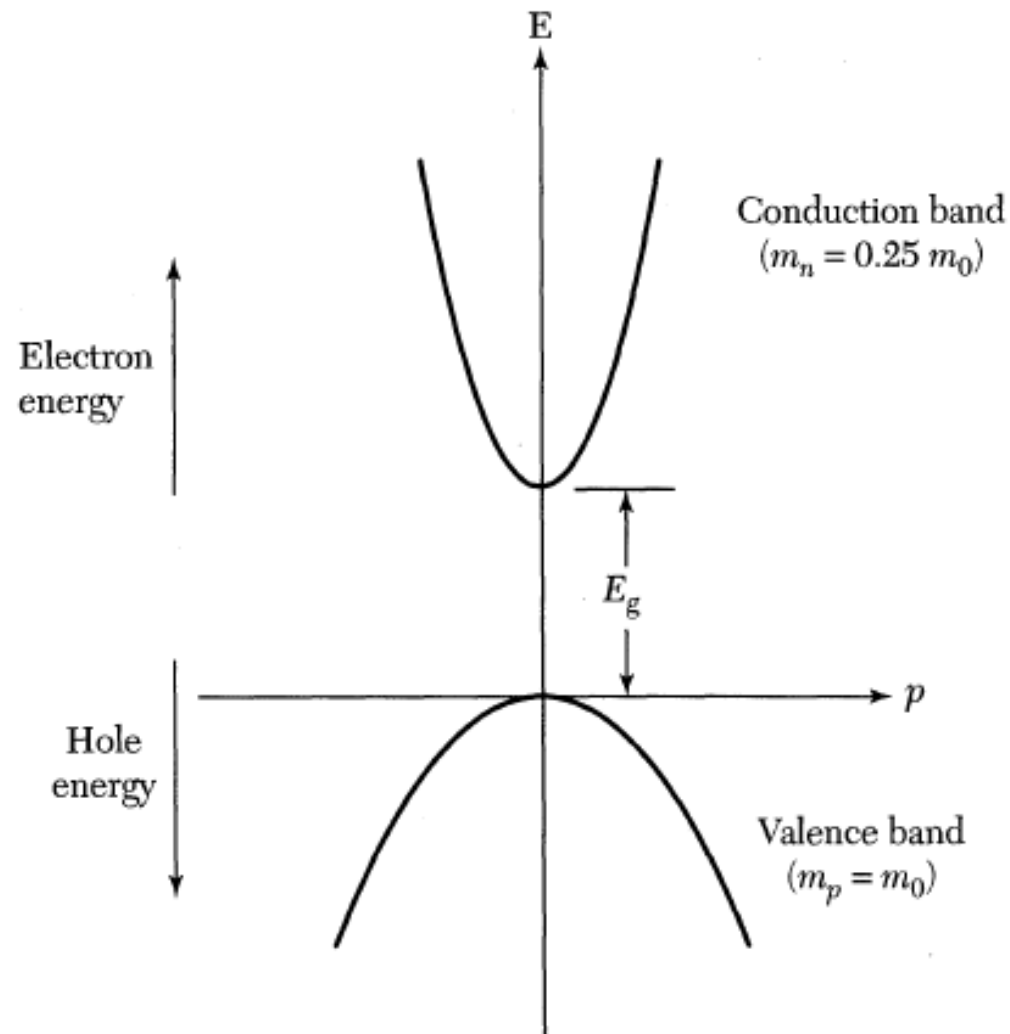
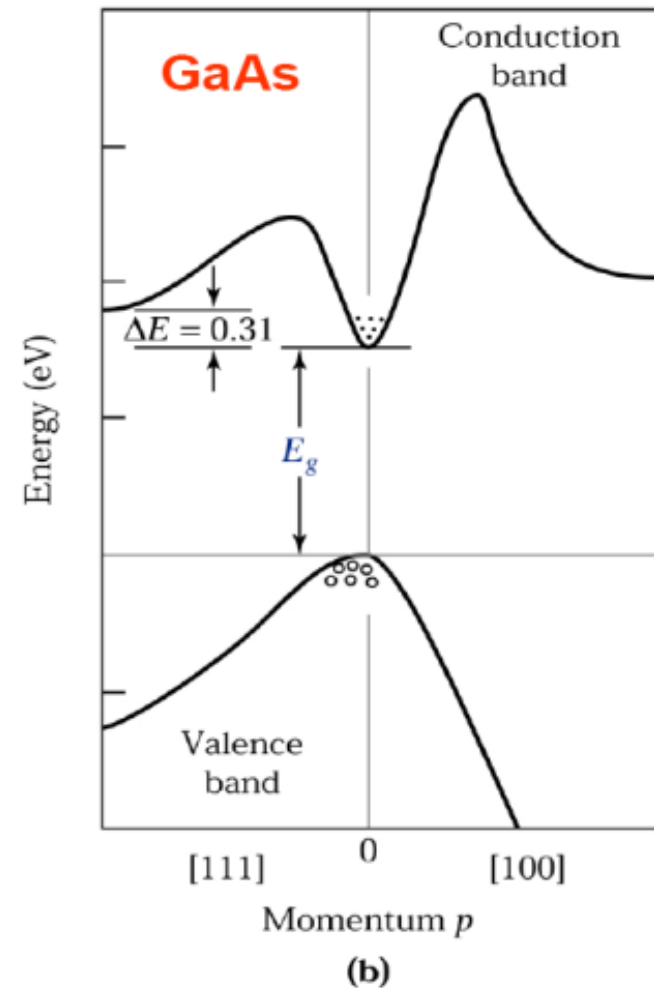
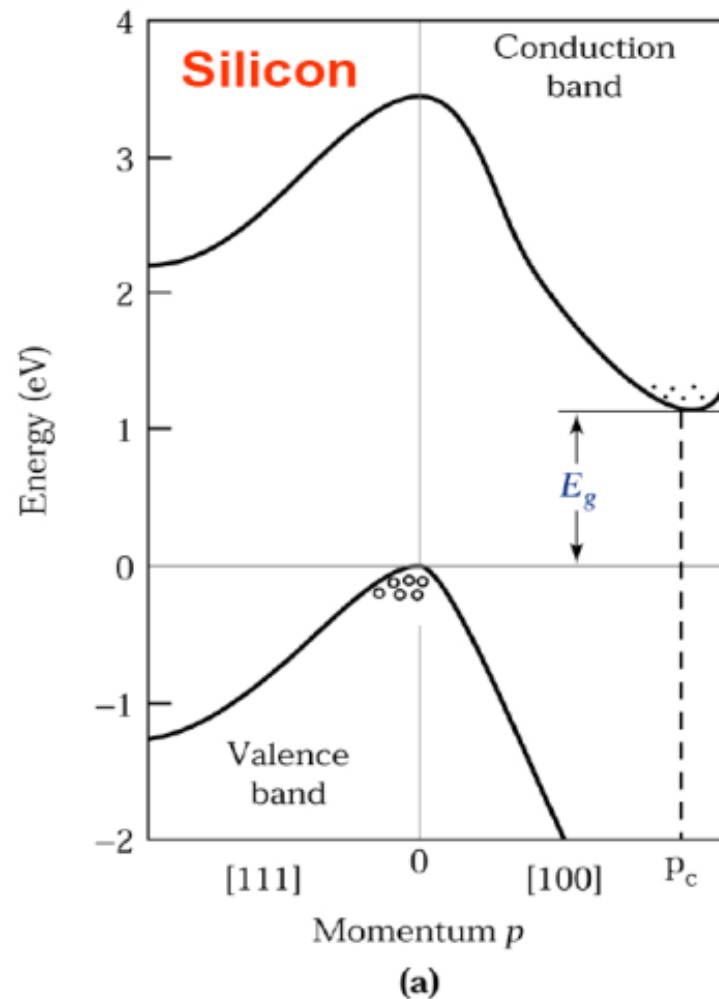


Fig. 17 A schematic energy-momentum diagram for a special semiconductor with $m_n = 0.25 m_0$ and $m_p = m_0$.

m_0 = khối lượng của điện tử tự do

Giản đồ năng lượng-momentum [cgl giản đồ dải năng lượng] của (a) bán dẫn gián tiếp (Td: Si) và (b) bán dẫn trực tiếp (Td: GaAs)



Indirect semiconductor

- GaAs được gọi là **bán dẫn trực tiếp** vì nó không cần sự thay đổi momentum để chuyển điện tử từ dải hóa trị sang dải dẫn.
- Si được gọi là **bán dẫn gián tiếp** vì nó cần sự thay đổi momentum để chuyển điện tử từ dải hóa trị sang dải dẫn.

Direct semiconductor

2.5.3 Sự dẫn điện trong kim loại, bán dẫn và chất cách điện

Hình 19 cho thấy giản đồ dải năng lượng của 3 loại chất rắn: dẫn điện (kim loại), bán dẫn, và cách điện.

- **Chất dẫn điện:** có điện trở suất rất thấp và dải dẫn được đổ đầy 1 phần điện tử tự do (như đồng) hoặc phủ lấp dải hóa trị (như kẽm và chì) để không có khe năng lượng.
- **Chất bán dẫn:** có khe năng lượng $< 4\text{eV}$. Ở $T=0\text{K}$, tất cả điện tử ở dải hóa trị và không có điện tử ở dải dẫn $\rightarrow$ cách điện. Ở nhiệt độ phòng, do nhiệt năng kích thích 1 số điện tử vào dải dẫn $\rightarrow$ dẫn điện (kém)
- **Chất cách điện:** có khe năng lượng $> 4\text{eV}$ (như SiO_2). Các điện tử hóa trị tạo nên liên kết mạnh với các nguyên tử lân cận. Ở nhiệt độ phòng, nhiệt năng không đủ kích thích các điện tử vào dải dẫn $\rightarrow$ không dẫn điện $\rightarrow$ cách điện.

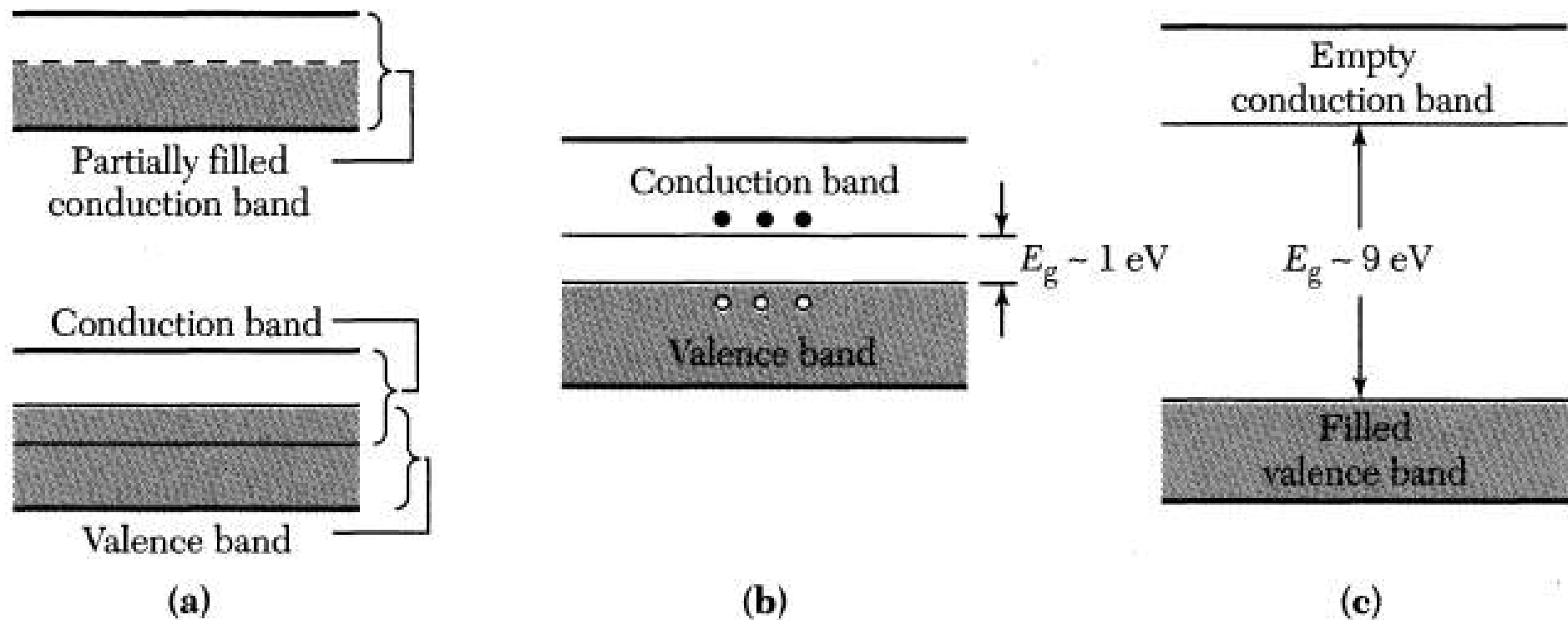
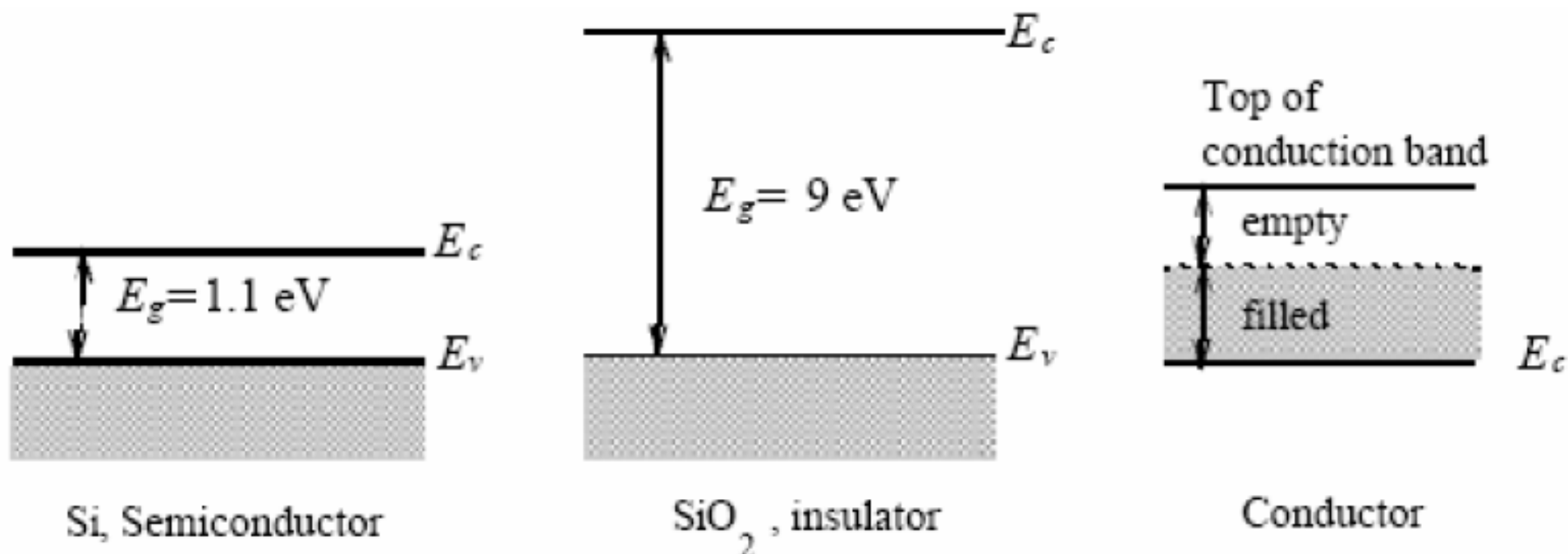


Fig. 19 Schematic energy band representations of (a) a conductor with two possibilities (either the partially filled conduction band shown at the upper portion or the overlapping bands shown at the lower portion), (b) a semiconductor, and (c) an insulator.

Phân loại vật liệu theo khe năng lượng

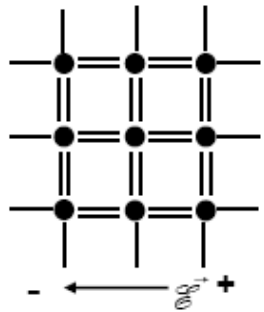


Hình 5.5 Phân loại vật liệu theo khe năng lượng

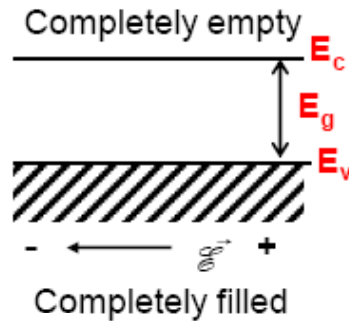
Thí dụ E_G của một số vật liệu bán dẫn (ở $T=300^\circ\text{K}$):

Semiconductor	PbTe	Ge	Si	GaAs	GaP	Diamond
$E_g(\text{eV})$	0.31	0.67	1.12	1.42	2.25	6.0

So sánh giữa mô hình liên kết hóa trị và mô hình dải năng lượng



Ở $T = 0K$

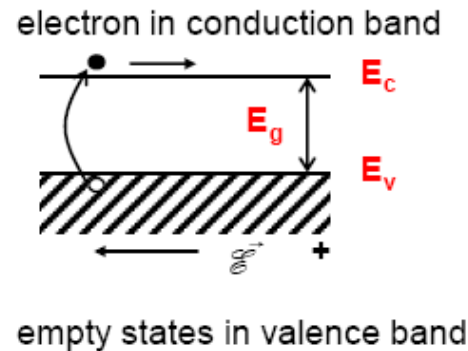
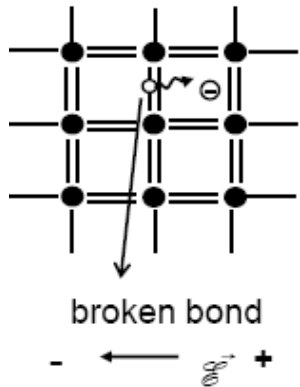


E_g = năng lượng cần làm gãy 1 liên kết đồng hóa trị

Không có liên kết bị phá vỡ

↔ Không có điện tử trong dải dẫn và Không có trạng thái trống trong dải hóa trị

Không có dòng điện



Sinh cặp điện tử-lỗ

Liên kết bị phá vỡ

↔ Điện tử (trong dải dẫn và) Lỗ (trạng thái trống trong dải hóa trị)

Khi có kích thích là nhiệt năng hay quang năng

Những hạt dẫn: {

- Những điện tử trong dải dẫn
- Những lỗ (trạng thái trống) trong dải hóa trị

Một số thuật ngữ thường dùng trong lý thuyết dải năng lượng:

Một số thuật ngữ thường dùng trong lý thuyết dải năng lượng:

- N_V : mật độ trạng thái hiệu dụng của dải hóa trị, đây là số lỗ tối đa trên 1 đơn vị thể tích mà ta có thể tìm thấy trong toàn bộ vùng hóa trị.
- N_C : mật độ trạng thái hiệu dụng của dải dẫn, đây là số điện tử tối đa trên 1 đơn vị thể tích mà ta có thể tìm thấy trong toàn bộ dải dẫn.
- n : nồng độ điện tử (electron concentration) là số điện tử trên 1 đơn vị thể tích trong dải dẫn.
- p : nồng độ lỗ (hole concentration) là số lỗ trống trên 1 đơn vị thể tích trong dải hóa trị.

Chú ý: n và p còn được gọi là các nồng độ hạt dẫn (carrier concentration) vì chúng là những hạt mang điện tích tự do và chuyển động theo điện trường để tạo thành dòng điện.

2.6 Nồng độ hạt dẫn nội tại (Intrinsic concentrations)

Các tính chất vật liệu và hạt dẫn

□ *Bán dẫn thuần và bán dẫn có pha tạp chất (Intrinsic and extrinsic Semiconductors)*

- Vật liệu được xem là *bán dẫn thuần* (còn gọi là bán dẫn nội tại hay tinh khiết) nếu vật liệu chứa một lượng tạp chất tương đối nhỏ.
- Vật liệu được xem là *bán dẫn có pha tạp chất* (còn gọi là bán dẫn ngoại lai) nếu vật liệu chứa một lượng tạp chất tương đối lớn.

□ *Bán dẫn ở cân bằng nhiệt*

Ta giả sử đang xét bán dẫn thuần và bỏ qua các ảnh hưởng của tạp chất với bán dẫn. Ngoài ra ta giả sử bán dẫn ở cân bằng nhiệt, nghĩa là bán dẫn không bị tác động bởi các kích thích bên ngoài như ánh sáng, áp suất hay điện trường. Bán dẫn được giữ ở nhiệt độ không đổi trên toàn bộ mẫu thử (nghĩa là không có gradient nhiệt độ trong chất bán dẫn).

Tính nồng độ điện tử

- Để có được nồng độ điện tử (số điện tử trên 1 đơn vị thể tích) trong bán dẫn nội tại, trước hết ta phải tìm mật độ điện tử trong 1 gia số năng lượng dE . Mật độ này $n(E)$ được cho bởi tích của mật độ trạng thái $N(E)$, nghĩa là mật độ của các trạng thái năng lượng được cho phép trên năng lượng E trên 1 đơn vị thể tích, với xác suất chiếm trạng thái năng lượng đó $F(E)$.
- Như vậy nồng độ điện tử trong dải dẫn có được bằng cách lấy tích phân $N(E) F(E) dE$ từ đáy của dải dẫn (E , để cho đơn giản ban đầu cho $E=0$) đến đỉnh của dải dẫn E_{top} :

$$n = \int_0^{E_{top}} n(E) dE = \int_0^{E_{top}} N(E) F(E) dE, \quad (9)$$

với n theo cm^{-3} , $N(E)$ theo $(\text{cm}^3\text{eV})^{-1}$.

Hàm phân bố Fermi-Dirac

- Xác suất mà 1 điện tử chiếm 1 trạng thái điện tử với năng lượng E được cho bởi hàm phân bố Fermi-Dirac, còn được gọi là hàm phân bố Fermi.

$$F(E) = \frac{1}{1 + e^{(E - E_F)/kT}}, \quad (10)$$

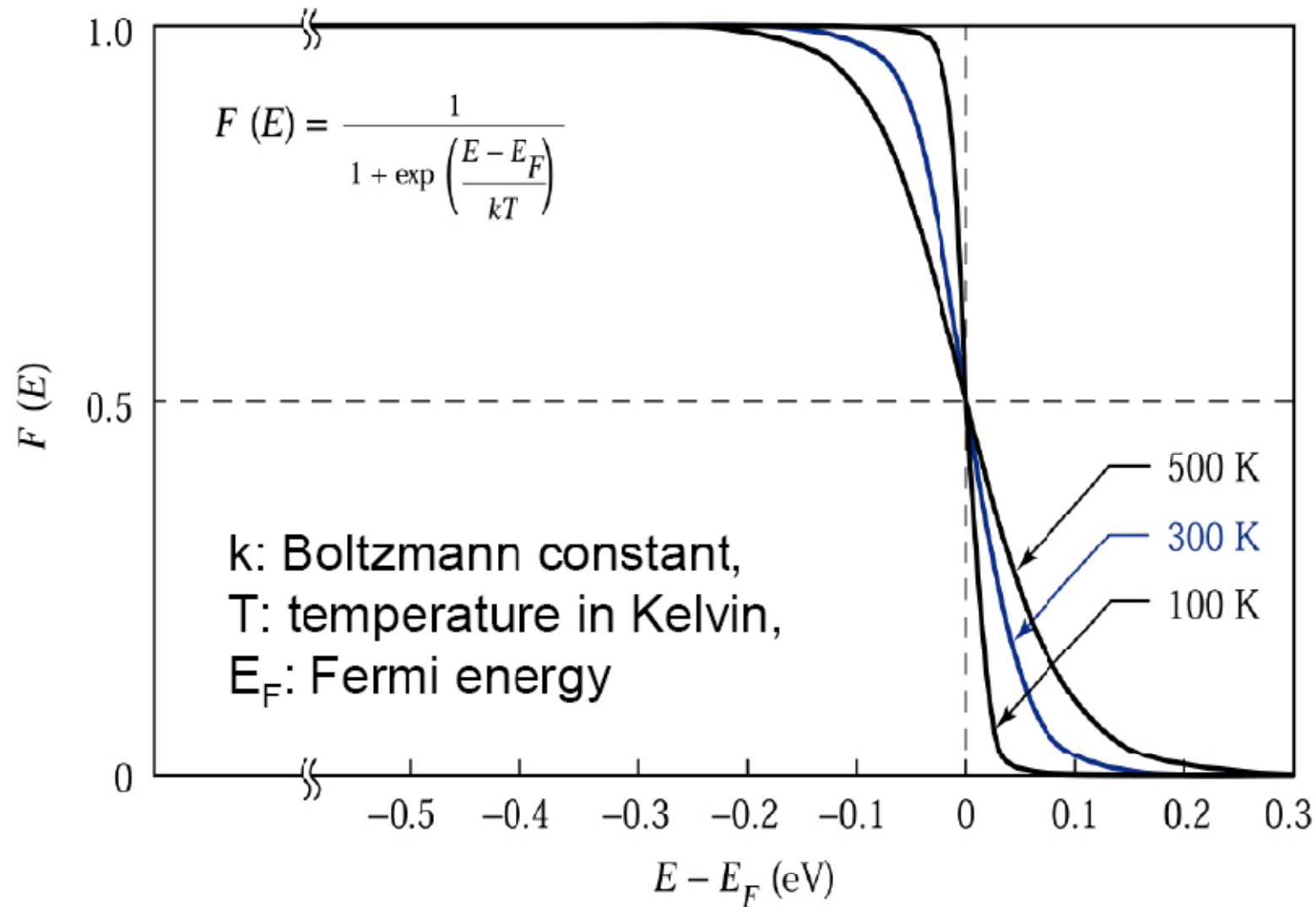
- với k là hằng số Boltzmann, T là nhiệt độ tuyệt đối theo độ Kelvin, và E_F là mức năng lượng Fermi. Năng lượng Fermi là năng lượng mà ở đó xác suất được chiếm bởi điện tử chính xác bằng 0.5. Phân bố Fermi được minh họa ở hình 20 với các nhiệt độ khác nhau. Chú ý là $F(E)$ đối xứng quanh mức năng lượng Fermi. Với những năng lượng mà lớn hơn (hoặc nhỏ hơn) $3kT$ so với năng lượng Fermi, số hạng mũ > 20 (hoặc < 0.05). Phân bố Fermi có thể được xấp xỉ bằng các biểu thức đơn giản hơn:

$$F(E) \cong e^{-(E - E_F)/kT} \quad \text{khi} \quad (E - E_F) > 3kT, \quad (11a)$$

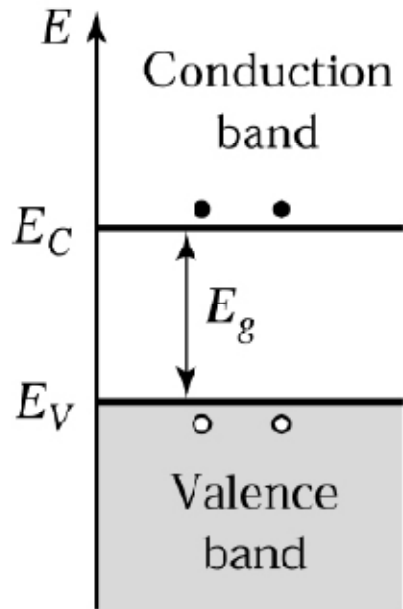
$$F(E) \cong 1 - e^{-(E - E_F)/kT} \quad \text{khi} \quad (E - E_F) < 3kT. \quad (11b)$$

- Phương trình 11b có thể được xem như xác suất của lỗ chiếm mức năng lượng E .

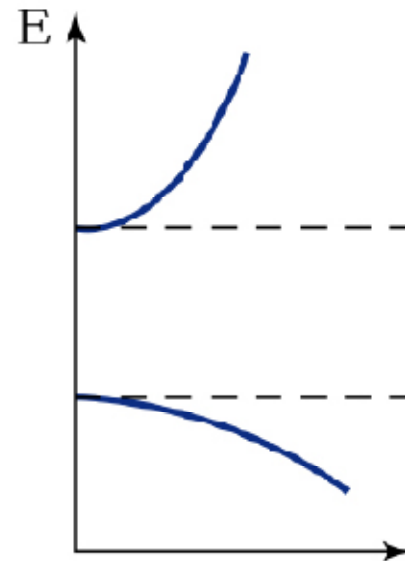
Hình 20. Hàm phân bố Fermi $F(E)$ theo $E - E_F$ với các nhiệt độ khác nhau



Bán dẫn thuần ở cân bằng nhiệt

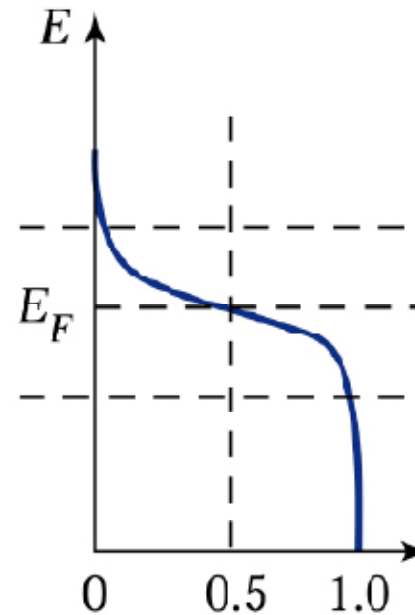


Schematic
Band Diagram



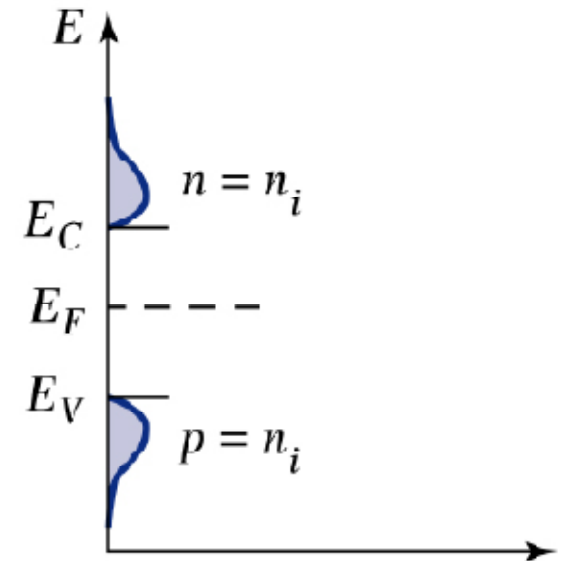
$N(E)$

Density of
States



$F(E)$

Fermi-Dirac
Distribution



$n(E)$ and $p(E)$

Electron and
hole Density

Mật độ trạng thái

- Ta có thể tính các mật độ trạng thái bằng phương trình Schrödinger. Tuy nhiên ta sẽ không bàn về việc suy ra hàm mật độ trạng thái. SV có thể đọc thêm trong phụ lục H của sách “Semiconductor Devices”, tác giả M.S Sze.

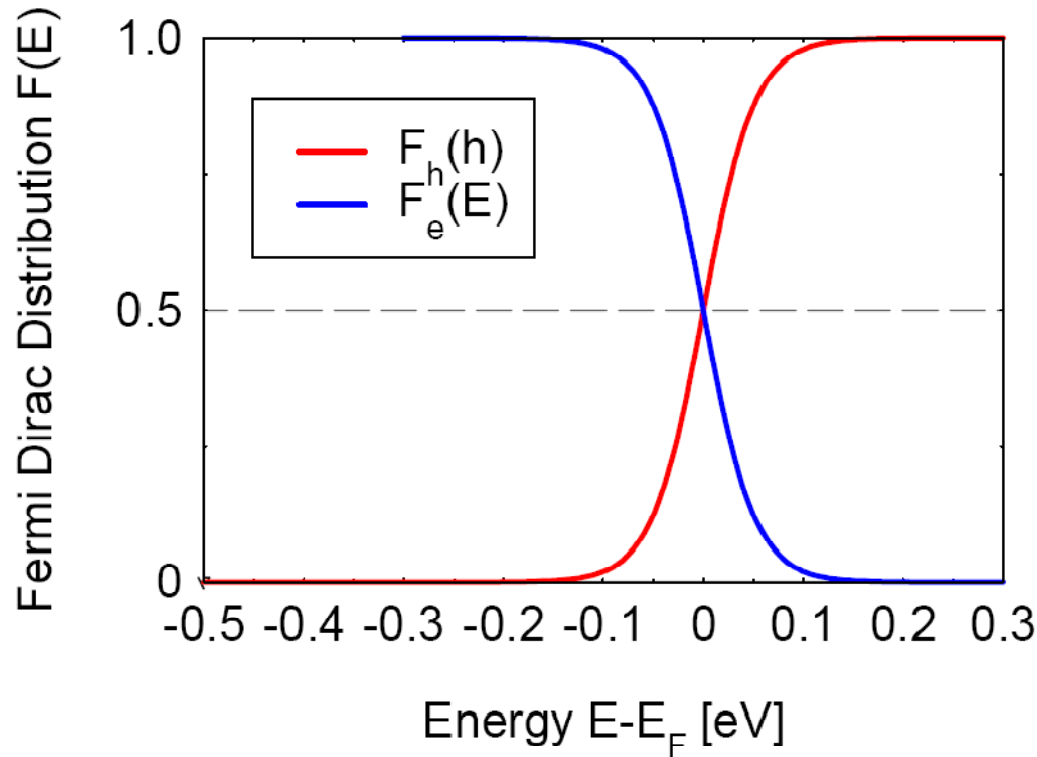
$$N_C(E) = \frac{4\pi}{h^3} \sqrt{2m_e^3(E - E_c)}$$

$$N_V(E) = \frac{4\pi}{h^3} \sqrt{2m_h^3(E_V - E)}$$

- với N_C là mật độ trạng thái điện tử và N_V là Mật độ trạng thái lỗ
- Mật độ trạng thái được xác định bởi một tham số vật liệu, đó là khối lượng hiệu dụng của điện tử (m_e) hay lỗ (m_h). Do đó, mật độ trạng thái của điện tử và lỗ thường khác nhau.

Mức (hay năng lượng) Fermi E_F và nồng độ hạt dẫn cân bằng

Phân bố Fermi-Dirac của điện tử $F_e(E)$ và lỗ $F_h(E)$.



$$F_e(E) = \frac{1}{1 + \exp(E - E_F / kT)}$$

Fermi energy for electrons

$$F_h(E) = 1 - F_e(E) = \frac{1}{1 + \exp(E_F - E / kT)}$$

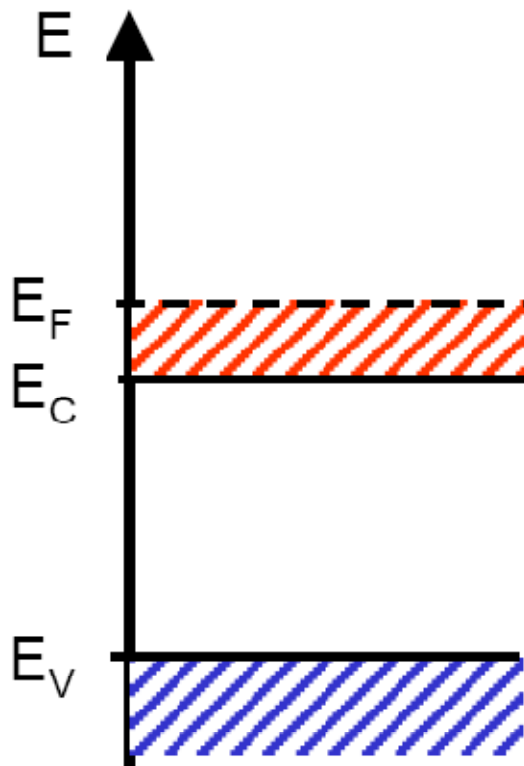
Fermi energy for holes

Cân bằng nhiệt

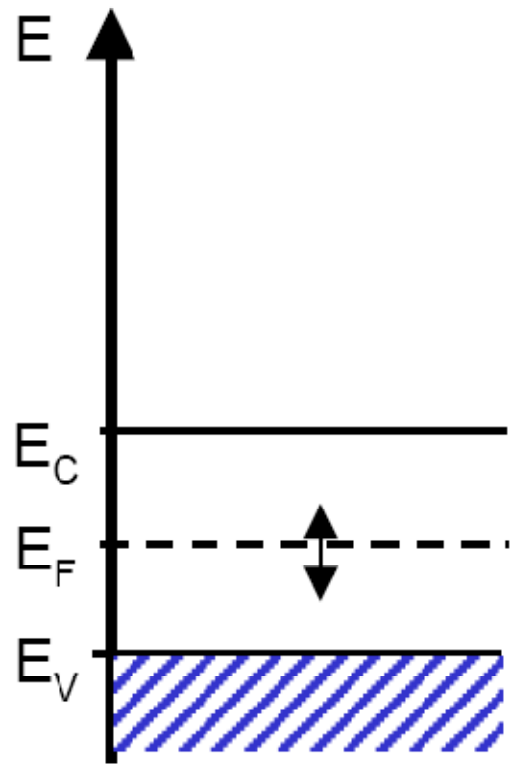
Chất bán dẫn ở cân bằng nhiệt, nếu nhiệt độ ở mỗi vị trí của tinh thể là như nhau, dòng điện tổng cộng qua vật liệu bằng 0, và chất rắn không bị chiếu sáng. Ngoài ra ta còn giả sử rằng không có phản ứng hóa học tham dự. Do đó năng lượng Fermi trên toàn vật liệu là như nhau:

$$E_F = E_F(x, y, z) = \text{const}$$

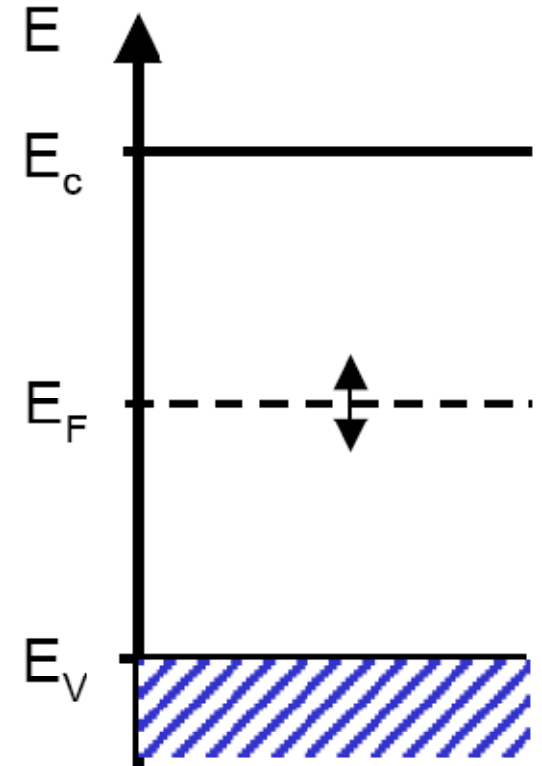
Năng lượng Fermi trong chất rắn



Conductor



Semiconductor



Insulator

Phân bố Boltzmann

Để tính nồng độ hạt dẫn cho điện tử và lỗ (n và p), ta cần giải tích phân Fermi.

$$n = N_C \cdot \mathfrak{F}_{1/2}\left(-\left(E_C - E_F\right)/kT\right)$$

$$p = N_V \cdot \mathfrak{F}_{1/2}\left(-\left(E_F - E_V\right)/kT\right)$$

Tuy nhiên ta không thể giải tích phân Fermi bằng giải tích. Do đó người ta dùng xấp xỉ để xác định mật độ hạt dẫn. Xấp xỉ này được gọi là phân bố Boltzmann.

$$n \approx N_C \cdot \exp\left(-\left(E_C - E_F\right)/kT\right) \quad \text{for} \quad E_C - E_F \geq 2kT$$

Electron concentration, Boltzmann distribution

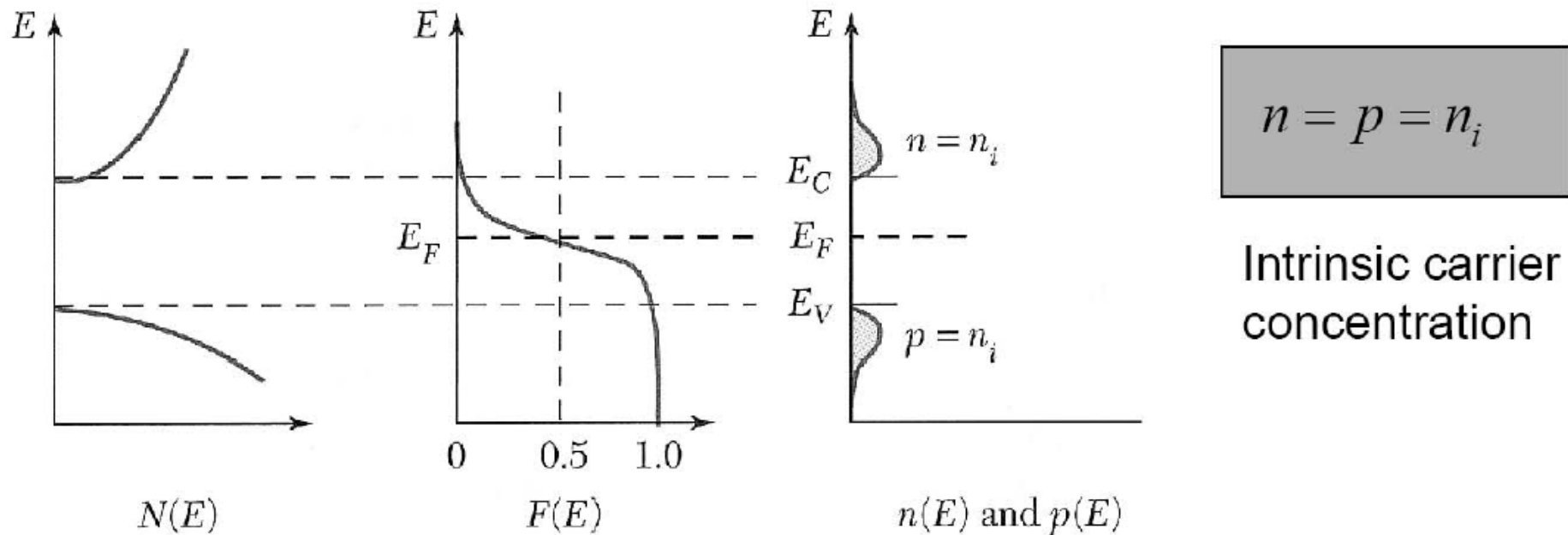
$$p \approx N_V \cdot \exp\left(-\left(E_F - E_V\right)/kT\right) \quad \text{for} \quad E_F - E_V \geq 2kT$$

Hole concentration, Boltzmann distribution

Chú ý: Các phương trình trên chỉ áp dụng cho bán dẫn ở điều kiện cân bằng (đkcb).

Nồng độ hạt dẫn nội tại

Trong bán dẫn thuần ta thấy nồng độ điện tử n và nồng độ lỗ p bằng nhau. Người ta gọi giá trị bằng nhau của n và p là *nồng độ hạt dẫn nội tại* n_i (intrinsic carrier concentration).



Hình 4.18 Nồng độ điện tử n , nồng độ lỗ p và nồng độ hạt dẫn nội tại n_i .

Dựa vào nồng độ hạt dẫn nội tại, ta có thể xác định năng lượng nội tại. Với bán dẫn thuần ở cân bằng nhiệt, năng lượng nội tại E_i bằng với năng lượng Fermi E_F

$$E_F (n = p = n_i) = E_i$$

biểu thức của năng lượng nội tại E_i :

$$E_i = \frac{E_V + E_C}{2} + \frac{kT}{2} \ln \left(\frac{N_V}{N_C} \right)$$

Nồng độ hạt dẫn nội tại n_i

Ở nhiệt độ phòng, đại lượng thứ hai nhỏ hơn nhiều đại lượng thứ nhất. Do đó năng lượng nội tại rất gần với vị trí giữa khe năng lượng $(E_C - E_V)/2 = E_g/2$. Với Silicon, năng lượng nội tại lệch so với giữa khe năng lượng là $E_i - (E_C + E_V)/2 \approx -kT/2 = -13\text{meV}$. Năng lượng nội tại bị dịch về phía dải hóa trị. Với trường hợp GaAs thì ngược lại, năng lượng nội tại dịch về phía dải dẫn $E_i - (E_C + E_V)/2 \approx 3kT/2 = 39\text{meV}$.

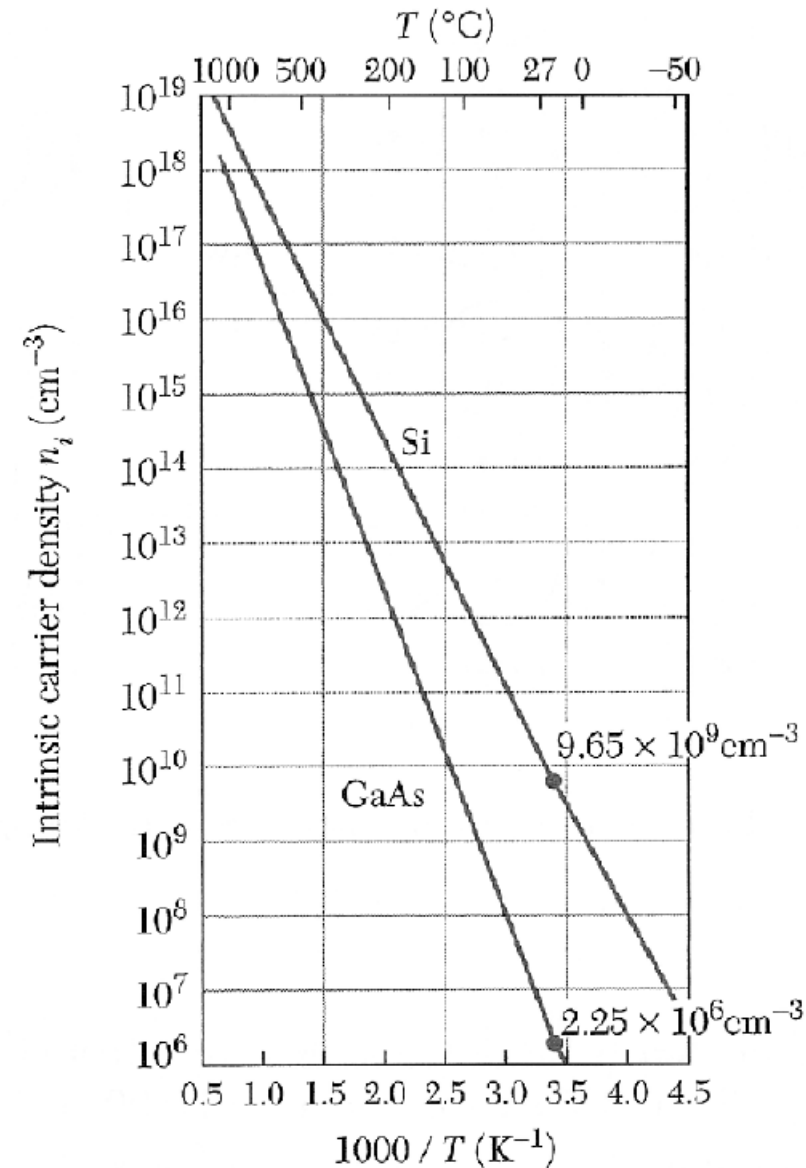
Dựa vào quan hệ $n = p = n_i$ ta có thể biểu diễn năng lượng nội tại theo mật độ trạng thái hạt dẫn của điện tử và lỗ. Từ 2 phương trình sau:

$$N_C = n_i \cdot \exp\left(\frac{E_C - E_i}{kT}\right)$$

$$N_V = n_i \cdot \exp\left(\frac{E_i - E_V}{kT}\right)$$

Ta tìm được năng lượng nội tại

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)$$



Intrinsic carrier concentration for silicon and GaAs.

Biểu diễn n & p qua n_i

$$n \cong N_C \cdot \exp\left(-\left(E_C - E_F\right)/kT\right) \quad \text{for} \quad E_C - E_F \geq 2kT$$

$$N_C = n_i \cdot \exp\left(\frac{E_C - E_i}{kT}\right)$$

$$n = n_i \cdot \exp\left(\frac{E_F - E_i}{kT}\right)$$

Electron concentration

$$p = n_i \cdot \exp\left(\frac{E_i - E_F}{kT}\right)$$

Hole concentration

TD các giá trị N_C , N_V và n_i của 1 số bán dẫn thông dụng (ở 300°K)

MATERIAL	CONDUCTION BAND EFFECTIVE DENSITY (N_C)	VALENCE BAND EFFECTIVE DENSITY (N_V)	INTRINSIC CARRIER CONCENTRATION ($n_i = p_i$)
Si (300 K)	$2.78 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	$9.84 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	$1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
Ge (300 K)	$1.04 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	$6.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	$2.33 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$
GaAs (300 K)	$4.45 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	$7.72 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	$1.84 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$

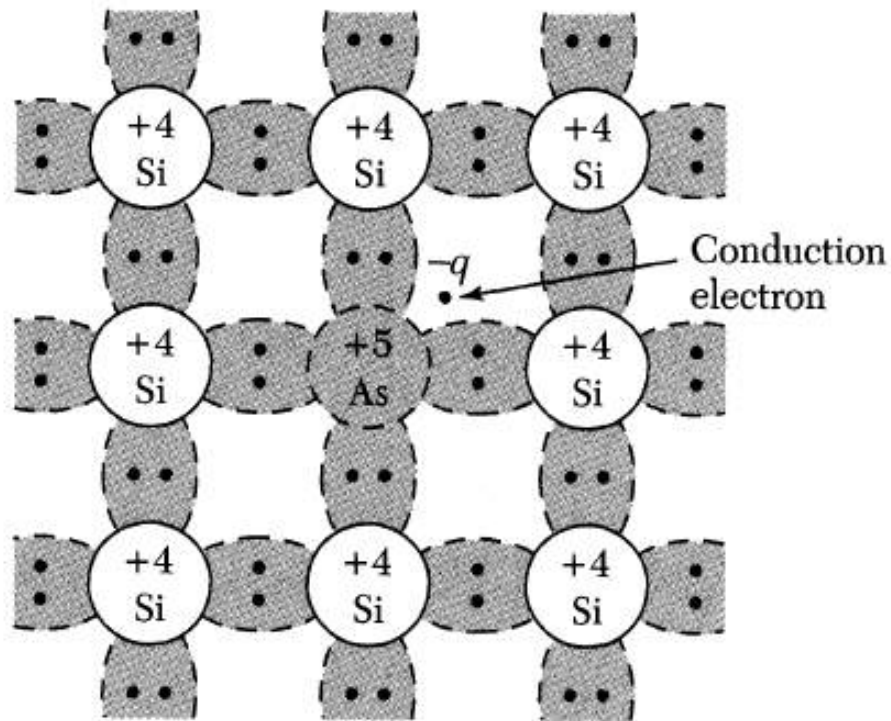
2.6 Chất Donor và chất Acceptor

Bán dẫn có pha tạp chất

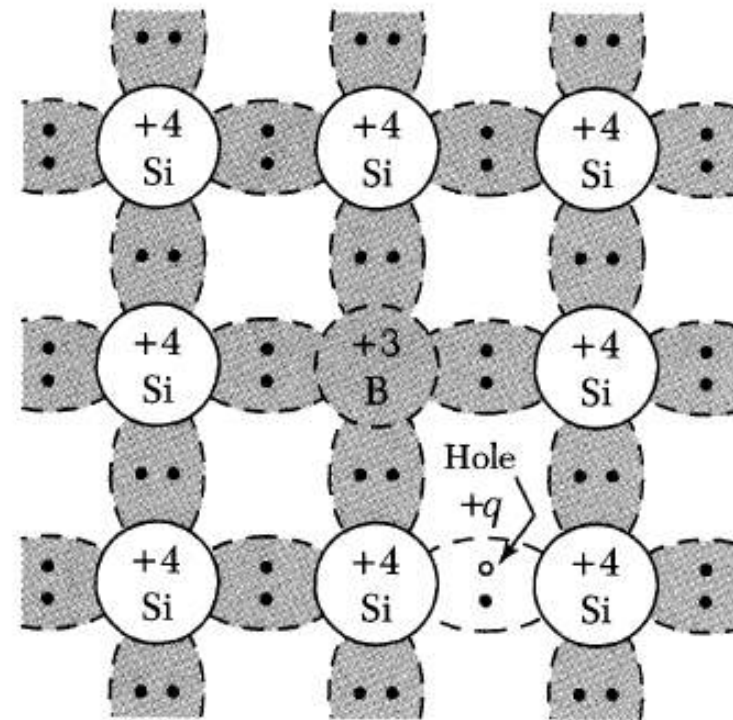
Bán dẫn loại P và bán dẫn loại N

Chất cho điện tử (donor) và chất nhận điện tử (acceptor)

- Khi bán dẫn bị pha tạp chất (với 1 lượng lớn tạp chất) thì người ta gọi nó là bán dẫn ngoại lai hay bán dẫn có pha tạp chất. Trong phần này ta sẽ xét ảnh hưởng của các acceptor và donor lên các tính chất của vật liệu. Ta sẽ tập trung xét pha tạp chất cho silicon.



(a)



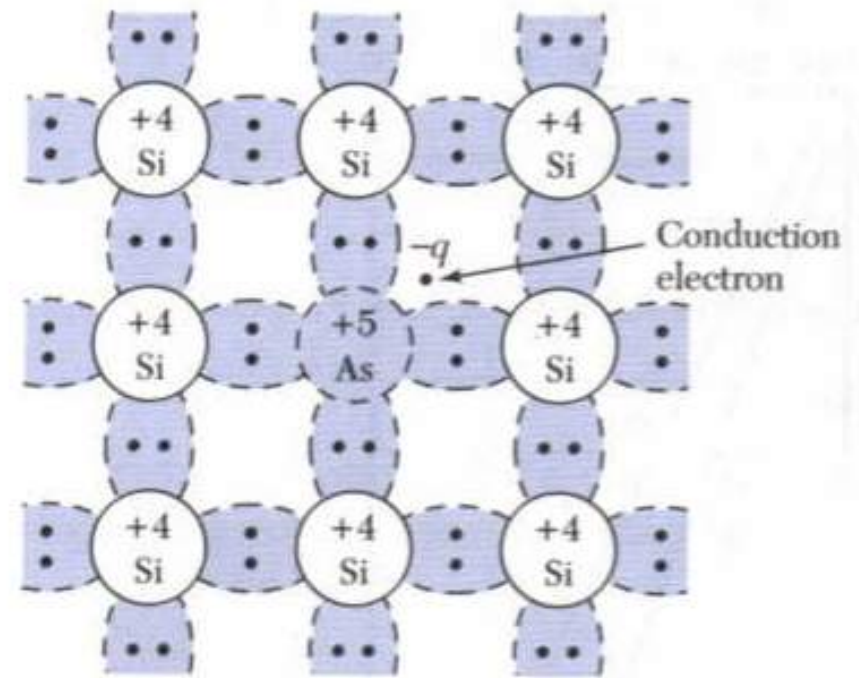
(b)

(a) Mạng tinh thể Si loại N với pha tạp chất bằng các nguyên tử donor As hay P (arsenic hay phosphorus).

(b) Mạng tinh thể Si loại P với pha tạp chất bằng các nguyên tử acceptor B (boron).

Donors

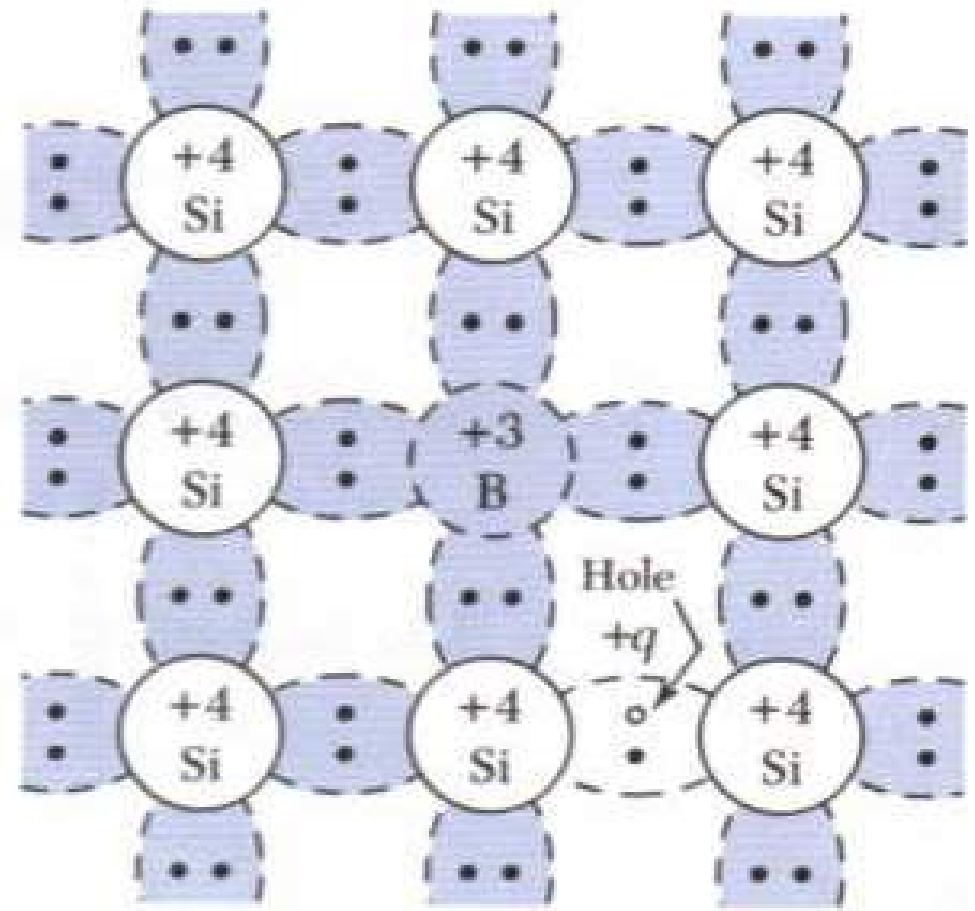
- When a semiconductor is doped with impurities
 - Extrinsic semiconductor
 - The impurity energy level are introduced
- N-type Si with donor
 - Arsenic atom with five valence electron



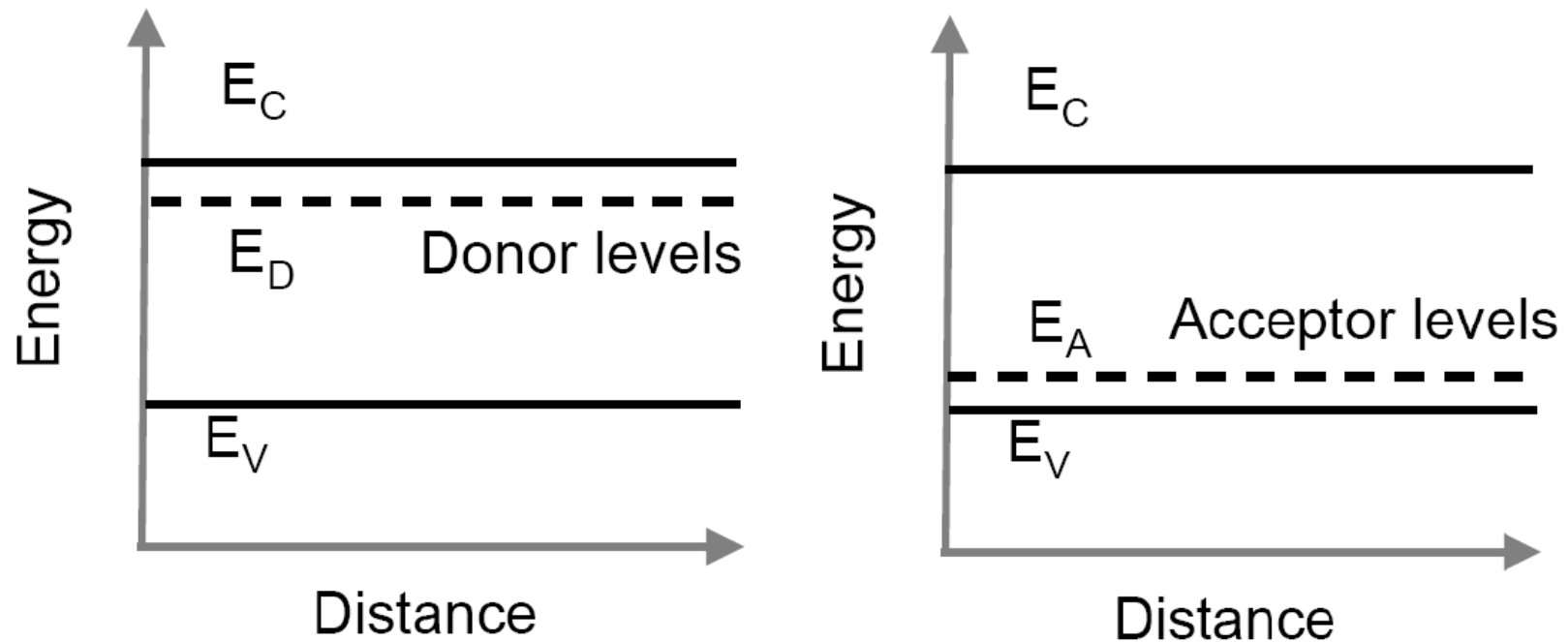
- Covalent bonds with its four neighboring Si atoms
- The fifth electron
 - Relatively small bonding energy to its host arsenic atom
 - Be “ionized” to become a conduction electron
- The arsenic atom is called a *donor*
- Silicon become n-type
 - Because the addition of the negative charge carrier

Acceptors

- P-type Si with acceptor
 - Boron atom with three valence electron
 - An additional electron is “accepted” to form four covalent bonds around the boron
 - A positive charged “hole” is created in the valence band
 - Boron is an *acceptor*



Giản đồ dải năng lượng của bán dẫn loại N và bán dẫn loại P



(a) Giản đồ dải năng lượng của bán dẫn loại N (b) Giản đồ dải năng lượng của bán dẫn loại P
Hình 4.20 Giản đồ dải năng lượng của bán dẫn loại N và bán dẫn loại P.

Khi ta tăng nồng độ donor thì mức Fermi sẽ dịch gần hơn tới đáy của dải dẫn. Do đó, hiệu số năng lượng giữa mức Fermi và dải dẫn ($E_C - E_F$) sẽ nhỏ hơn khi tăng nồng độ donor.

Tương tự như vậy với bán dẫn có pha acceptor: khi nồng độ acceptor càng cao thì mức Fermi sẽ chuyển đến càng gần dải hóa trị. Ở nhiệt độ phòng, kích thích nhiệt đủ cao để kích hoạt điện tử từ dải hóa trị sang dải dẫn. Kết quả là ta có được các ion chất nhận điện tử mang điện tích âm (do điện tử lấp vào) và hình thành các lỗ trong dải hóa trị. Mức năng lượng của acceptor (E_A) rất gần với dải hóa trị (hình 4.20b).

Năng lượng ion hóa của các tạp chất trong Si và GaAs

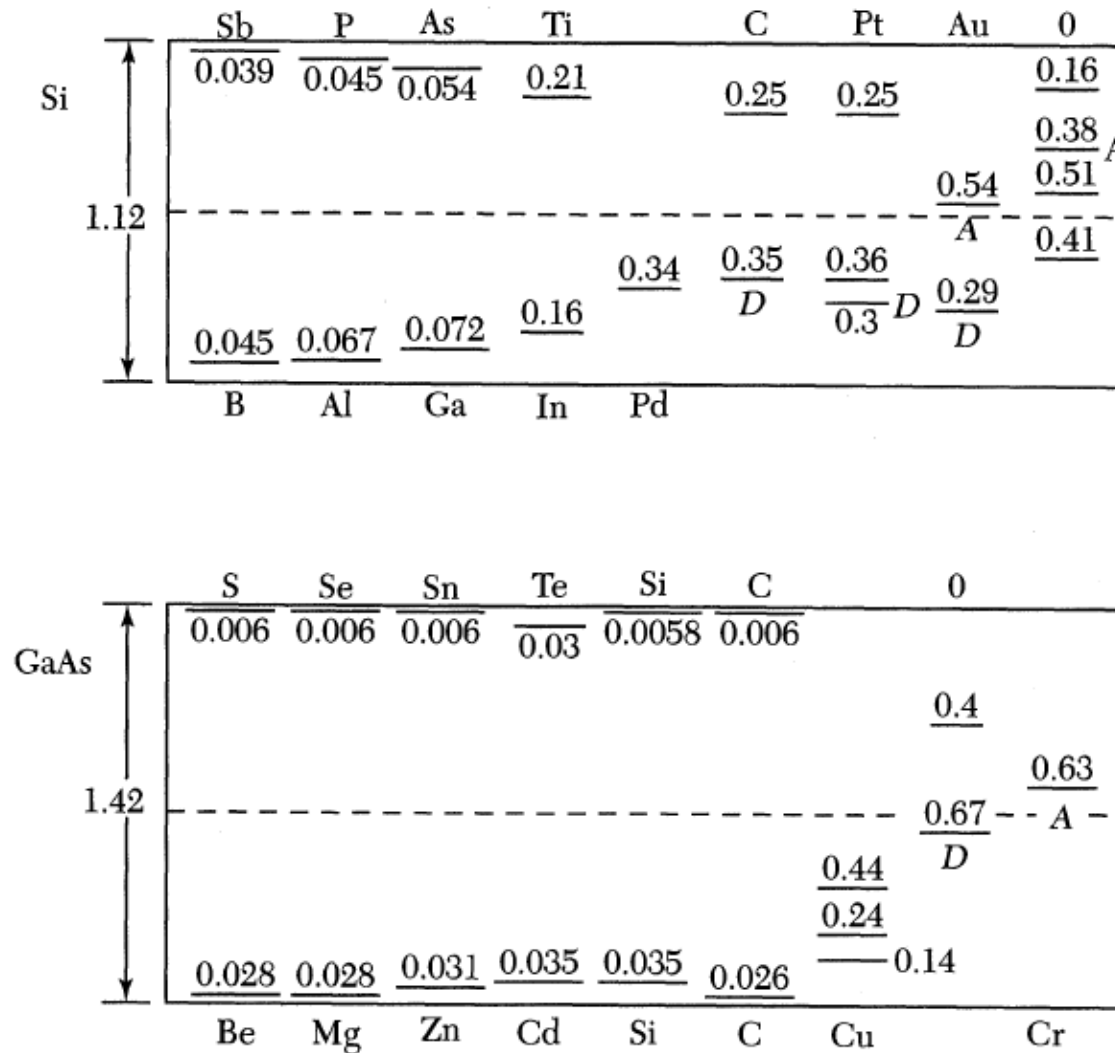


Fig. 24 Measured ionization energies (in eV) for various impurities in Si and GaAs. The levels below the gap center are measured from the top of the valence band and are acceptor levels unless indicated by *D* for donor level. The levels above the gap center are measured from the bottom of the conduction band and are donor levels unless indicated by *A* for acceptor level.⁸

2.7 Nồng độ hạt dẫn trong bán dẫn loại N và P

Bán dẫn loại N

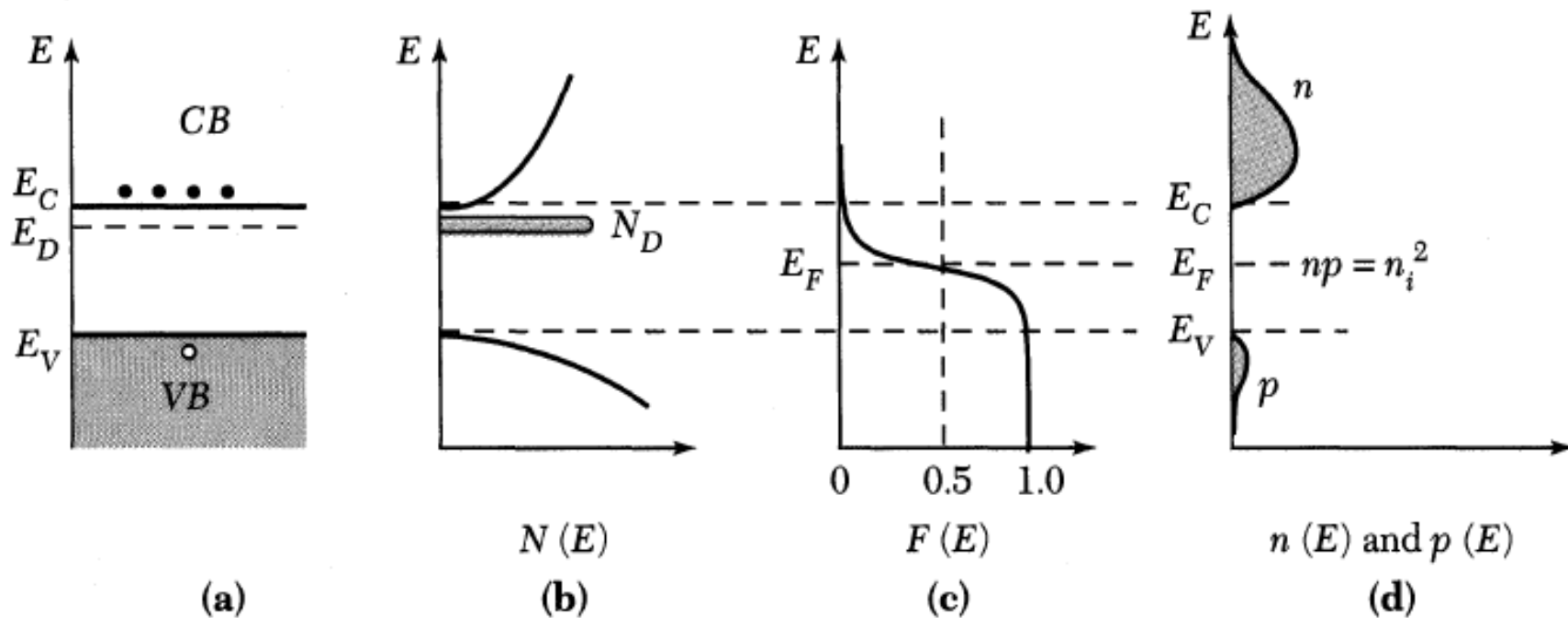


Fig. 26 n -Type semiconductor. (a) Schematic band diagram. (b) Density of states. (c) Fermi distribution function. (d) Carrier concentration. Note that $np = n_i^2$.

Quan hệ giữa nồng độ điện tử n và nồng độ lỗ trong bán dẫn

Với bán dẫn nội tại ở cân bằng nhiệt ta có các công thức sau:

$$p = n = n_i$$

và

$$p \cdot n = n_i^2$$

và với bán dẫn có pha tạp chất ở cân bằng nhiệt:

$$p \neq n, p \neq n_i, n \neq n_i$$

và

$$p \cdot n = n_i^2$$

$$n + N_A = p + N_D$$

Nếu ta giả sử rằng vật liệu chỉ được pha với donor, khi đó $N_A=0$ và ta còn phương trình: $n = p + N_D$. Do đó bán dẫn là bán dẫn loại N. Nồng độ lỗ bây giờ có thể được tính theo công thức sau (với chỉ số n để chỉ đang xét với bán dẫn loại N):

$$p_n = n_i^2 / n_n$$

Suy ra nồng độ điện tử của bán dẫn loại N:

$$n_n = \frac{1}{2} \left(N_D + \sqrt{N_D^2 + 4n_i^2} \right)$$

Định luật tác động khối lượng (Mass action law)

Còn được gọi là định luật tác dụng khối lượng:

- Trong điều kiện cân bằng nhiệt thì *tích số của nồng độ hạt dẫn âm và dương tự do là hằng số*, bất chấp lượng tạp chất donor và acceptor pha vào trong bán dẫn:

$$np = n_i^2$$

Chú ý: Định luật này luôn luôn đúng với bán dẫn không suy biến!

Nồng độ hạt dẫn trong bán dẫn N

- Nếu cả hai tạp chất donor và acceptor đồng thời hiện diện thì tạp chất nào có nồng độ cao hơn sẽ quyết định loại dẫn điện nào trong bán dẫn. Mức Fermi phải tự điều chỉnh để duy trì sự trung hòa điện tích, nghĩa là tổng điện tích âm (các điện tử và các acceptor bị ion hóa) phải bằng tổng điện tích dương (các lỗ và các donor bị ion hóa). Dưới điều kiện ion hóa hoàn toàn, ta có

$$n + N_A = p + N_D. \quad (30)$$

- Giải phương trình $np = n_i^2$ với (30) ta có

$$n = \frac{1}{2} \left[N_D - N_A + \sqrt{(N_D - N_A)^2 + 4n_i^2} \right], \quad (31)$$

$$p_n = n_i^2 / n_n. \quad (32)$$

Chỉ số n chỉ bán dẫn loại N

Nồng độ hạt dẫn trong bán dẫn P ($N_A > N_D$)

- Trong bán dẫn N: *hạt dẫn đa số* là điện tử và *hạt dẫn thiểu số* là lỗ.
- Tương tự, ta có được nồng độ lỗ (hạt dẫn đa số) và điện tử (hạt dẫn thiểu số) trong bán dẫn P:

$$p_p = \frac{1}{2} \left[N_A - N_D + \sqrt{(N_D - N_A)^2 + 4n_i^2} \right], \quad (33)$$

$$n_p = n_i^2 / p_p \quad (34)$$

Chỉ số p chỉ bán dẫn loại P

Bán dẫn có bổ chính (Compensated Semiconductor)

$$N_D > N_A$$

Assumption:
(n-type
semiconductor)

$$n_n = \frac{1}{2} \cdot \left[N_D + \sqrt{N_D^2 + 4n_i^2} \right]$$

$$N_D \gg n_i \Rightarrow n_n \approx N_D$$

Majority carriers
(n-type semiconductor)

$$p_n = \frac{n_i^2}{\frac{1}{2} \cdot \left[N_D + \sqrt{N_D^2 + 4n_i^2} \right]}$$

$$N_D \gg n_i \Rightarrow p_n \approx n_i^2 / N_D$$

Minority carriers
(n-type semiconductor)

$$N_A > N_D$$

Assumption:
(p-type
semiconductor)

$$p_p = \frac{1}{2} \cdot \left[N_A + \sqrt{N_A^2 + 4n_i^2} \right]$$

$$N_A \gg n_i \Rightarrow p_p \approx N_A$$

Majority carriers
(p-type semiconductor)

$$n_p = \frac{n_i^2}{\frac{1}{2} \cdot \left[N_A + \sqrt{N_A^2 + 4n_i^2} \right]}$$

$$N_A \gg n_i \Rightarrow n_p \approx n_i^2 / N_A$$

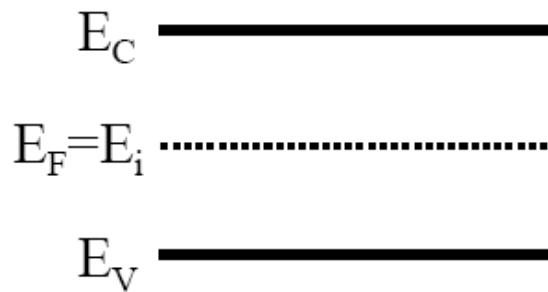
Minority carriers
(p-type semiconductor)

Mức Fermi là hàm của nhiệt độ và nồng độ tạp chất

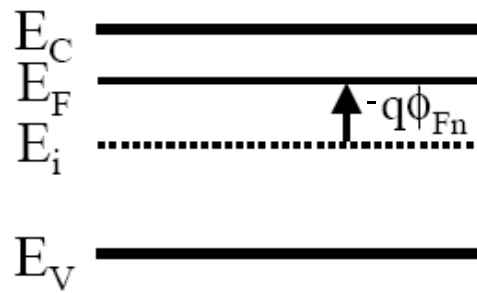
- Vị trí của mức Fermi trong giản đồ dải năng lượng

$$E_F = E_C - kT \ln (N_C/N_D) \text{ với bán dẫn N}$$

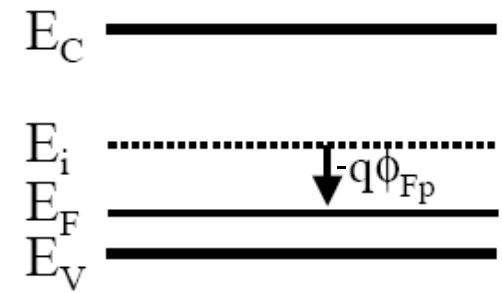
$$E_F = E_V + kT \ln (N_V/N_A) \text{ với bán dẫn P}$$



Intrinsic



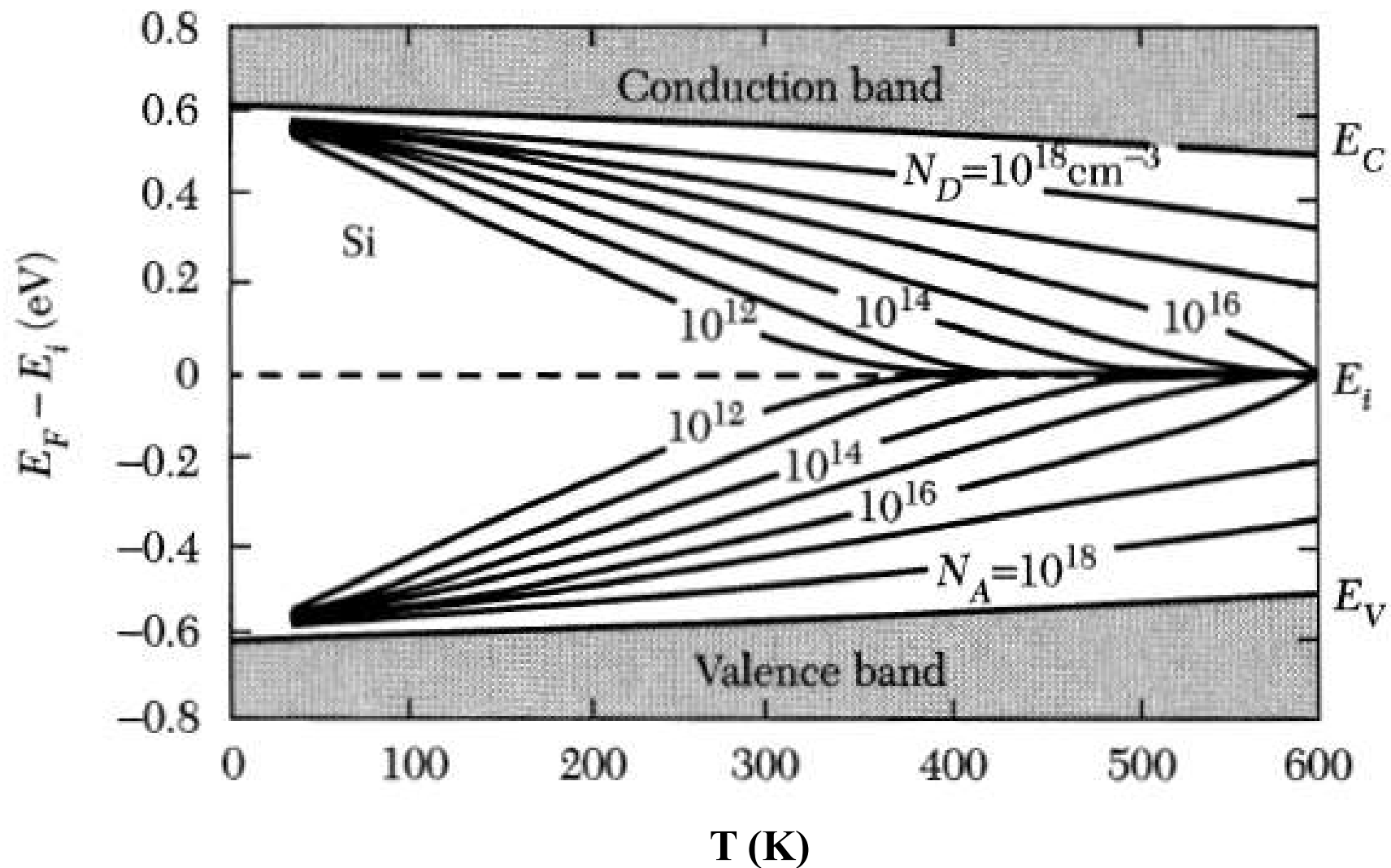
N-type



P-type

- Thế Fermi $\phi_F = (E_i - E_F)/q$
 - Dùng để xác định mức Fermi,
 - Dùng để viết phương trình n và p gọn hơn
 - Dấu của thế Fermi cho ta biết bán dẫn loại gì.
- Thế khối $\phi_b = -\phi_F = (E_F - E_i)/q$

Hình 20 (a) Mức Fermi trong Si là hàm của nhiệt độ và nồng độ tạp chất



Ảnh hưởng của nhiệt độ đến nồng độ hạt dẫn (Td: Si loại N, xét n_n)

□ Ở nhiệt độ thấp

- Nhiệt năng không đủ ion hóa tất cả các tạp chất donor
- Một số điện tử bị “đóng băng” ở mức donor
- Nồng độ điện tử < nồng độ donor

□ Khi tăng nhiệt độ

- Điều kiện để đạt được ion hóa hoàn toàn

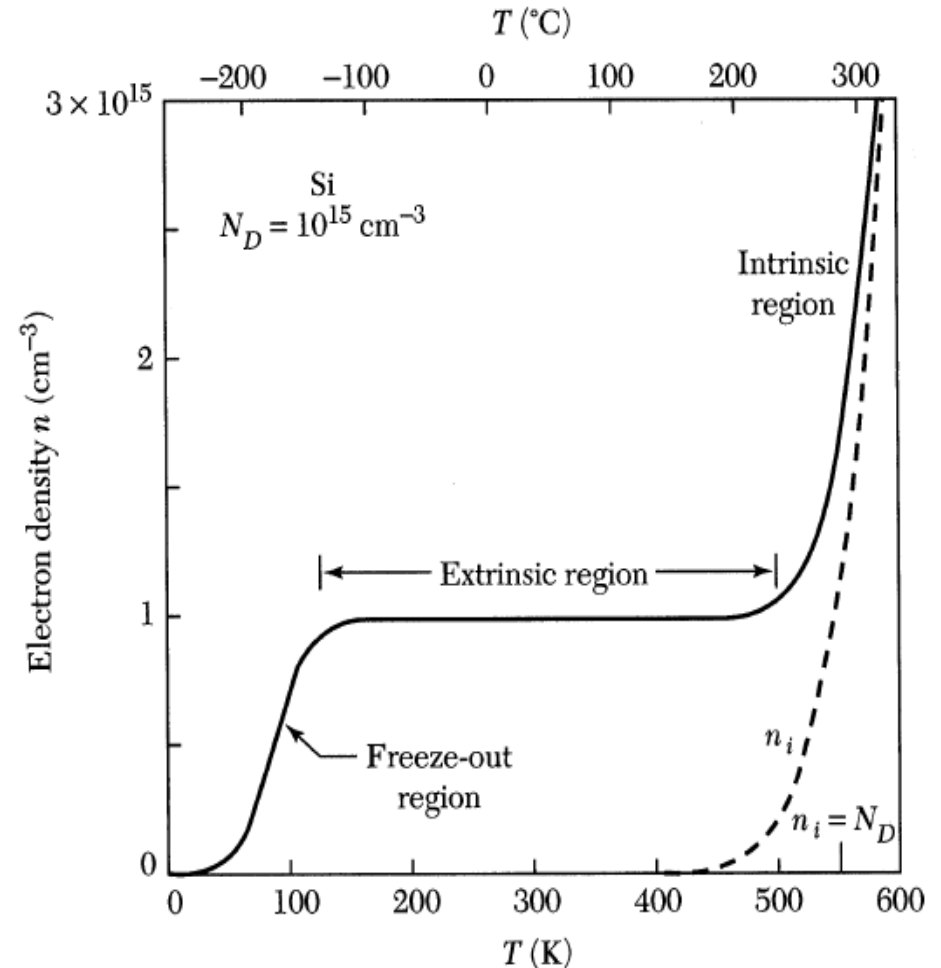
$$n_n = N_D$$

□ Khi tăng nhiệt độ thêm nữa

- Nồng độ điện tử không đổi trên 1 dải rộng nhiệt độ
- Miền ngoại lai

□ Khi tăng nhiệt độ hơn nữa

- Nồng độ hạt dẫn nội tại trở nên có thể so sánh được với nồng độ donor
- Bán dẫn trở thành bán dẫn nội tại
- Nhiệt độ này phụ thuộc vào N_D và E_g



Bán dẫn suy biến và không suy biến

- Phần lớn các dụng cụ điện tử, nồng độ điện tử và lỗ nhỏ hơn nhiều mật độ trạng thái hiệu dụng trong dải dẫn hay dải hóa trị. Mức Fermi tối thiểu cao hơn dải hóa trị $3kT$ hay thấp hơn dải dẫn $3kT$. Trong trường hợp này ta gọi ***bán dẫn không suy biến*** (non-degenerated semiconductor).
- Khi pha rất nhiều tạp chất, các nồng độ tạp chất cao hơn các mật độ trạng thái hiệu dụng trong dải hóa trị và dải dẫn. Trong trường hợp như vậy ta có ***bán dẫn suy biến*** (degenerated semiconductor) và các mức Fermi dịch vào dải dẫn hay dải hóa trị. Dưới những điều kiện như vậy ta không thể áp dụng các phương trình đã được suy ở phần trước.
- Tuy nhiên, việc chế tạo bán dẫn suy biến cũng cần thiết. Thí dụ chế tạo các diode LASER cần đảo ngược mật độ, mà có thể chỉ đạt được việc này nếu bán dẫn là loại suy biến.