

NOTIONS DE

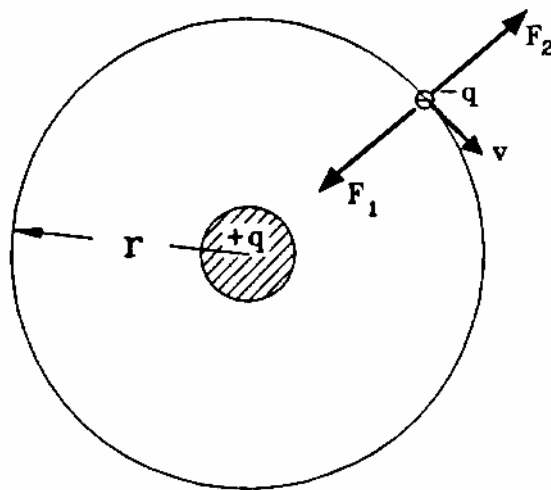
PHYSIQUE DU SOLIDE

Joël Redoutey

Structure de l'atome isolé

Modèle de Bohr

exemple : atome d'hydrogène



Force d'attraction (loi de Coulomb)

$$F_1 = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

Force centrifuge

$$F_2 = \frac{m_0 v^2}{r}$$

avec m_0 : masse de l'électron

v : vitesse de l'électron

L'orbite est stationnaire si $F_1 = F_2$

$$\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{m_0 v^2}{r}$$

(1)

Energie de l'électron sur son orbite

Energie potentielle: c'est le travail qu'il faut fournir contre le champ pour amener l'électron à l'infini où son énergie potentielle est nulle.

$$U(r) = -\int_r^\infty F_1 dr = -\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

Energie cinétique:

$$E_{cin} = \frac{1}{2} m_0 v^2$$

Energie de l'électron sur son orbite de rayon r

$$E = \frac{1}{2} m_0 v^2 - \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

or

$$\boxed{\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{m_0 v^2}{r}}$$

$$\implies E = -\frac{q^2}{8\pi\epsilon_0 r}$$

Chaque orbite correspond à un niveau d'énergie bien défini.

Quantification des niveaux d'énergie

Toutes les orbites ne sont pas possibles et les valeurs possibles de l'énergie de l'électron sont quantifiées.

L'énergie d'un électron situé sur l'orbite n (n entier ≥ 1) est donnée par :

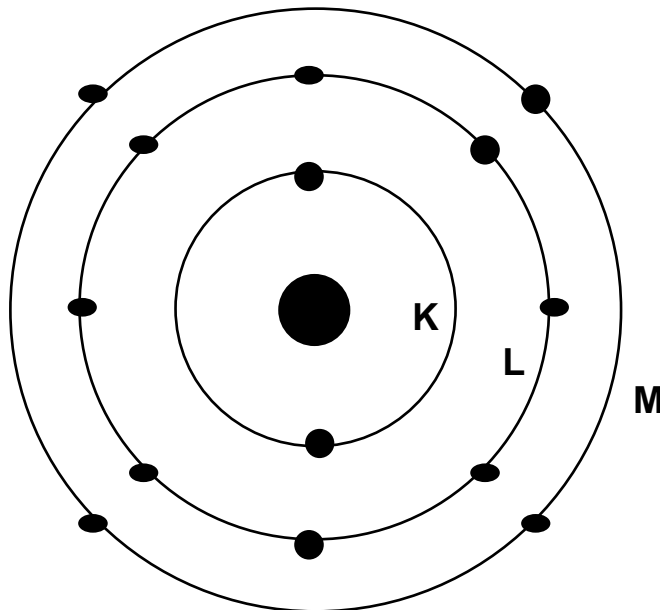
$$E_n = -\frac{q^4 m_0}{8h^2 \epsilon_0^2 n^2}$$

h est la constante de Planck, n est appelé nombre quantique.

Une orbite de nombre quantique n ne peut accueillir que $2n^2$ électrons.

Exemple: le Silicium Z=14

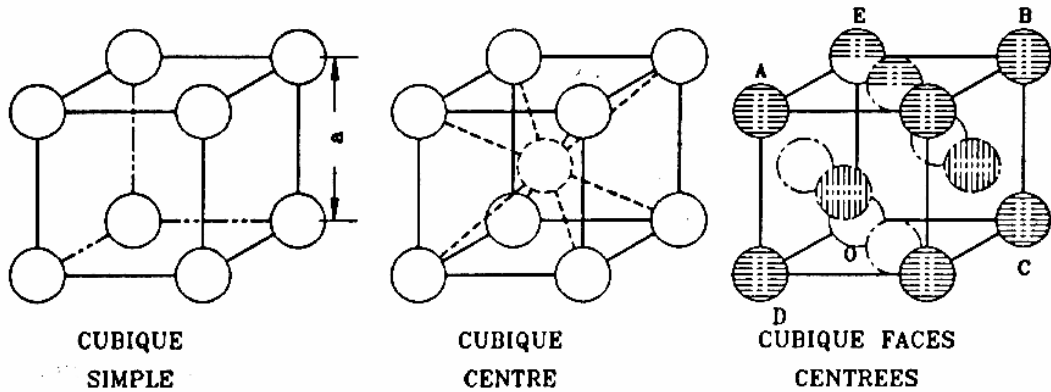
n=1	couche K	2 électrons	couche complète
n=2	couche L	8 électrons	couche complète
n=3	couche M	4 électrons	couche incomplète



Cas d'un cristal

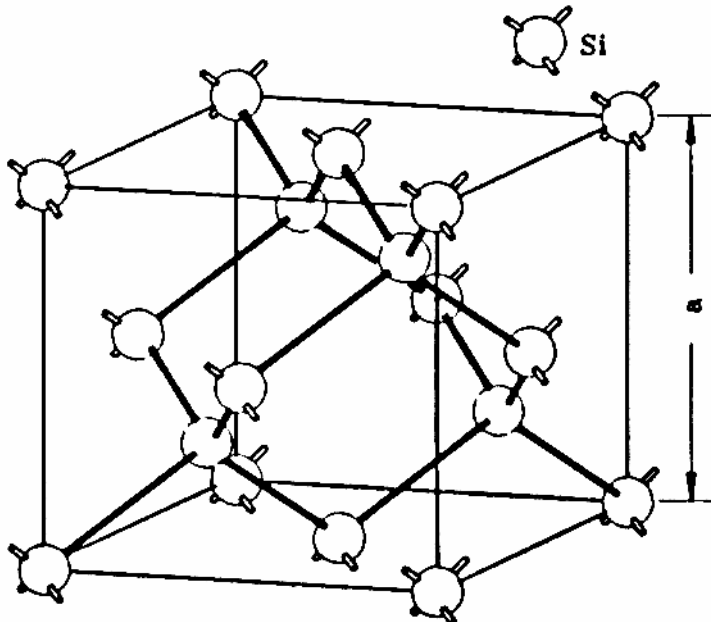
Les atomes sont rangés aux noeuds d'un réseau périodique.

Exemple : Système cubique (cas de la plupart des semi-conducteurs)



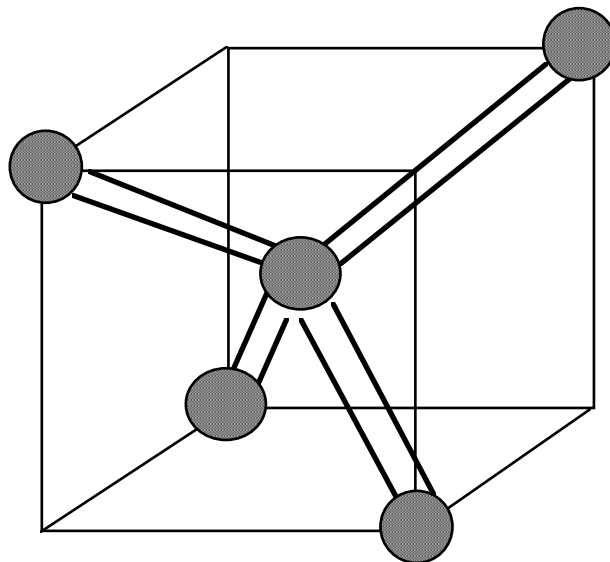
La structure diamant (C, Ge, Si ...)

Deux réseaux cubiques faces centrées, imbriqués, décalés du quart de la diagonale



Liaisons covalentes

Chaque atome est entouré de 4 voisins



Silicium

Colonne IV : 4 électrons périphériques

Chaque atome met un électron périphérique en commun avec chacun de ses voisins -----> liaison covalente

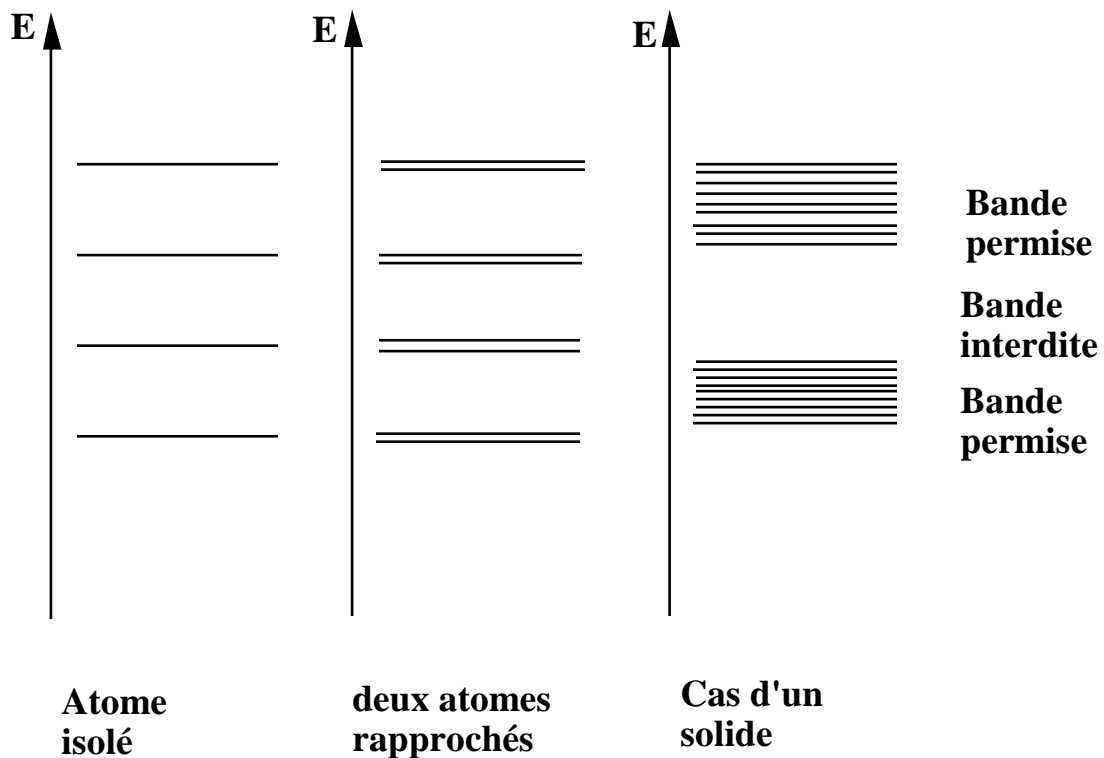
Bandes d'énergie

Interaction entre deux atomes ---> dédoublement de chaque niveau d'énergie

Dans un cristal ---> grand nombre de niveaux très proches:

Bandes d'énergie permise

Niveau d'énergie d'un électron



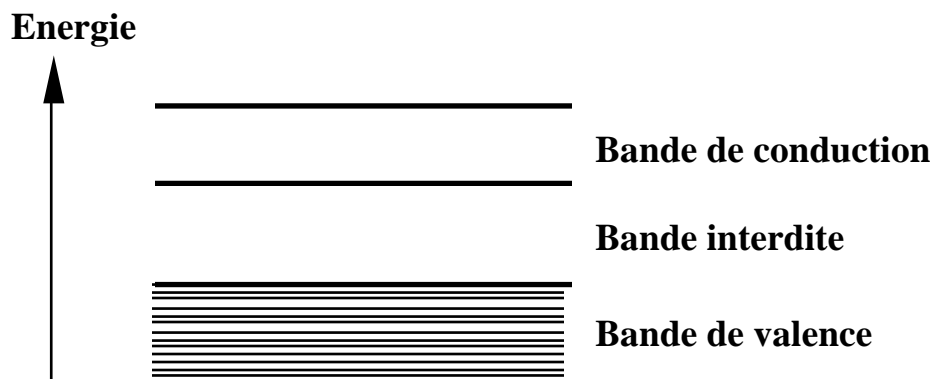
Définition des Bandes

Dans un SC intrinsèque non excité, les électrons engagés dans les liaisons covalentes occupent les niveaux d'énergie d'une bande permise appelée **bande de valence**.

Cette bande est pleine (ou saturée), c'est à dire qu'il y a autant d'électrons que de places offertes.

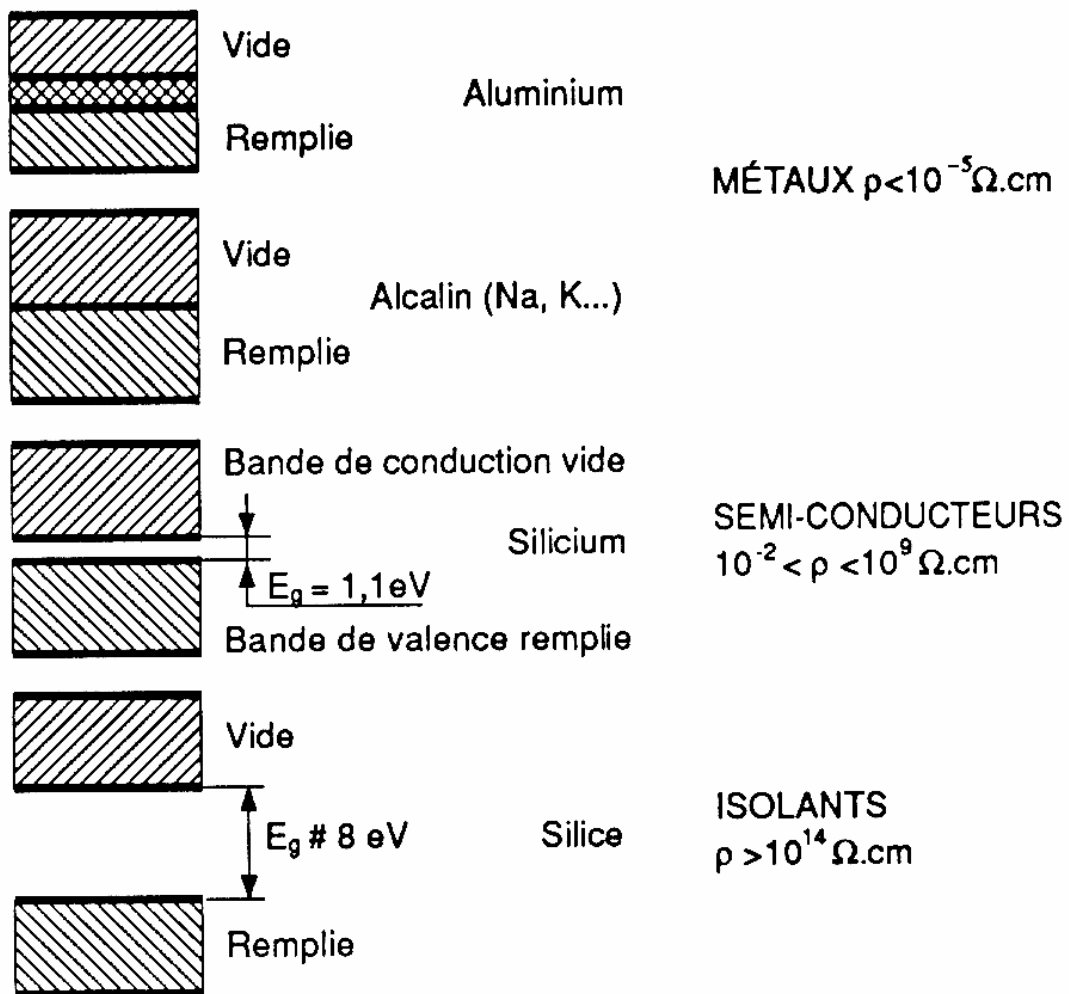
La bande d'énergie permise immédiatement supérieure s'appelle la **bande de conduction**.

Ces deux bandes sont séparées par la **bande interdite** ou **Band Gap de largeur E_G** .



Conducteurs et isolants

Une bande d'énergie pleine (toutes les places offertes sont occupées) ne conduit pas l'électricité

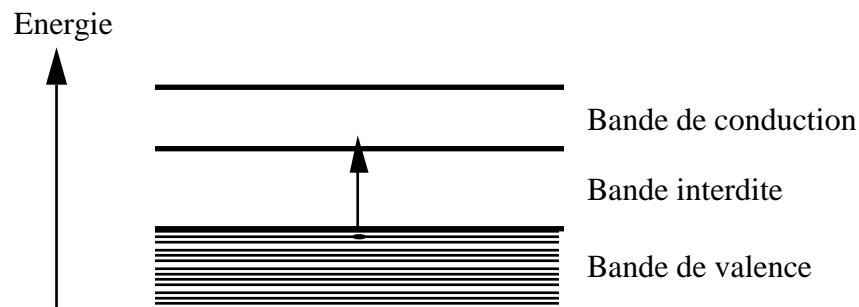


Paire électron - trou

Semi-conducteur : E_G faible # 1eV

Apport d'énergie $> E_G$ ---> Casser une liaison covalente

- Un électron passe dans la bande de conduction
- Un trou (place vacante) se crée dans la bande de valence



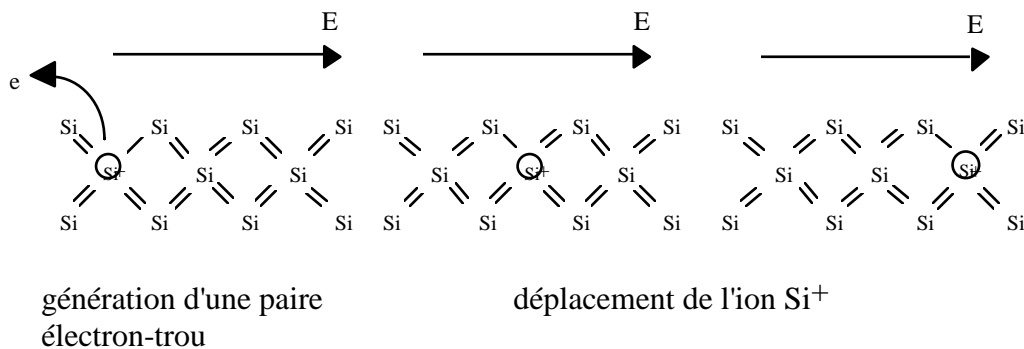
Apport d'énergie:

Agitation thermique, lumière (photons), champ électrique intense,...

La recombinaison d'un électron libre et d'un trou génère une certaine quantité d'énergie (par exemple sous forme radiative $E_G = h\nu$)

Conduction dans un semi-conducteur intrinsèque

On applique un champ électrique E



Sous l'action du champ électrique il y a :

- déplacement de l'électron libre qui remonte le champ
- déplacement apparent de l'ion Si^+ qui descend le champ

porteurs libres : charges mobiles (électrons et trous) capables de véhiculer le courant électrique.

concentration intrinsèque n_i de porteurs libres:

$$n = p = n_i = A T^{3/2} \exp\left(-\frac{E_G}{2k_B T}\right) \quad \text{en cm}^{-3}$$

n = concentration d'électrons

p = concentration de trous

A = constante spécifique du matériau ($\text{cm}^{-3} \cdot \text{°K}^{-3/2}$)

T = température thermodynamique (°K)

E_G = largeur de bande interdite (eV)

k_B = constante de Boltzmann ($8,6 \cdot 10^{-5} \text{ eV } \cdot \text{°K}^{-1}$)

Ordres de grandeurs à température ordinaire:

pour le germanium $n_i \# 10^{13} \text{ cm}^{-3}$

pour le silicium $n_i \# 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

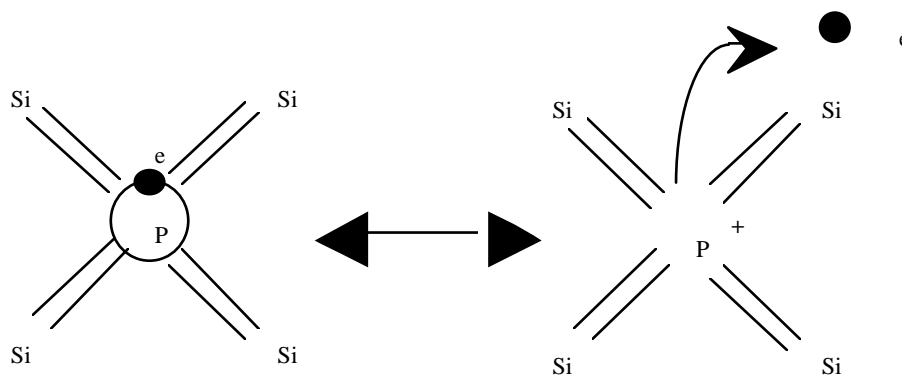
pour l'arséniure de gallium $n_i \# 10^7 \text{ cm}^{-3}$

Dopage

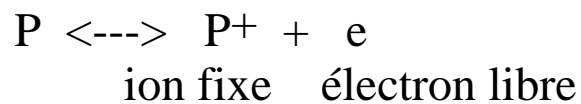
Introduction d'impureté dans le cristal

Semi-conducteur de type N

Dopage avec des atomes pentavalents (5 électrons périphériques) comme le Phosphore.



Le Phosphore apporte des électrons libres ---> donneur

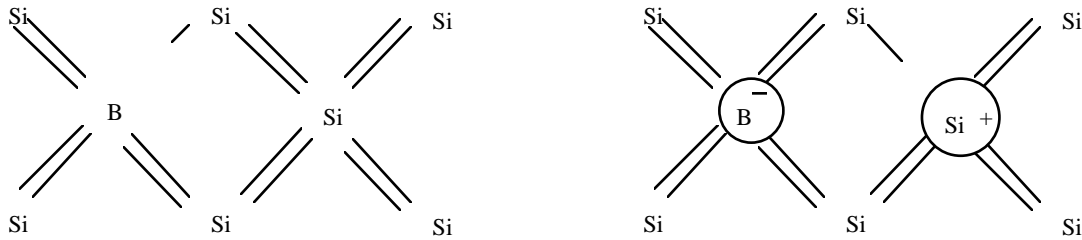


Concentration en électrons libres = concentration en atomes de P

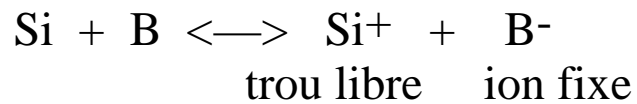
$$\mathbf{n = N_D}$$

Semi-conducteur de type P

Dopage avec des atomes trivalents (3 électrons périphériques) par exemple avec du Bore.



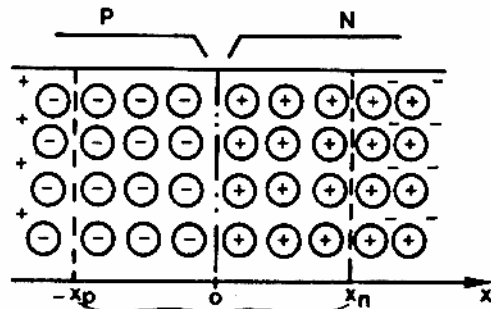
Le Bore apporte des trous libres ---> **Accepteur** d'électrons



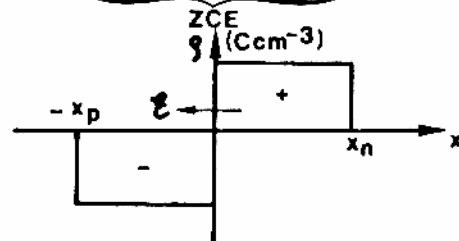
Concentration en trous libres = concentration en atomes de B

$$\mathbf{p = N_A}$$

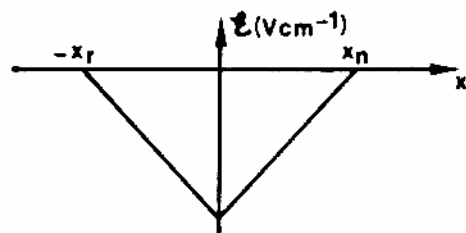
Jonction PN à l'équilibre



(a)

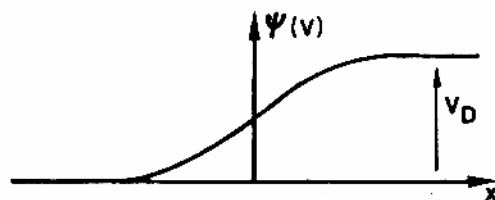


(b)



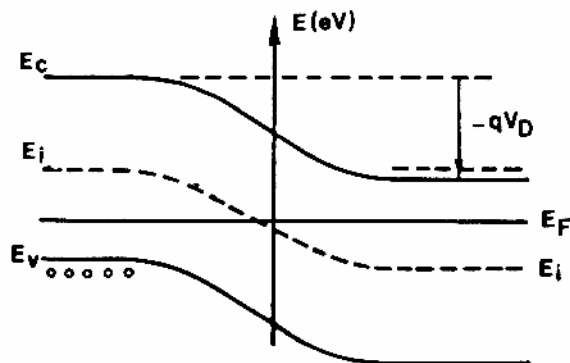
(c)

$$\frac{d\mathcal{E}}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon\epsilon_0}$$



(d)

$$-\frac{d\Psi}{dx} = \mathcal{E}$$



(e)

$$E_i = -q\Psi$$