

Les composants à semi-conducteur

D'après S. H. Simon, *The Oxford Solid State Basics*, Oxford University Press, 2019,
et *Le Cours de physique de Feynman*, tome III : *Mécanique quantique*, chap. 14., Dunod, 2021.

L'essentiel à retenir

À rédiger en dernier ; pas encore écrit.

1 Notations et rappels

1.1 Conduction électrique classique : le modèle de Drude

En 1900, Drude propose un modèle cinétique de la conduction électrique, qui rend compte de la résistivité des métaux.

Modèle de Drude

Les électrons de conduction forment un gaz libre, qui subit des collisions avec les noyaux, de probabilité $1/\tau$ par unité de temps.

Le modèle repose sur trois hypothèses : les électrons n'interagissent ni entre eux ni avec le potentiel des ions entre deux collisions ; les collisions sont instantanées, et après chaque collision la vitesse moyenne est nulle ; la statistique est classique.

Remarque. Le temps de relaxation τ dépend de la température (vibrations du réseau) et de la concentration en défauts, mais, dans le modèle, il ne dépend pas du champ $\mathbf{E}$.

Force de frottement. On postule une force linéaire $\mathbf{F}_f = -\Gamma\mathbf{v}$, où Γ est un coefficient en $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$. L'électron vérifie alors

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -e\mathbf{E} - \Gamma\mathbf{v}. \quad (1)$$

Pendant dt , chaque électron subit une collision avec la probabilité dt/τ , ce qui donne pour la quantité de mouvement moyenne $d\langle\mathbf{p}\rangle/dt = -e\mathbf{E} - \langle\mathbf{p}\rangle/\tau$. En comparant à (1), avec $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$, on obtient $\Gamma = m/\tau$. Ce coefficient est positif ; le signe $-1/\tau$ n'apparaît que pour $\mathbf{v}$ seule, après division par m . On retrouve l'équation

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -e\mathbf{E} - \frac{m\mathbf{v}}{\tau}. \quad (2)$$

En régime permanent, avec n électrons par unité de volume, $\mathbf{j} = -nev$ donne la loi d'Ohm :

$$\mathbf{j} = \gamma\mathbf{E} \quad \text{avec} \quad \gamma = \frac{ne^2\tau}{m}. \quad (3)$$

Ordres de grandeur (cuivre). Avec $n \approx 8.5 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$ et $\tau \approx 2.5 \times 10^{-14} \text{ s}$, la relation (3) donne $\gamma \approx 6 \times 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$, valeur correcte. Avec la vitesse de Fermi $v_F \approx 1.6 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, le libre parcours moyen est $\ell = v_F\tau \approx 40 \text{ nm}$.

Le modèle explique la loi d'Ohm, ainsi que l'augmentation de la résistivité avec la température : quand l'agitation du réseau augmente, τ diminue, donc γ diminue.

1.2 Échec du modèle classique et description quantique

Chacun des échecs de Drude tient à l'absence de structure en bandes et de statistique quantique :

- **Chaleur spécifique.** Seuls les électrons voisins de E_F peuvent être excités par l'agitation thermique. Leur contribution est réduite à $(\pi^2/2)T/T_F$ de la valeur classique, soit environ 2 % pour le cuivre à température ambiante.
- **Semi-conducteurs.** Les électrons de valence remplissent une bande entière, séparée de la suivante par un gap E_g . Pour le silicium, $E_g \approx 1.1 \text{ eV}$: seuls quelques électrons franchissent le gap, avec $n_i \approx 10^{16} \text{ m}^{-3}$. Comme $\gamma \propto \exp(-E_g/2k_B T)$, la conductivité croît avec T .
- **Isolants.** Même mécanisme, avec un gap plus large : pour le diamant, $E_g \approx 5.5 \text{ eV}$, et $\exp(-E_g/2k_B T)$ est négligeable à 300 K.

- **Effet Hall.** Une bande presque pleine se comporte comme des porteurs de charge positive, les trous.

Ces points sont développés dans les sections suivantes.

En résumé : Drude rend compte de la conduction des métaux, mais suppose n fixé et ignore la structure en bandes. Les semi-conducteurs et les isolants s'expliquent par le gap et la statistique quantique.

2 Des niveaux atomiques aux bandes d'énergie

2.1 Atome isolé

Pour un atome isolé, les états stationnaires d'un électron sont solutions de l'équation de Schrödinger :

$$H\psi = E\psi, \quad \text{avec} \quad H = \frac{p^2}{2m} + V(r). \quad (4)$$

Le potentiel $V(r)$ est celui du noyau : seules certaines valeurs de l'énergie sont alors admises. Le spectre est donc discret, $E_1 < E_2 < \dots$, et chaque état est repéré par des nombres quantiques n , l , m_l et m_s .

Le principe de Pauli impose que deux électrons ne peuvent pas occuper le même état quantique. Pour une orbitale donnée, il n'y a donc place que pour deux électrons, de spins opposés. Les électrons remplissent les états par énergie croissante, ce qui définit la configuration électronique de l'atome.

Par exemple, le silicium ($Z = 14$) a pour configuration $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$. Les électrons de cœur, en 1s, 2s et 2p, sont fortement liés au noyau. Les quatre électrons de valence, en 3s et 3p, déterminent les liaisons et les propriétés de conduction. Le carbone et le germanium en ont aussi quatre, ce qui explique leur comportement comparable dans la même colonne du tableau périodique.

2.2 Couplage des atomes

2.3 Cristal et théorème de Bloch

2.4 Remplissage et niveau de Fermi

2.5 Classification des matériaux

2.6 Semi-conducteur intrinsèque

En résumé : À rédiger.

3 Dopage et jonction PN

3.1 Donneurs et accepteurs

3.2 Porteurs majoritaires et minoritaires

3.3 Formation de la jonction

3.4 Polarisation et caractéristique

En résumé : À rédiger.

4 Le transistor bipolaire

4.1 Effet transistor

4.2 Régimes de fonctionnement

En résumé : À rédiger.

5 Les transistors à effet de champ

5.1 Le JFET

5.2 Le MOSFET

En résumé : À rédiger.

6 Synthèse

À retenir :

À rédiger : les grandeurs qui distinguent les composants.

	Diode	BJT	MOSFET
Commande	tension	courant de base	tension de grille
Principe	jonction PN	injection dans la base	canal induit
Exemple type	redresseur	amplificateur	commutateur