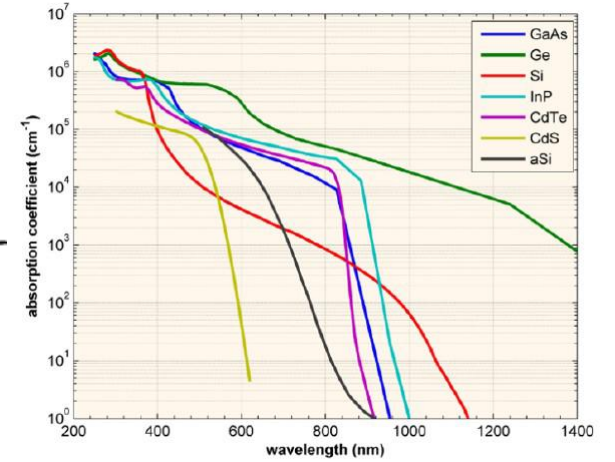
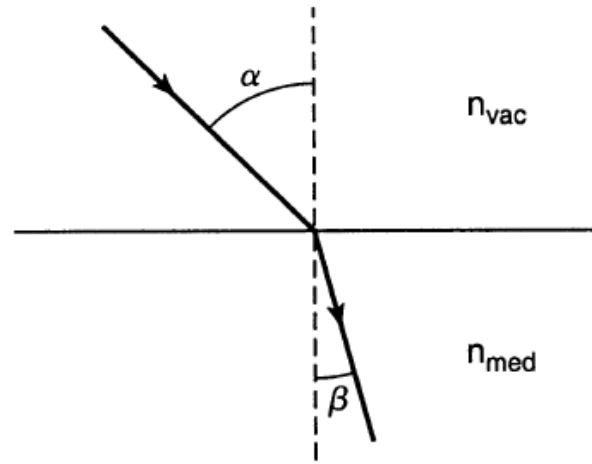


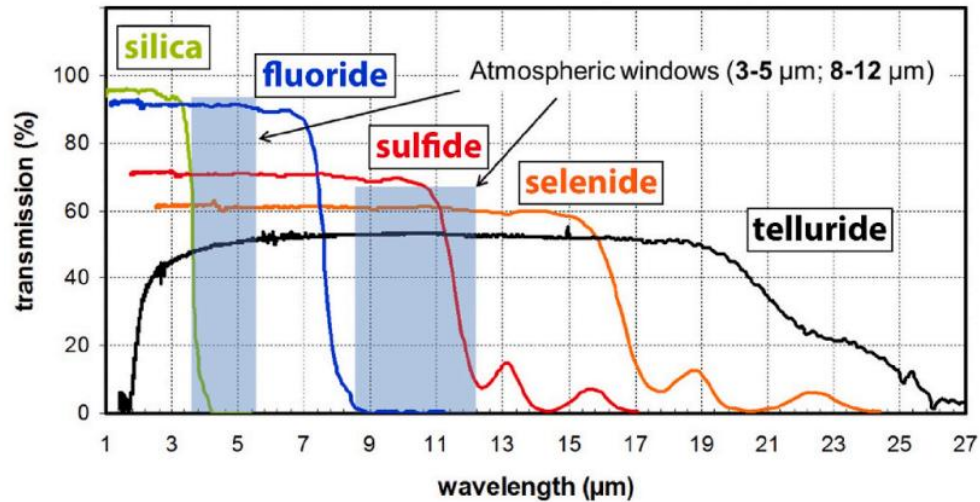
Les semiconducteurs

- Rappel: theorie de bande
- Conduction dans les semiconducteurs intrinsèques
- Le dopage
- Mobilité en fonction de la température
- Absorption de la lumière
- Semiconducteur direct et indirect

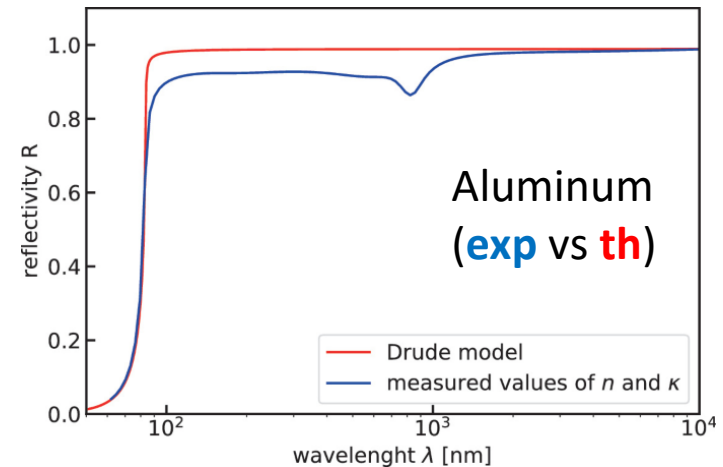
Le cours de la semaine passée en bref



Réfraction et absorption de la lumière



Index de réfraction complexe



Modèle de Drude-Lorentz

Interaction lumière/plasma

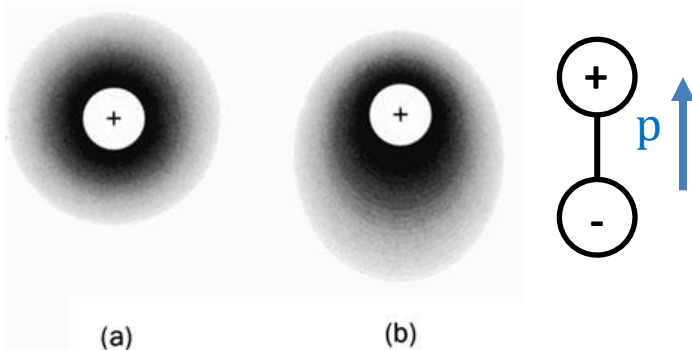
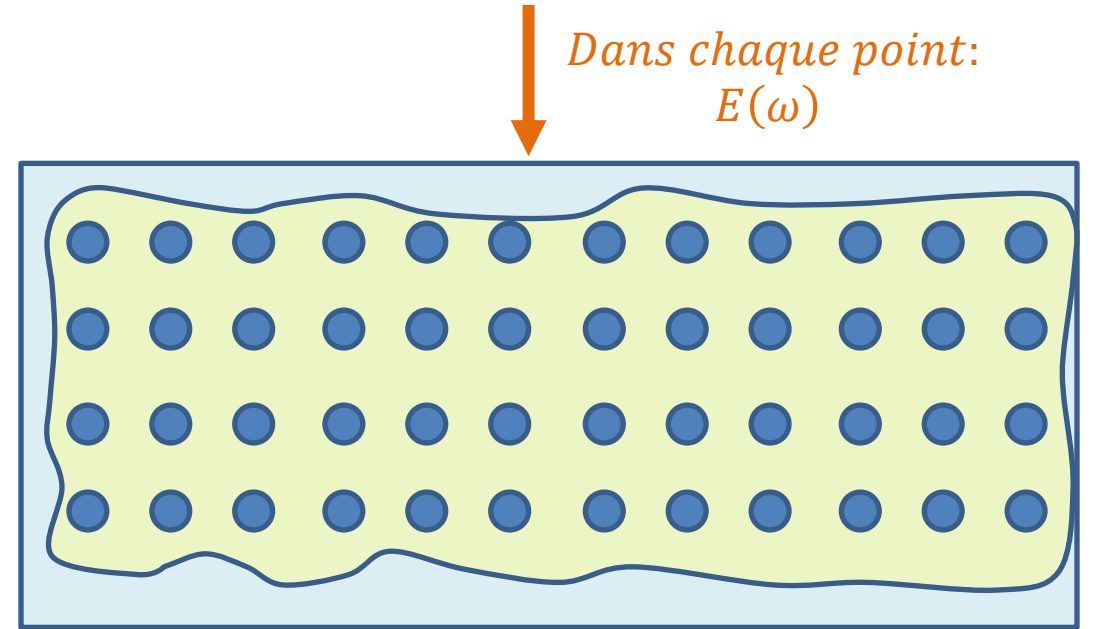
$$\left\{ \begin{array}{l} m \frac{d^2 x}{dt^2} + m\gamma \frac{dx}{dt} = -e * E \\ E(\omega) = E_0 \exp(-i\omega t) \end{array} \right.$$



$$\left\{ \begin{array}{l} x(\omega) = x_0 \exp(-i\omega t) \\ x_0 = - \frac{eE_0}{m} * \frac{1}{\omega^2 - i\gamma\omega} \end{array} \right.$$

Les charges oscillent dans le temps

L'amplitude d'oscillation est lié à la fréquence angulaire et la «friction» du milieu



L'oscillation de charge est associé à la polarisation du matériau:

$$P(\omega) = N * e * \Delta x = N * e * \left(- \frac{eE(\omega)}{m} * \frac{1}{\omega^2 - i\gamma\omega} \right)$$

Réfectivité d'un plasma

$$\left\{ \begin{array}{l} P(\omega) = N * e * \Delta x = - \frac{Ne^2 E(\omega)}{m} * \frac{1}{\omega^2 - i\gamma\omega} \\ D(\omega) = \epsilon_0 * E(\omega) + P(\omega) = \epsilon_0 * \epsilon_r * E(\omega) \end{array} \right.$$



$$\epsilon_r = 1 - \frac{Ne^2}{m\epsilon_0} * \frac{1}{\omega^2 - i\gamma\omega}$$

$$\epsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - i\gamma\omega}$$

$$\text{ou } \omega_p = \sqrt{\frac{Ne^2}{m\epsilon_0}}$$

Fréquence du plasma

Exercice (10 minutes)

Décrire la réflectivité en fonction de ω/ω_p dans le cas d'un milieu non-absorbant ($\kappa = 0, \epsilon_r = \sqrt{n}$)

$$\epsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - i\gamma\omega} \quad \text{ou } \omega_p = \sqrt{\frac{Ne^2}{m\epsilon_0}}$$

$$\tilde{\epsilon}_r = \tilde{n}^2$$

$$R = \frac{(n-1)^2 + \kappa^2}{(n+1)^2 + \kappa^2}$$

Réfectivité d'un plasma

$$\left\{ \begin{array}{l} P(\omega) = N * e * \Delta x = - \frac{Ne^2 E(\omega)}{m} * \frac{1}{\omega^2 - i\gamma\omega} \\ D(\omega) = \epsilon_0 * E(\omega) + P(\omega) = \epsilon_0 * \epsilon_r * E(\omega) \end{array} \right.$$



$$\epsilon_r = 1 - \frac{Ne^2}{m\epsilon_0} * \frac{1}{\omega^2 - i\gamma\omega}$$

$$\epsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - i\gamma\omega}$$

$$\text{ou } \omega_p = \sqrt{\frac{Ne^2}{m\epsilon_0}}$$

Fréquence du plasma

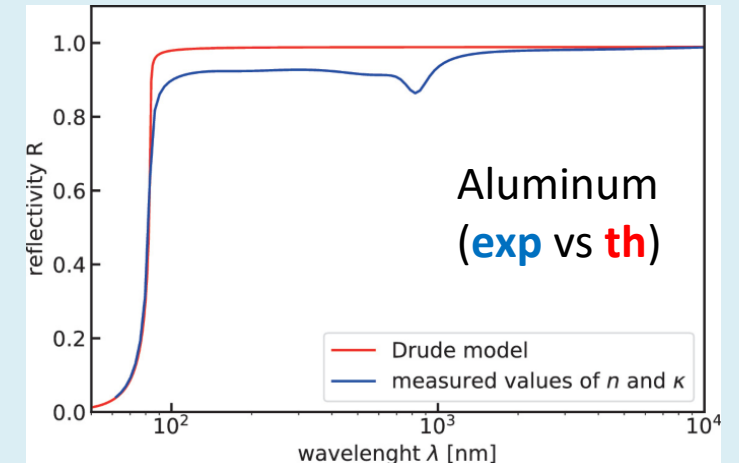
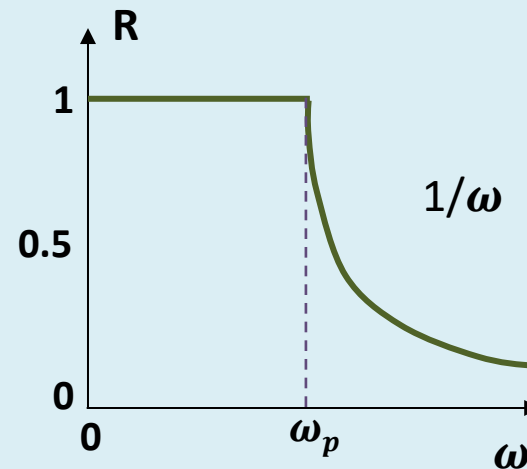
Exercice (10 minutes)

$$\epsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - i\gamma\omega} \quad \text{ou } \omega_p = \sqrt{\frac{Ne^2}{m\epsilon_0}}$$

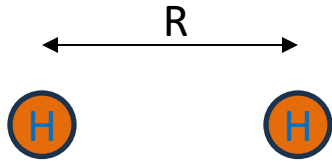
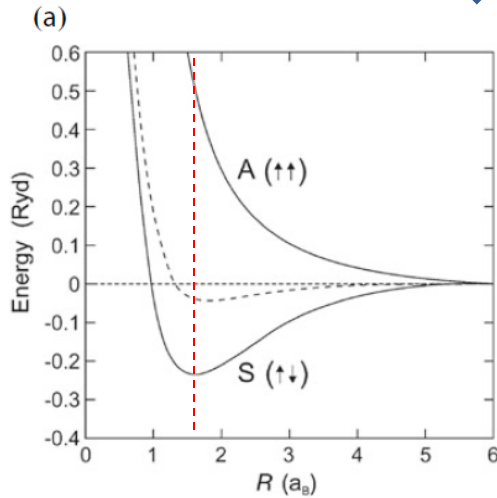
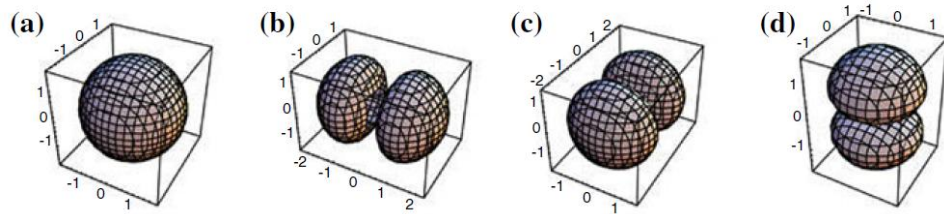
$$\tilde{\epsilon}_r = \tilde{n}^2$$

$$R = \frac{(n-1)^2 + \kappa^2}{(n+1)^2 + \kappa^2}$$

Décrire la réflectivité en fonction de ω/ω_p dans le cas d'un milieu non-absorbant ($\kappa = 0, \epsilon_r = \sqrt{n}$)

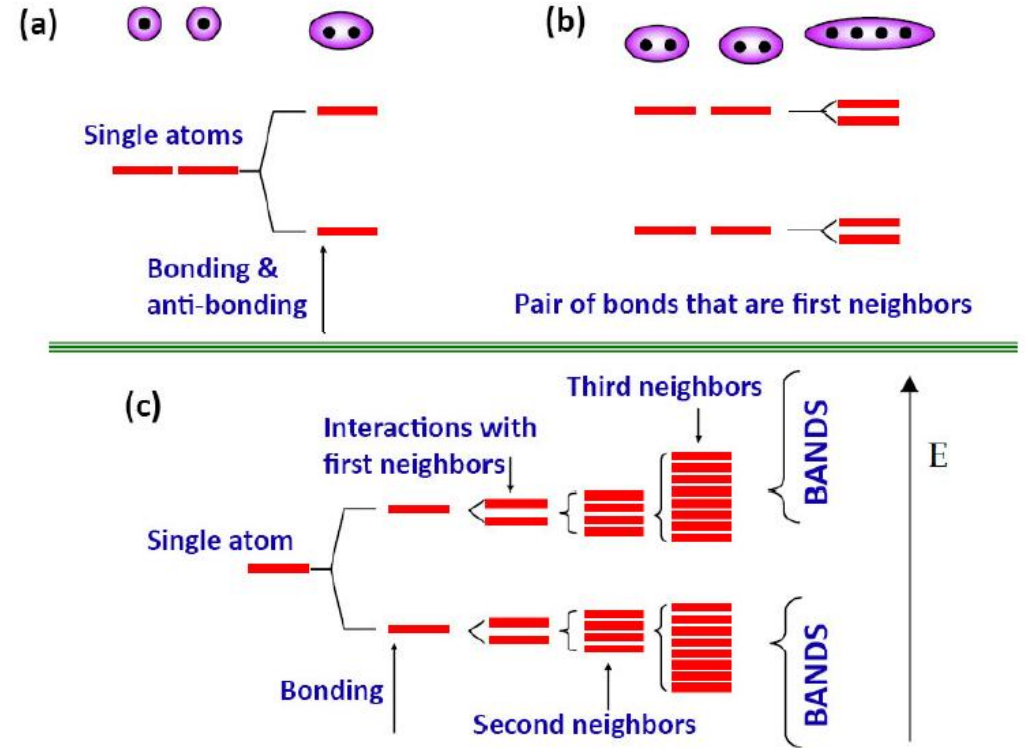


Les orbitaux moléculaires



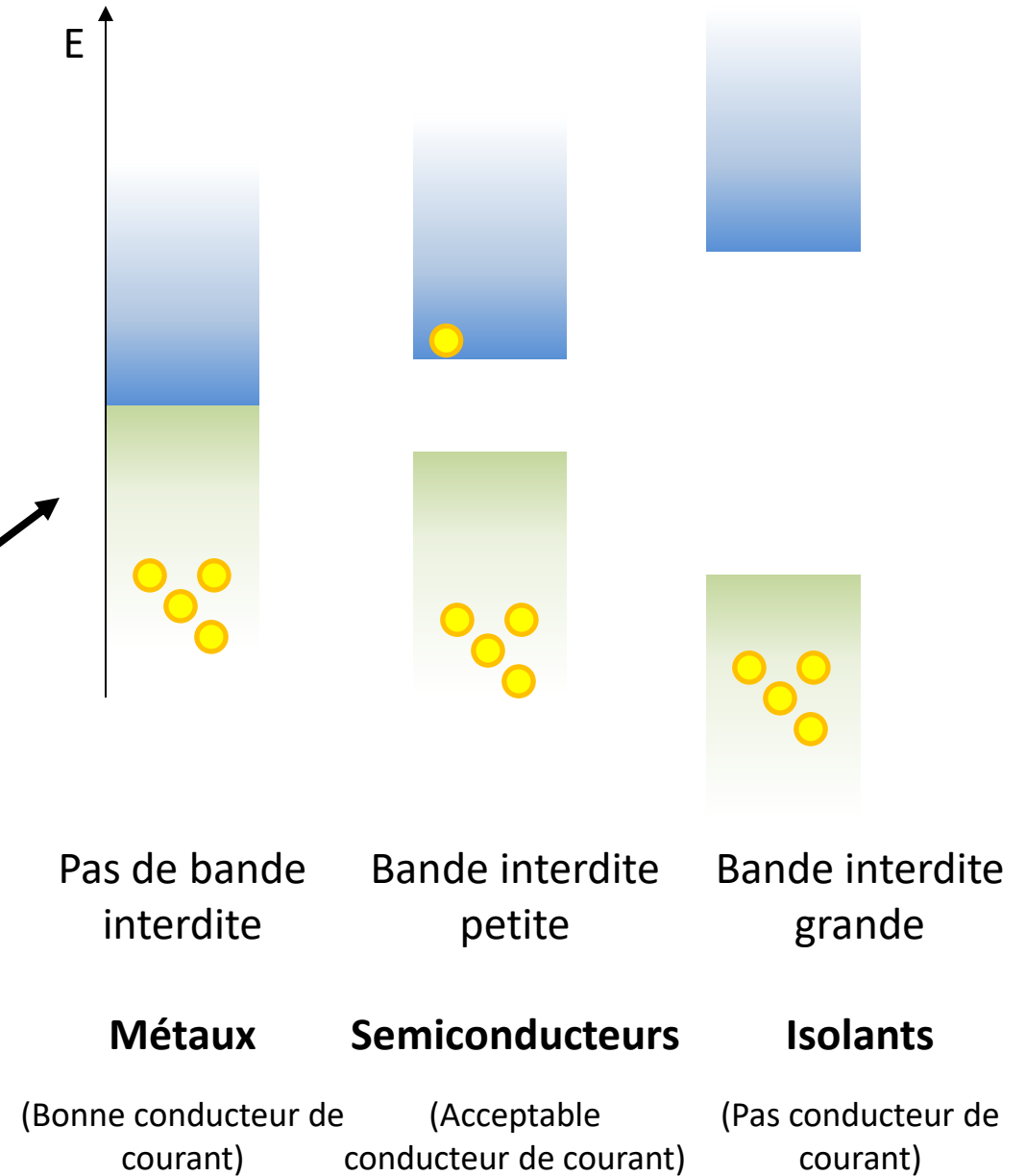
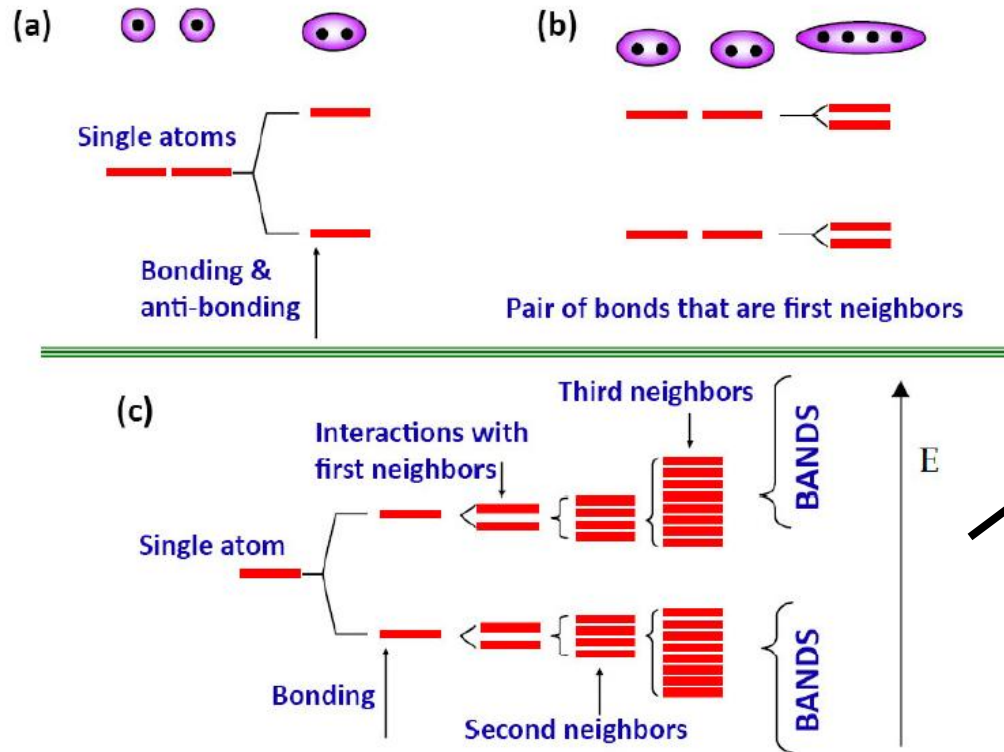
Energie de liaison pour une molécule H_2

Théorie des bandes



Les interactions entre les atomes d'un solide définissent l'environnement énergétique des états électroniques (électrons) et les modes vibrationnels du réseau.

Théorie de bande



Densité d'états

La densité d'états $g(E)$ correspond au nombre d'états trouvés dans une gamme d'énergies données.

Elle est définie de la façon suivante :

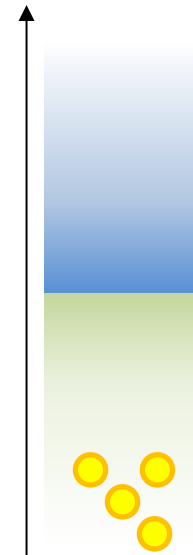
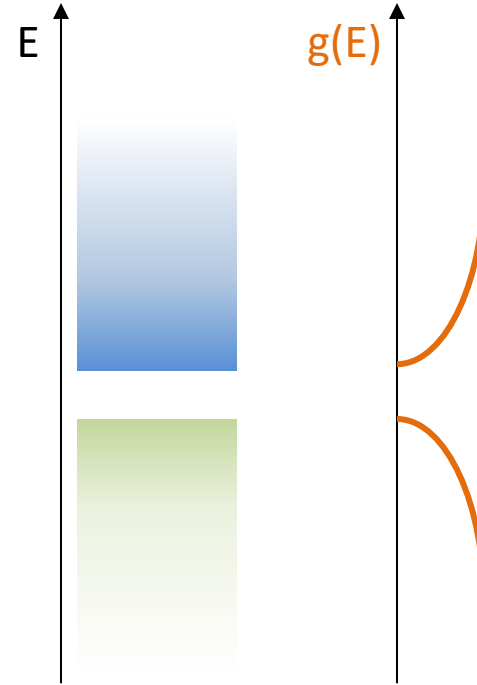
$$N = g(E) dE$$

Avec N le nombre d'états dans la gamme E et $E+dE$

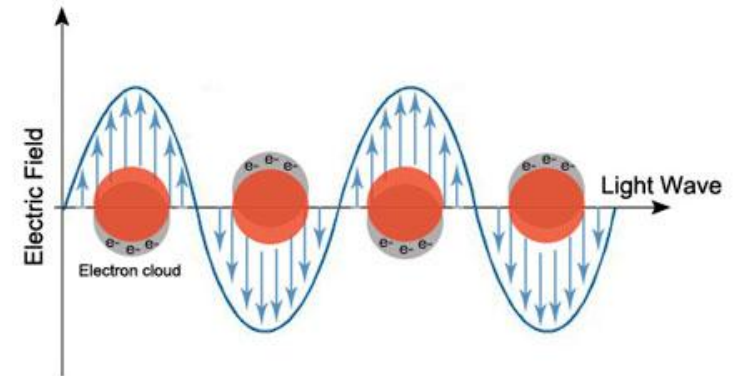
Etats délocalisés et excitation collectives

Les électrons délocalisés 'bougent', ils se propagent dans le solide grâce à la formation des bandes électroniques.

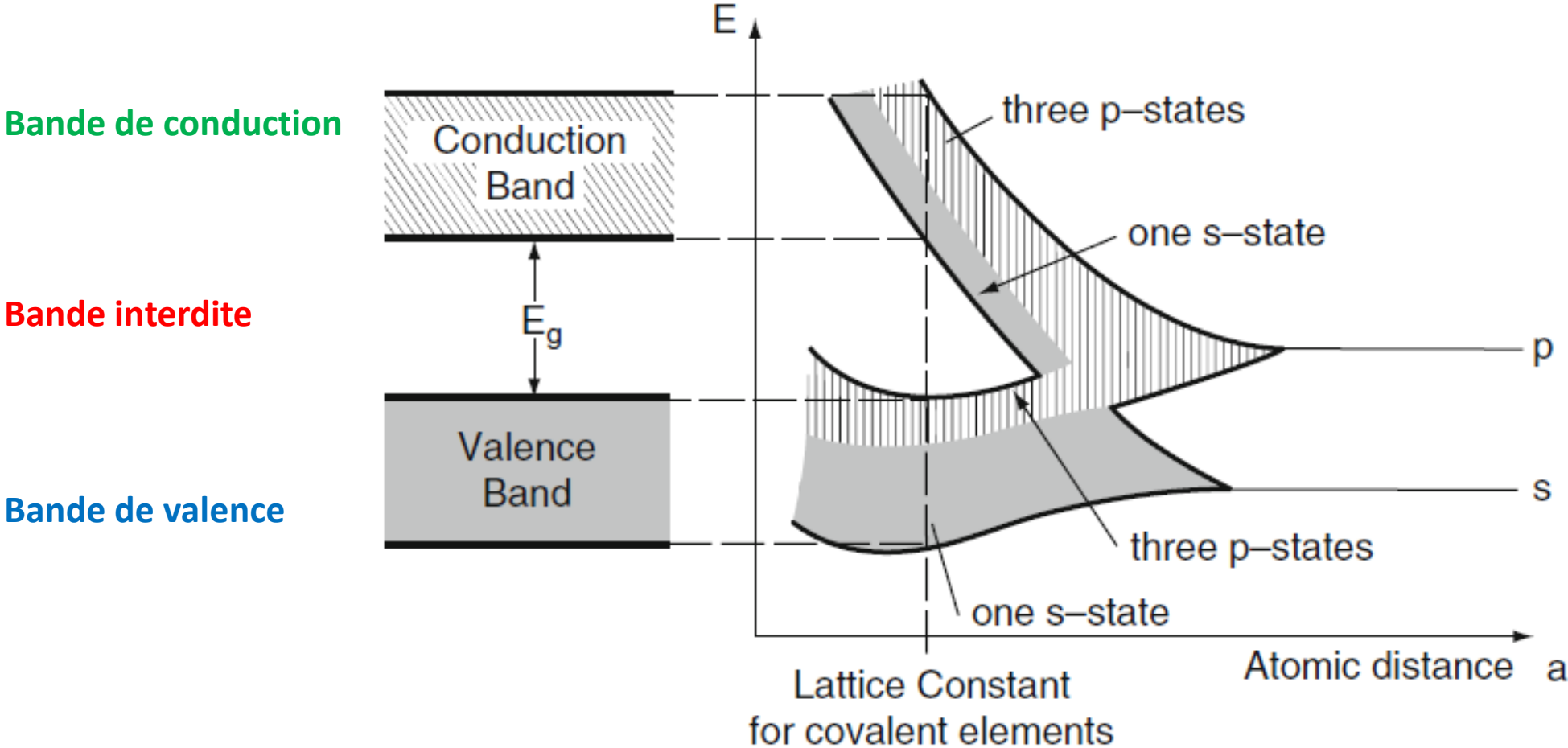
C'est cette délocalisation qui permet l'existence d'oscillations collectives dans la totalité du cristal plutôt que dans chaque atome.



Exemple: plasmons



Structure de bande d'un semiconducteur

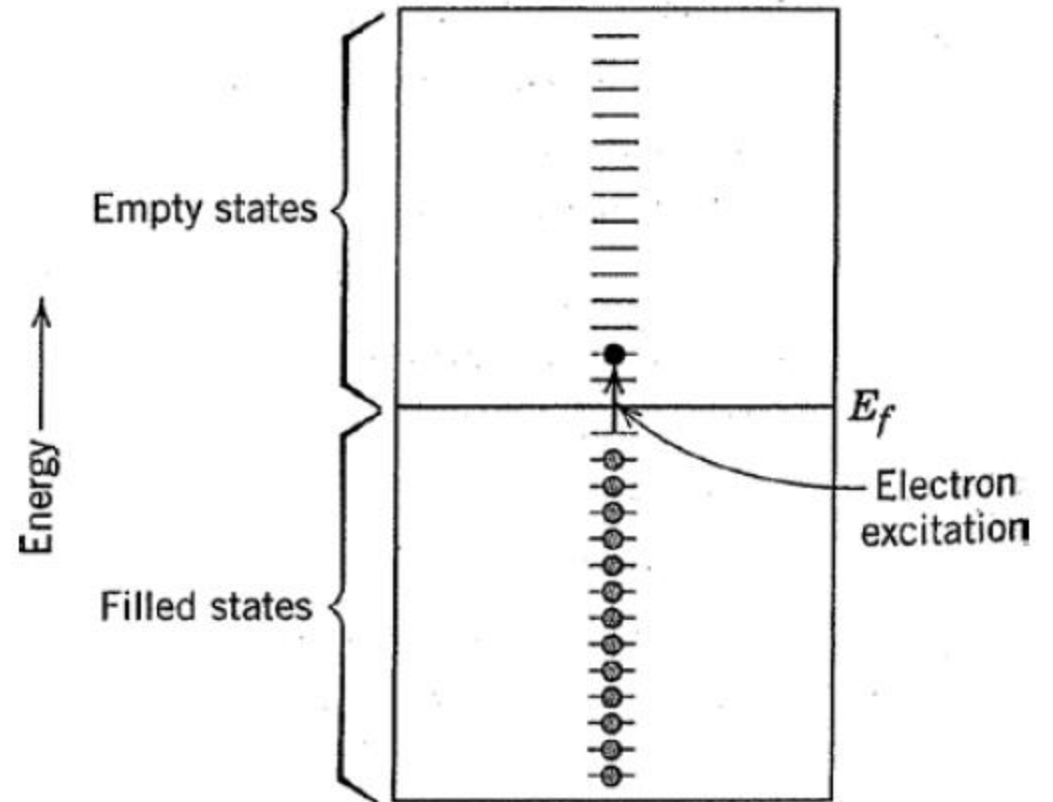


Les 3 propriétés typique des semiconducteurs

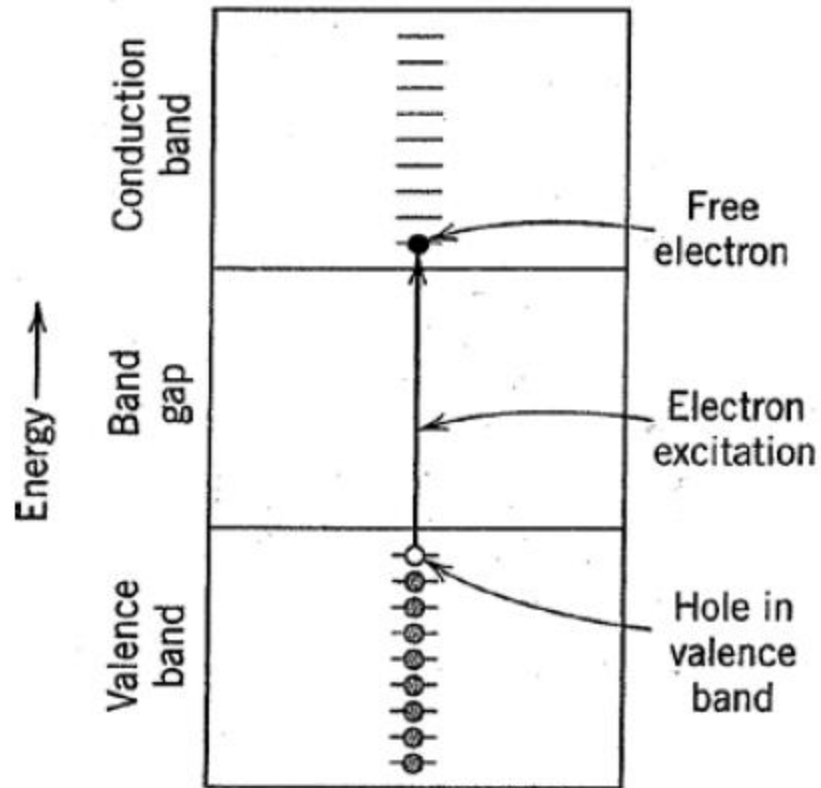
Réponse aux champs électriques

Le champ électrique augmente l'énergie des électrons d'une quantité infinitésimale ΔE . Ainsi, les électrons peuvent passer à des niveaux énergétiques légèrement plus élevés, si ceux-ci sont disponibles.

C'est le cas des métaux, où il n'y a pas de bande interdite et où la structure de bande forme effectivement une bande continue.



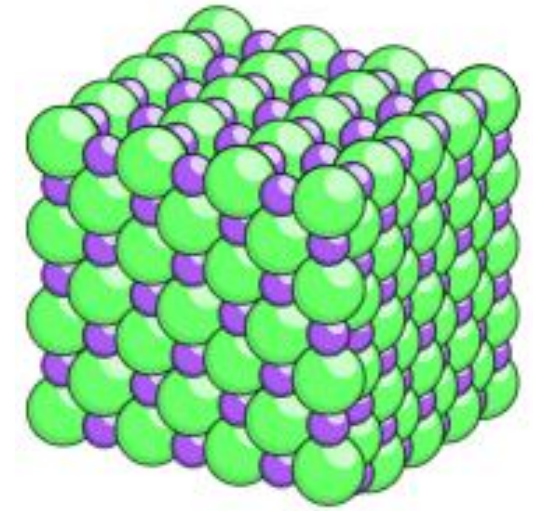
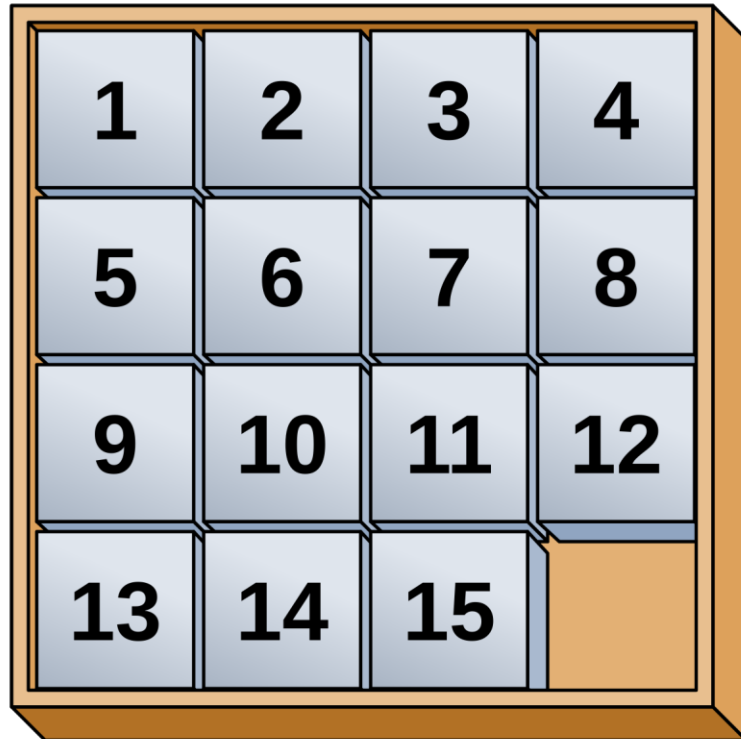
Réponse aux champs électriques



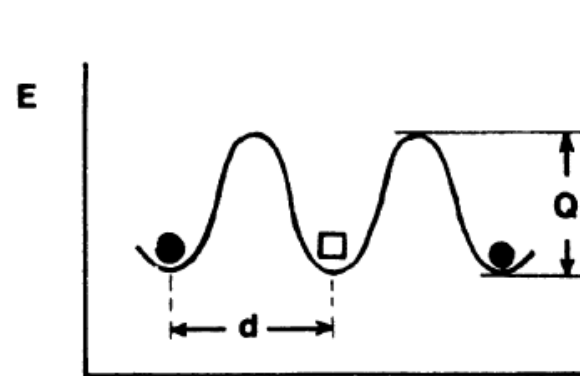
Dans les semiconducteurs, la situation est bien différente, car les électrons nécessitent beaucoup d'énergie pour franchir la bande interdite.

Cette énergie peut être fournie de différentes façons (voir énergie thermique). Si des électrons passent de la bande de valence à la bande de conduction, ils peuvent conduire un courant sous l'effet d'un champ électrique. De plus, cela entraîne la formation d'un trou dans la bande de valence. Le trou contribue à la conduction comme une particule positive.

Exemples de mouvement négative

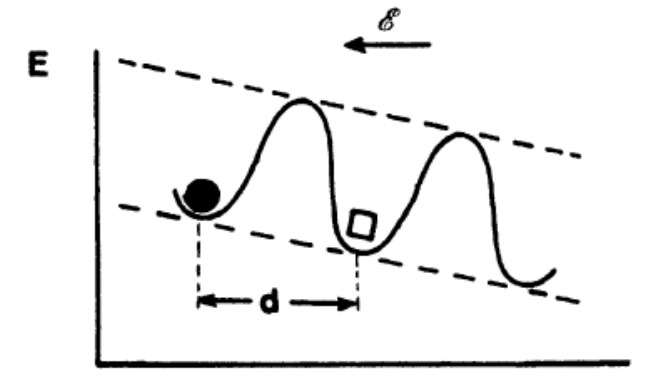


Liaison ionique



distance

(a)

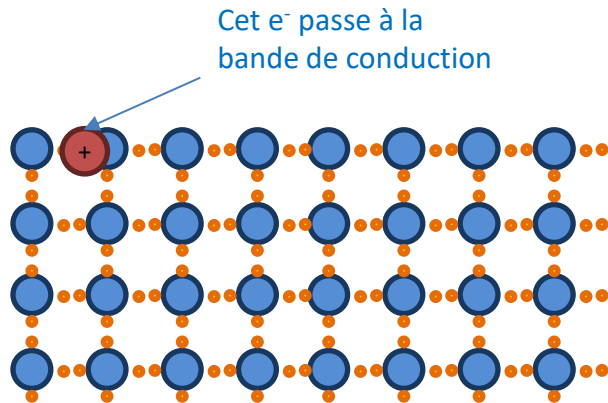


distance

(b)

Concept de trou

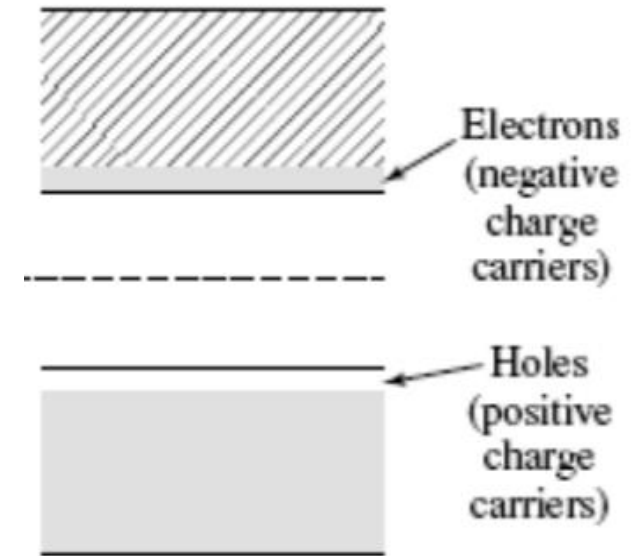
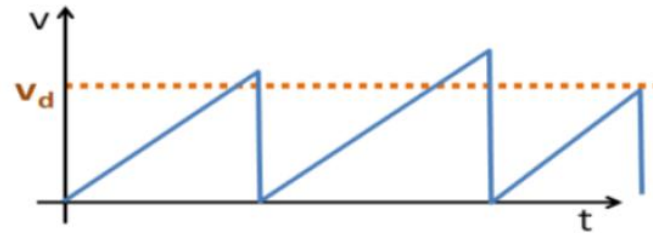
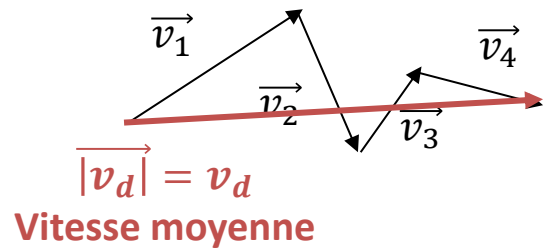
Lorsque un électron part de la bande de valence à celle de conduction, il laisse une charge positive à sa position initiale qui devient un trou. Cela est équivalent à une ionisation de l'atome avec la perte d'un électron.



Sous un champ électrique, le trou bouge dans le réseau cristallin en direction opposé du champ.

Cette mécanisme est équivalent au mouvement d'une charge positive dans le matériau.

Modèle de Drude modifié (semiconducteur intrinsèque)



$$\vec{J}_{drift} = \underbrace{-e * n * \vec{v}_{d,e}}_{\text{électrons}} + \underbrace{e * p * \vec{v}_{d,h}}_{\text{trous}}$$

Densité de courant vs vitesse moyenne

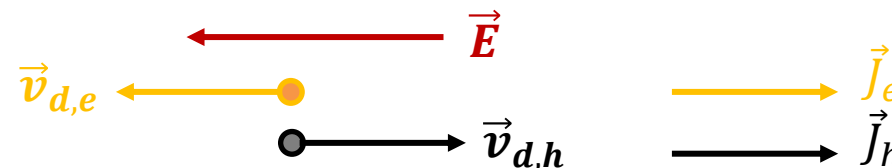
$$\vec{v}_{d,e} = \mu_e \vec{E} \quad \vec{v}_{d,h} = \mu_h \vec{E}$$

Vitesse moyenne vs champ électrique

$$\vec{J}_{drift} = -e * n * \mu_e \vec{E} + e * p * \mu_h \vec{E}$$

Densité de courant vs champ électrique

$$J_{drift} = e * \underbrace{(n * \mu_e + p * \mu_h)}_{\sigma: \text{conductivité}} * E$$



Conduction ambipolaire

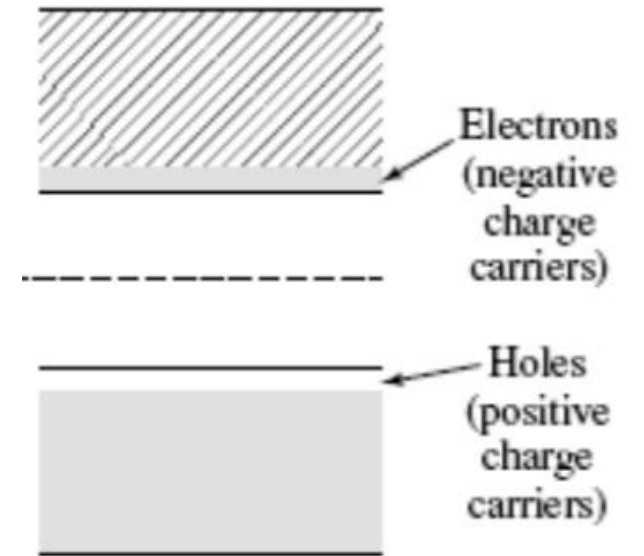
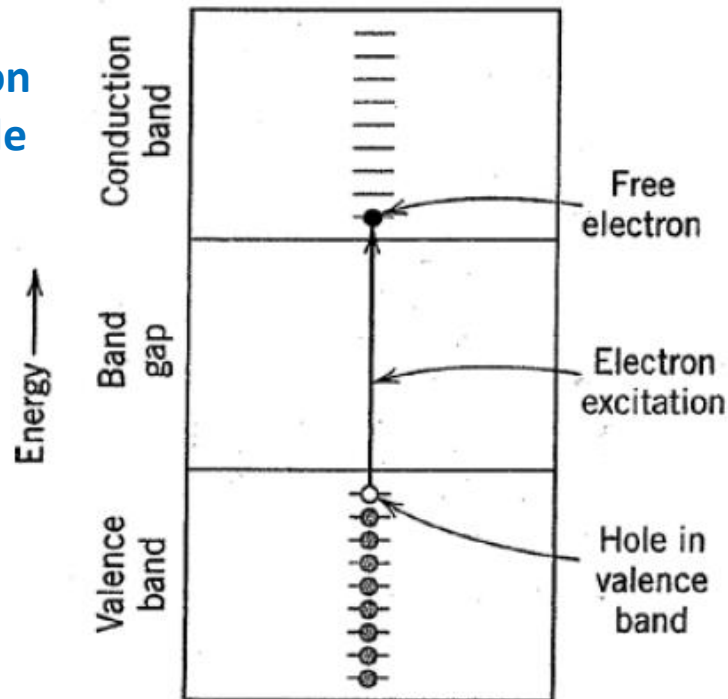
Modèle de Drude modifié (semiconducteur intrinsèque)

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

Conductivité
Charge d'électron
Concentration et mobilité d'électrons
Concentration et mobilité de trous

Exercice (5 minutes)

Trouvez la relation entre n et p sur la base de considérations liées au principe de neutralité de charges.



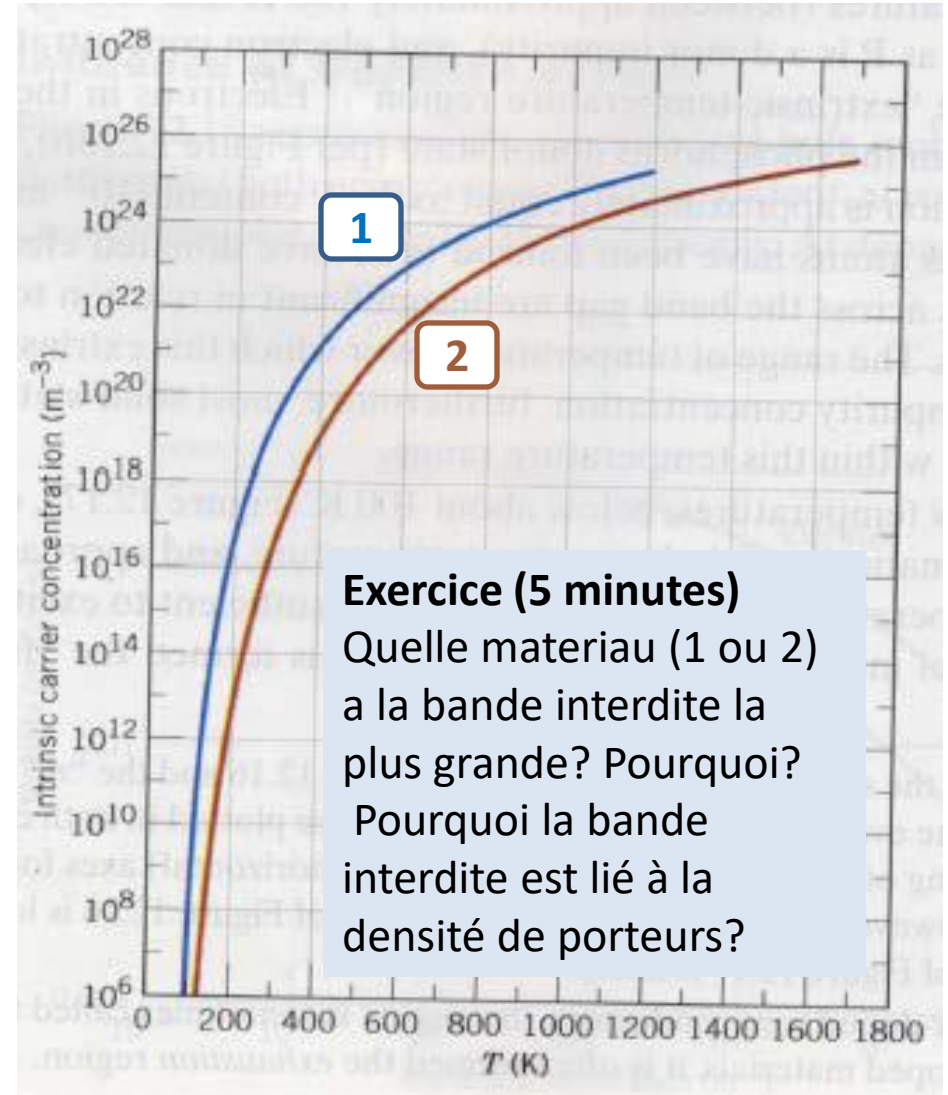
Dépendance en température de la densité de porteurs

Pour les semiconducteurs intrinsèques la concentration de porteurs n_i (aussi bien les électrons que les trous) dépend exponentiellement de la température.

Dans ce cas l'énergie d'activation est la moitié du gap :

$$n_i = N_s * \exp\left\{-\frac{E_g/2}{kT}\right\}$$

Où E_g définit l'énergie de gap, N_s est une mesure de la quantité d'états disponible pour le porteur dans le matériel, k est la constant de Boltzmann et T est la température.

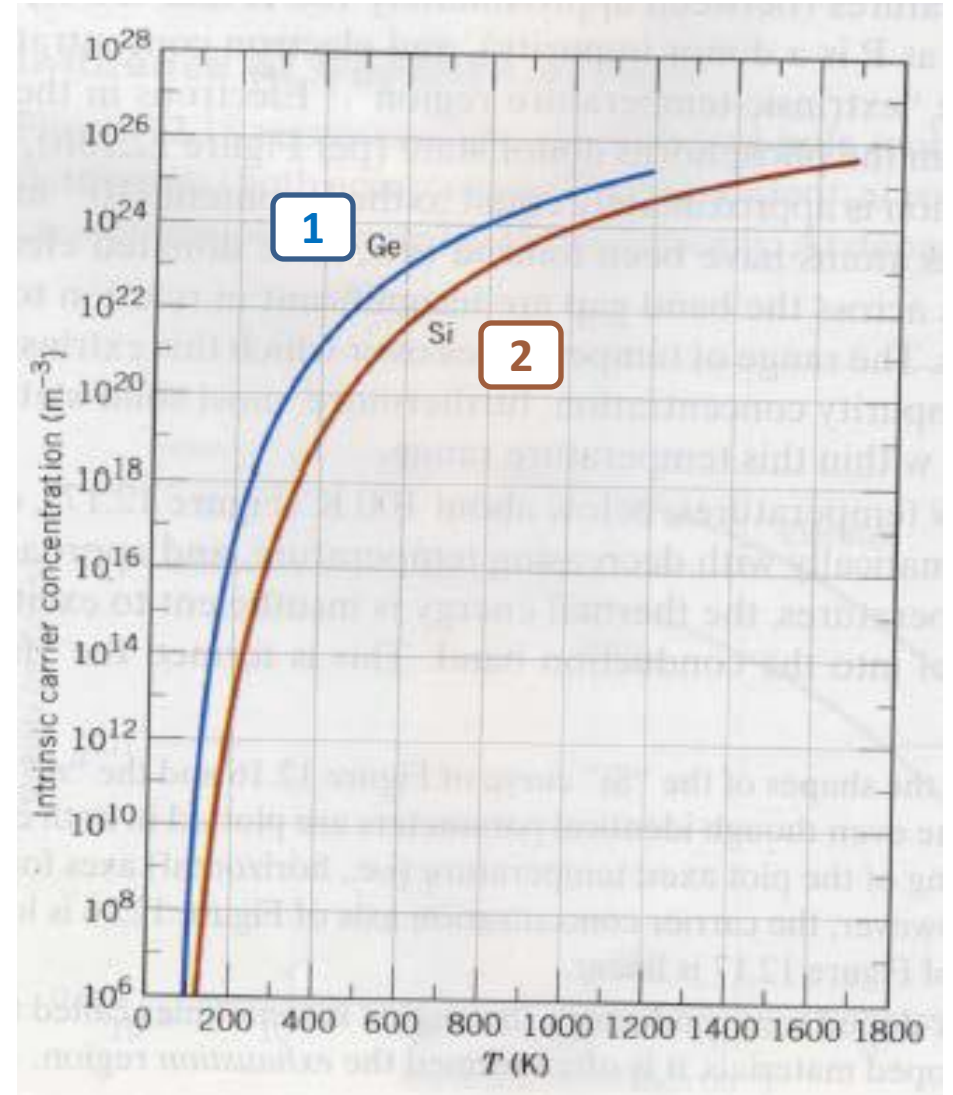


Dépendance en température de la densité de porteurs

$$n_i = N_s * \exp\left\{-\frac{E_g/2}{kT}\right\}$$

Quelle matériau (1 ou 2) a la bande interdite la plus grande?
Pourquoi?

Pourquoi la bande interdite est lié à la densité de porteurs?



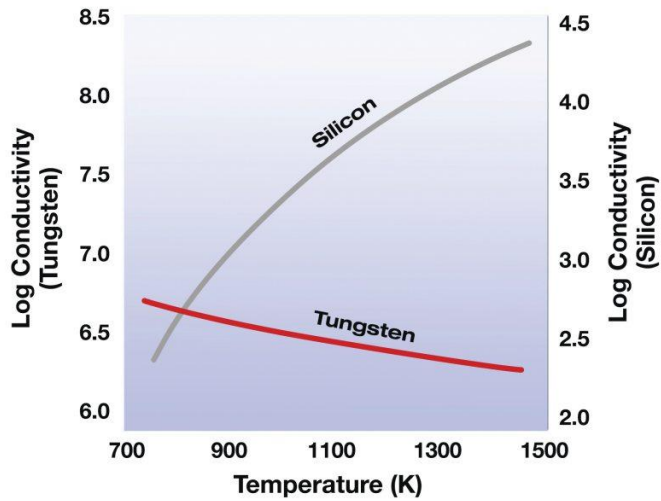
Dépendance en température de la densité de porteurs

$$\sigma = e * n_i * (\mu_e + \mu_h)$$

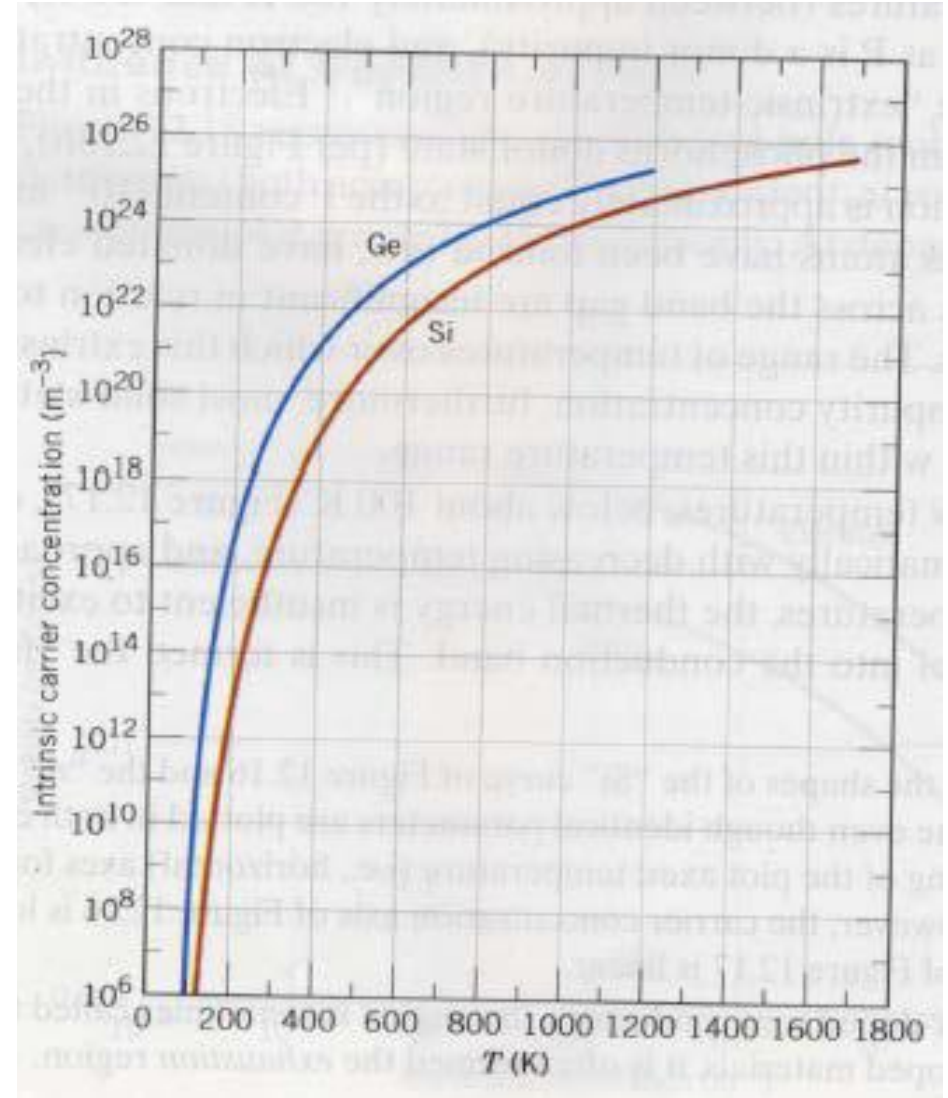
Modele de Drude:

$$\mu = \frac{e * \tau}{m}$$

$$n_i = N_s * \exp\left\{-\frac{E_g/2}{kT}\right\}$$



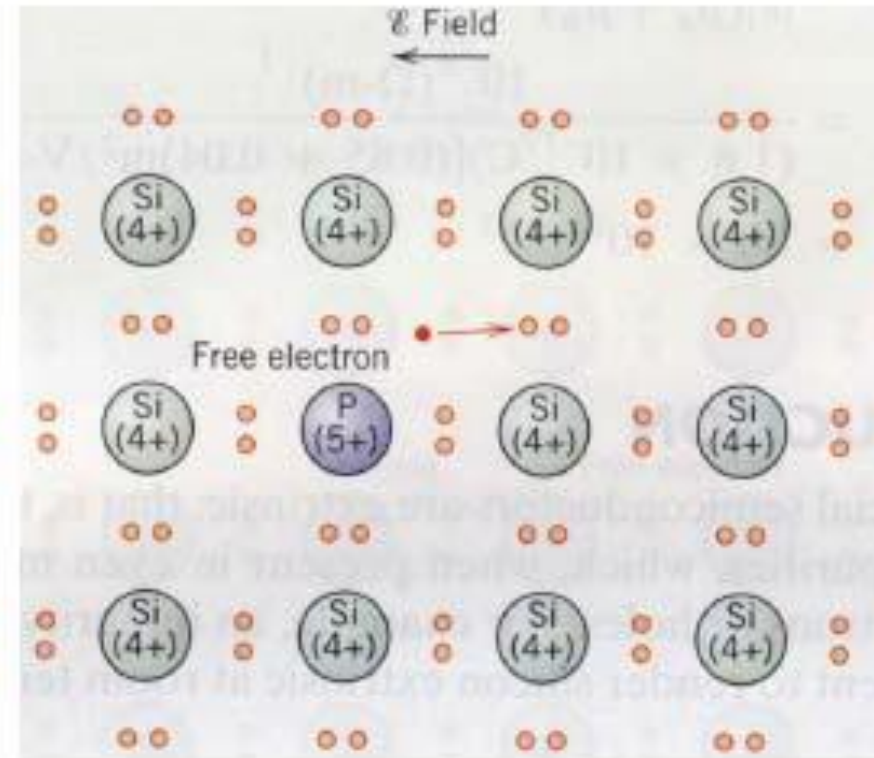
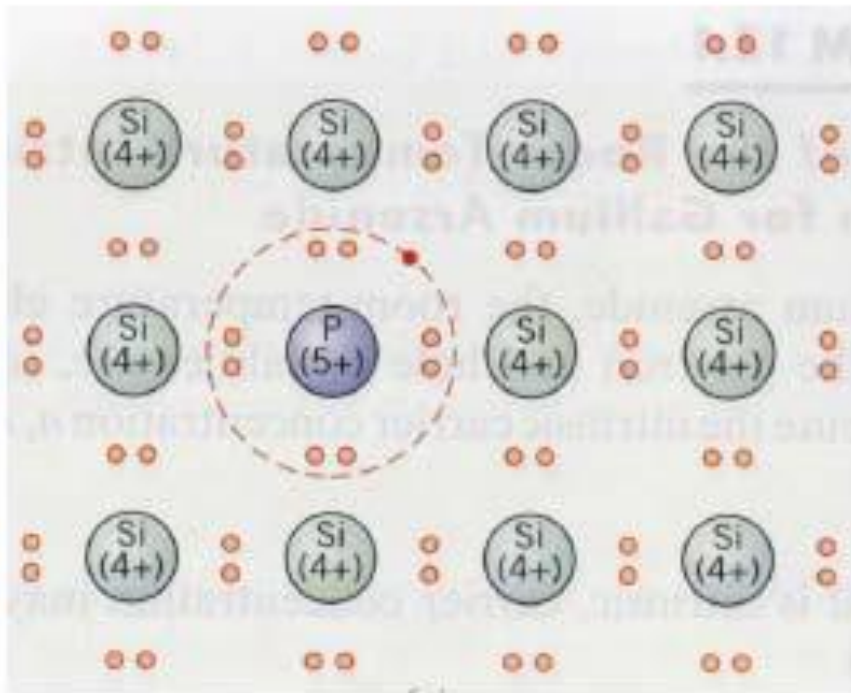
$\sigma \uparrow$ quand $T \uparrow$



Pause (5 minutes)

Dopage (type n)

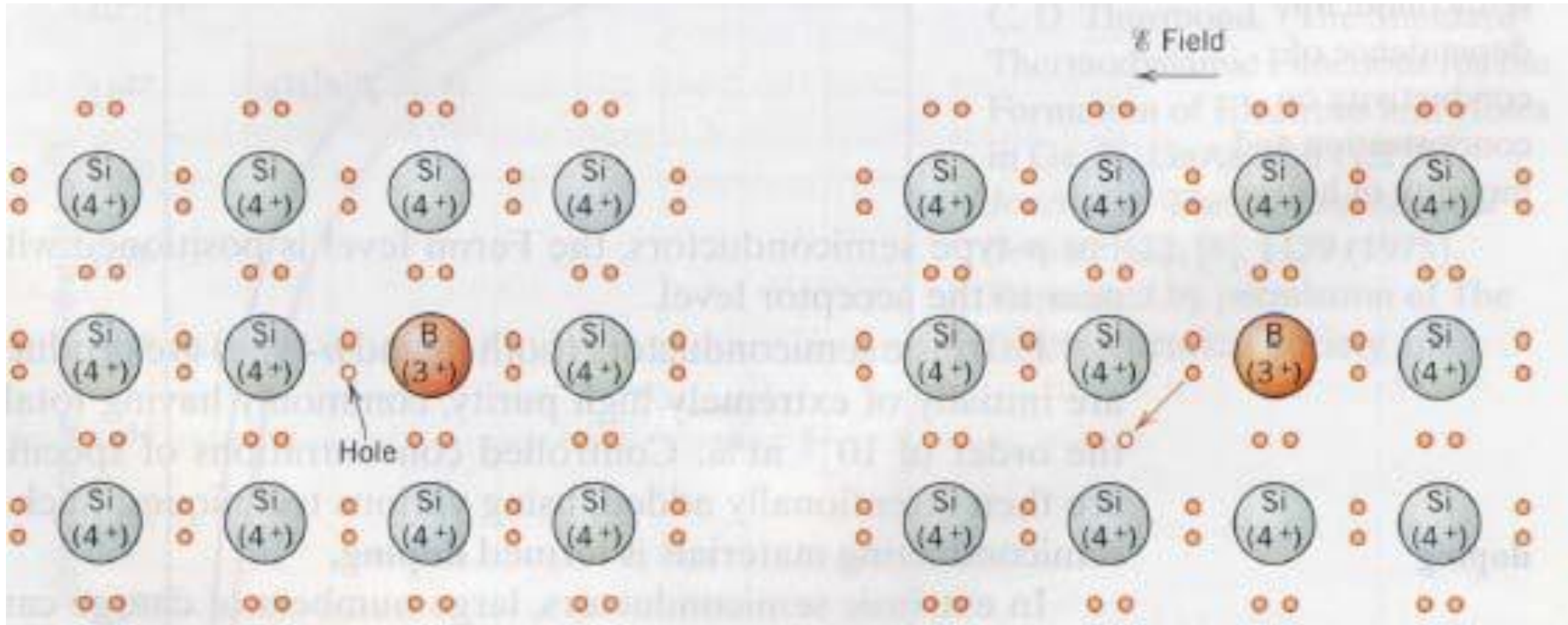
Lorsque nous introduisons un atome ayant 5 électrons de valence dans le silicium (ex. P), l'impureté va s'incorporer de manière substitutionnelle. Ceci veut dire que cet atome formera 4 liaisons avec les 4 atomes de Si voisins. Il lui restera donc un électron qui ne pourra pas participer à une liaison. Cet électron n'est plus que faiblement lié (voir énergie d'ionisation) à l'impureté et peut donc facilement devenir un électron libre dans le matériau.



Ce genre d'impuretés s'appelle **donateur**, et ce type de dopage est dit de type n.

Dopage (type p)

Lorsque nous introduisons un atome avec 3 électrons de valence dans le silicium (ex. B), l'impureté va aussi s'incorporer de manière substitutionnelle. Cela implique que cet atome formera 4 liaisons avec les 4 Si voisins. Pour faire cette liaison, l'impureté devra emprunter un électron à un Si voisin. Ceci génère la création d'un trou libre.



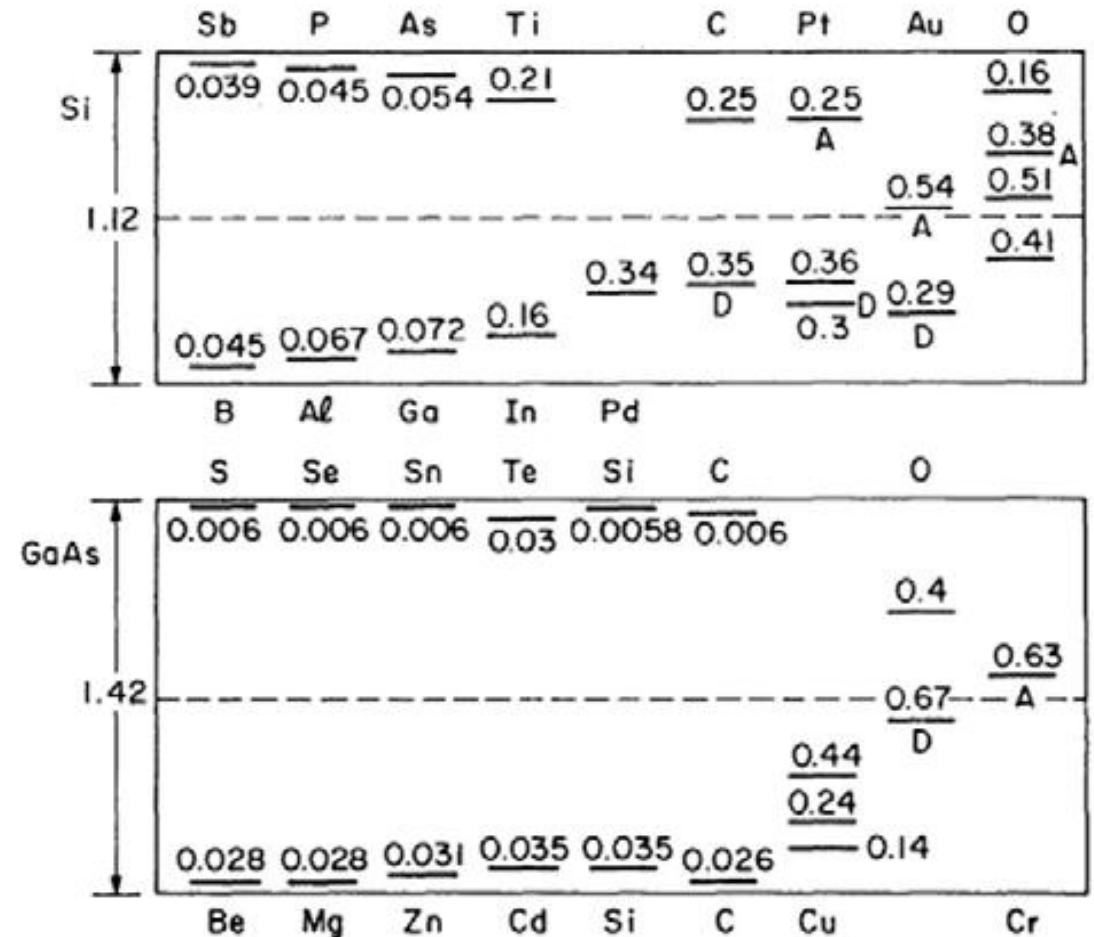
Ce genre d'impureté s'appelle **accepteur**, et le dopage type p.

Énergie d'ionisation

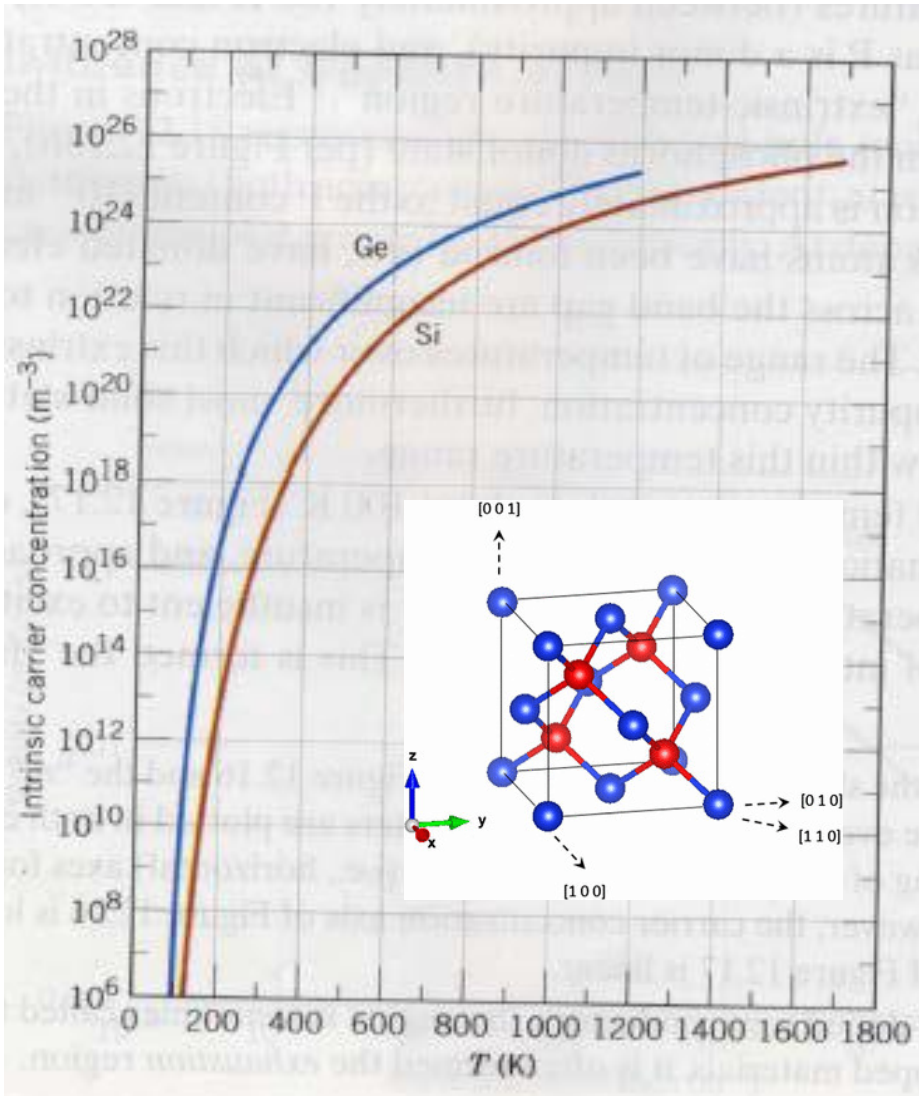
Pour devenir actifs, les dopants doivent être ionisés. L'énergie nécessaire pour ioniser un dopant et lui permettre de donner un électron ou un trou au semi-conducteur est appelée l'énergie d'ionisation. Les dopants s'activent principalement par voie thermique.

Dans la figure ci-contre, on peut observer que certains dopants, comme le soufre (S), le sélénium (Se) et l'étain (Sn) dans le GaAs, ont des énergies d'ionisation bien inférieures à l'énergie thermique à température ambiante. D'autres, comme le carbone (C) dans le GaAs, peuvent agir en tant que donneurs ou accepteurs. Certains dopants, avec des énergies d'ionisation très élevées, deviennent des pièges profonds.

Énergie d'ionisation pour différents dopants du Si et du GaAs (en eV)



Exercice dopage (10 minutes)



Le cellule primitive du silicium est cubique à faces centrées avec un taille de 0.54 nm. La concentration intrinsèque de porteur dans le Si est de 10^{10} cm^{-3} .

Calculez le degré de pureté d'un échantillon de Si dopé nécessaire pour augmenter la conductivité d'un factor 1'000'000.

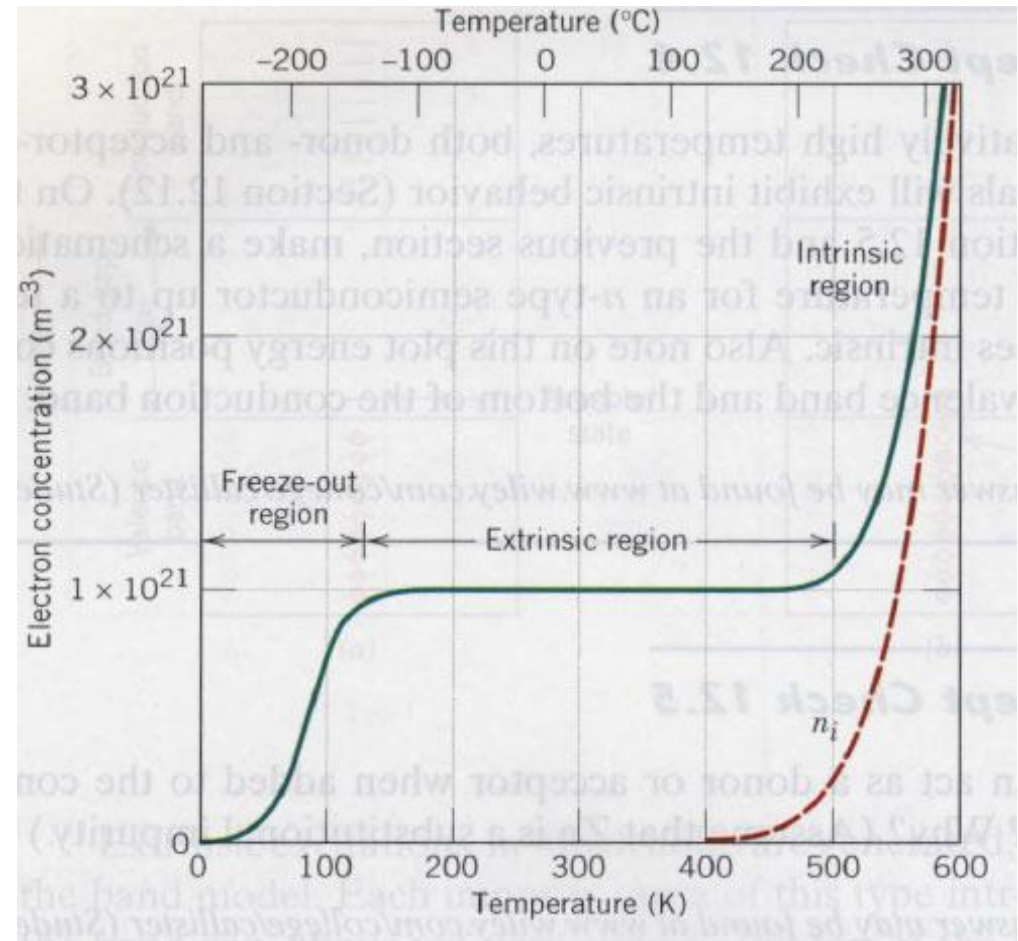
Concentration de charges vs T

Dans les semi-conducteurs dopés, différents régimes de température existent selon le comportement des dopants.

Températures très basses (régime de «freeze-out») : le système ne dispose pas d'énergie thermique suffisante pour exciter les charges entre la bande de valence et la bande de conduction, ni pour ioniser les dopants.

Températures moyennes (régime extrinsèque) : le système n'a pas suffisamment d'énergie thermique pour exciter les charges entre la bande de valence et celle de conduction, mais assez pour ioniser les dopants. La concentration des porteurs est alors déterminée uniquement par les dopants.

Températures élevées (régime intrinsèque) : le système dispose d'une énergie thermique suffisante pour exciter les charges entre la bande de valence et celle de conduction, et la concentration des porteurs devient supérieure à celle des dopants.



Mobilité dans les semiconducteurs **dopée**

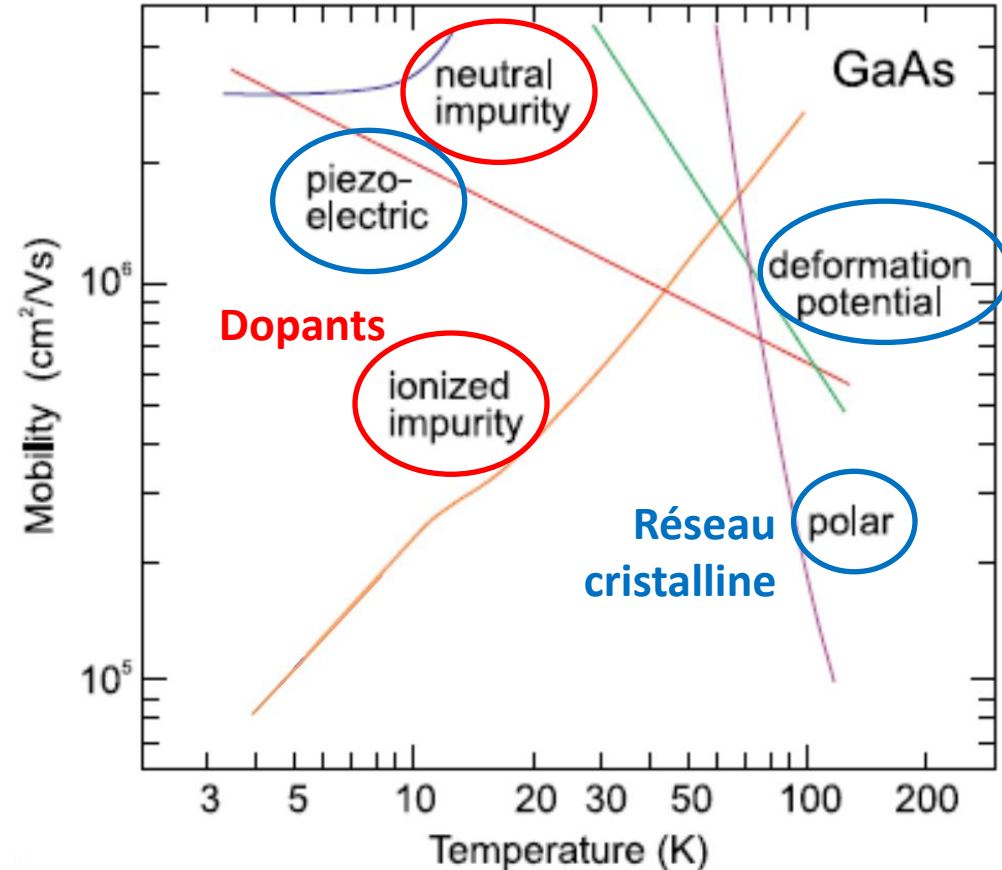
$$\sigma = e * (n * \mu_e + p * \mu_h)$$

Modele de Drude:

$$\mu = \frac{e * \tau}{m}$$

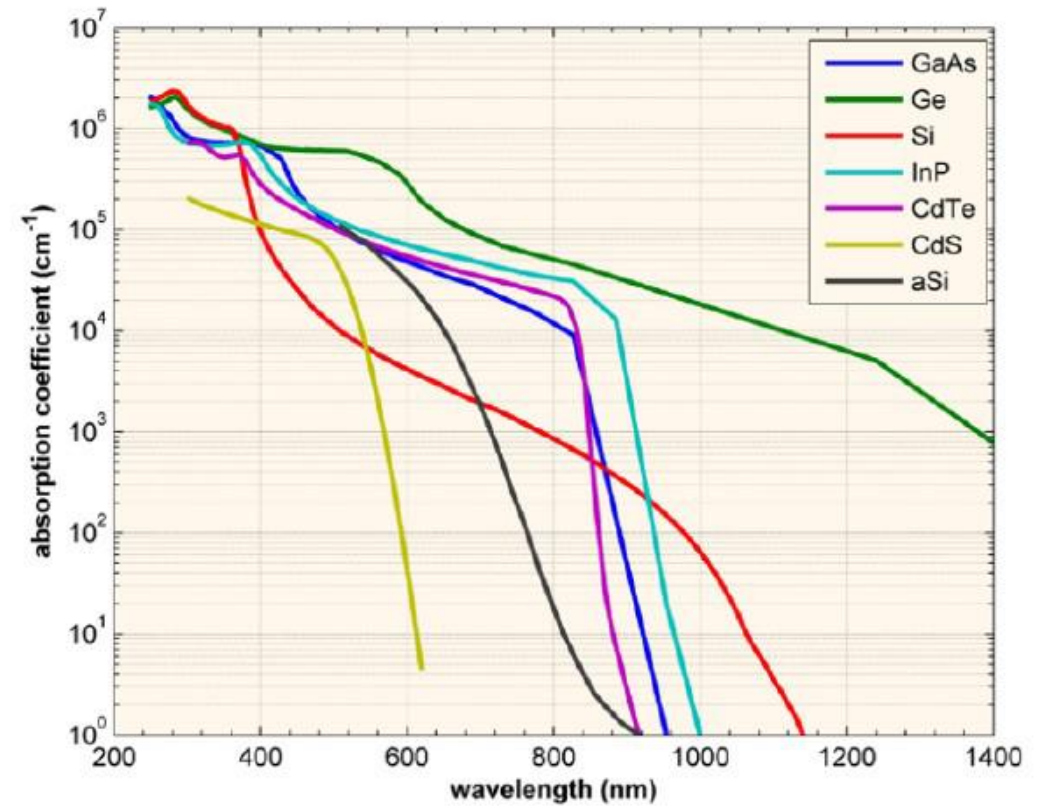
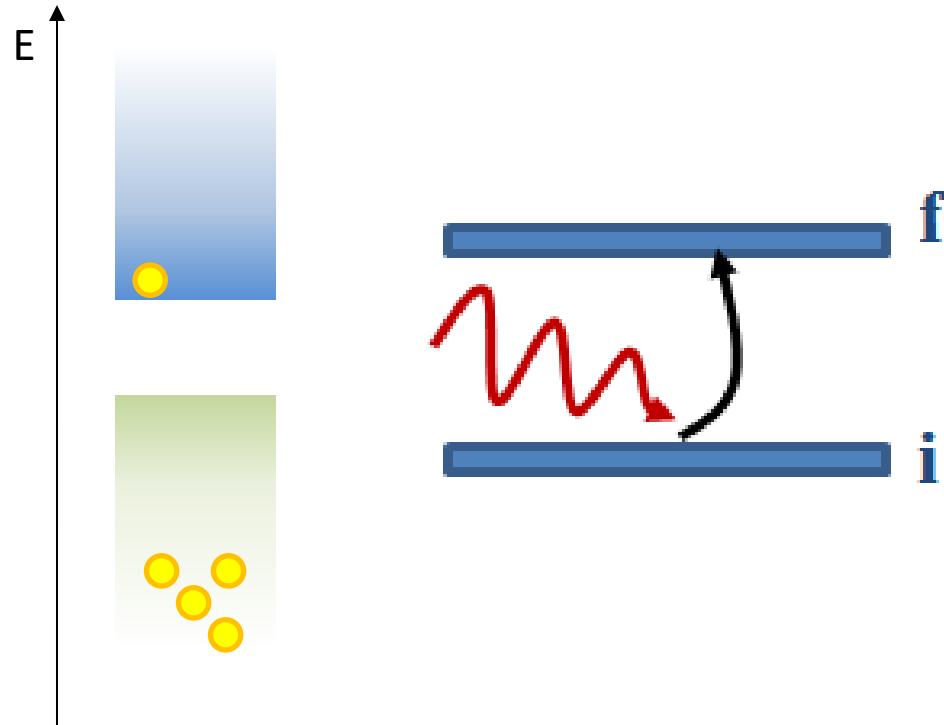
Loi de Matthiesen

$$f_{tot} = \sum_i \frac{1}{\tau_i}$$



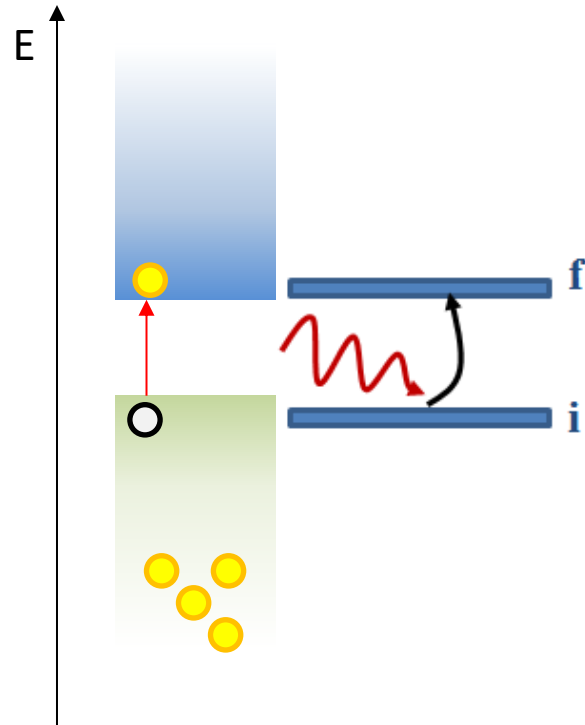
Normalement la mobilité des électrons est plus élevée que celle des trous.

Absorption de la lumière dans le semiconducteurs



Absorption de la lumière dans le semiconducteurs

Data at 300K from Kittel, C., Introduction to Solid State Physics, 6th Ed., New York:John Wiley, 1986, p. 185.



Material	Energy gap (eV)	Material	Energy gap (eV)
Si	1.11	GaAs	1.43
Ge	0.66	GaSb	0.68
InSb	0.17	CdSe	1.74
InAs	0.36	CdTe	1.44
InP	1.27	ZnO	3.2
GaP	2.25	ZnS	3.6

Range	Wavelength	Energy
Deep ultraviolet (DUV)	< 250 nm	> 5 eV
Ultraviolet (UV)	250-400 nm	3-5 eV
Visible (VIS)	400-800 nm	1.6-3 eV
Near infrared (NIR)	800 nm- 2 μm	0.6-1.6 eV
Mid infrared (MIR)	2-20 μm	60-600 meV
Far infrared (FIR)	20- 80 μm	1.6-60 meV
Terahertz (THz)	> 80μm	< 1.6 meV

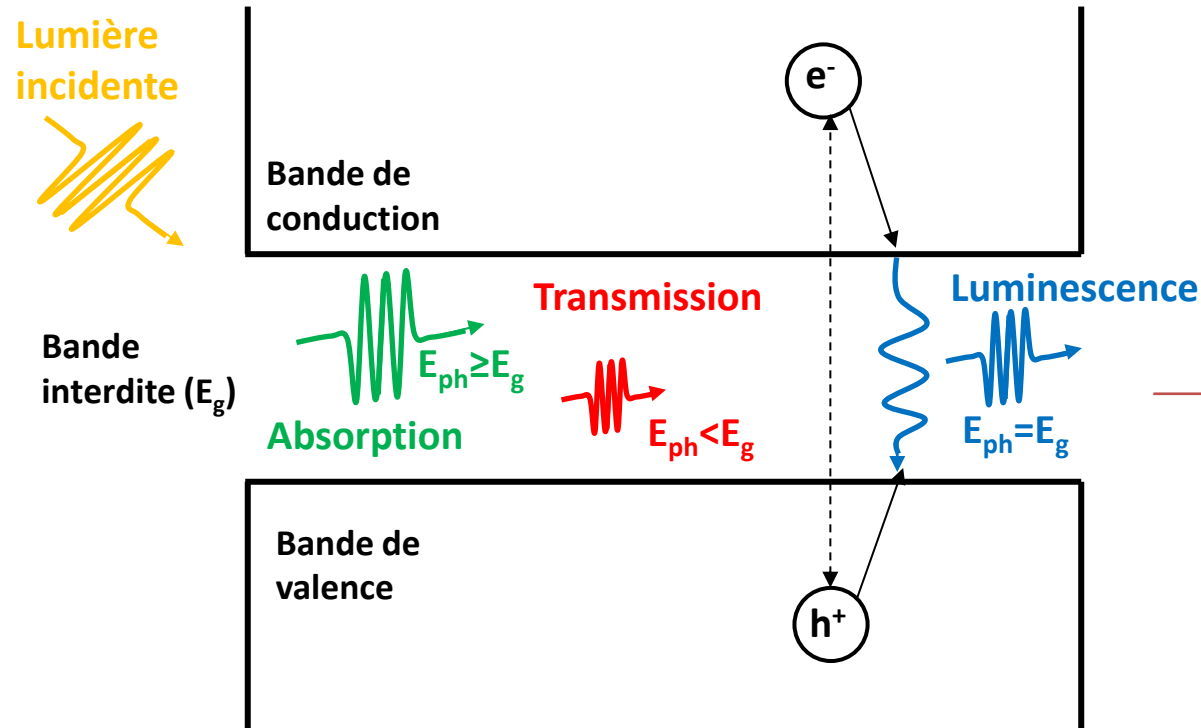
Les électrons dans les semiconducteurs peuvent absorber la lumière pour avoir assez d'énergie pour «sauter» dans la bande de conduction



L'interaction entre un semiconducteur et la lumière dépend de l'énergie de la bande interdite par rapport à l'énergie de la radiation (E_{ph}).

Absorption de la lumière dans le semiconducteurs

Data at 300K from Kittel, C., Introduction to Solid State Physics, 6th Ed., New York:John Wiley, 1986, p. 185.



Material	Energy gap (eV)	Material	Energy gap (eV)
Si	1.11	GaAs	1.43
Ge	0.66	GaSb	0.68
InSb	0.17	CdSe	1.74
InAs	0.36	CdTe	1.44
InP	1.27	ZnO	3.2
GaP	2.25	ZnS	3.6

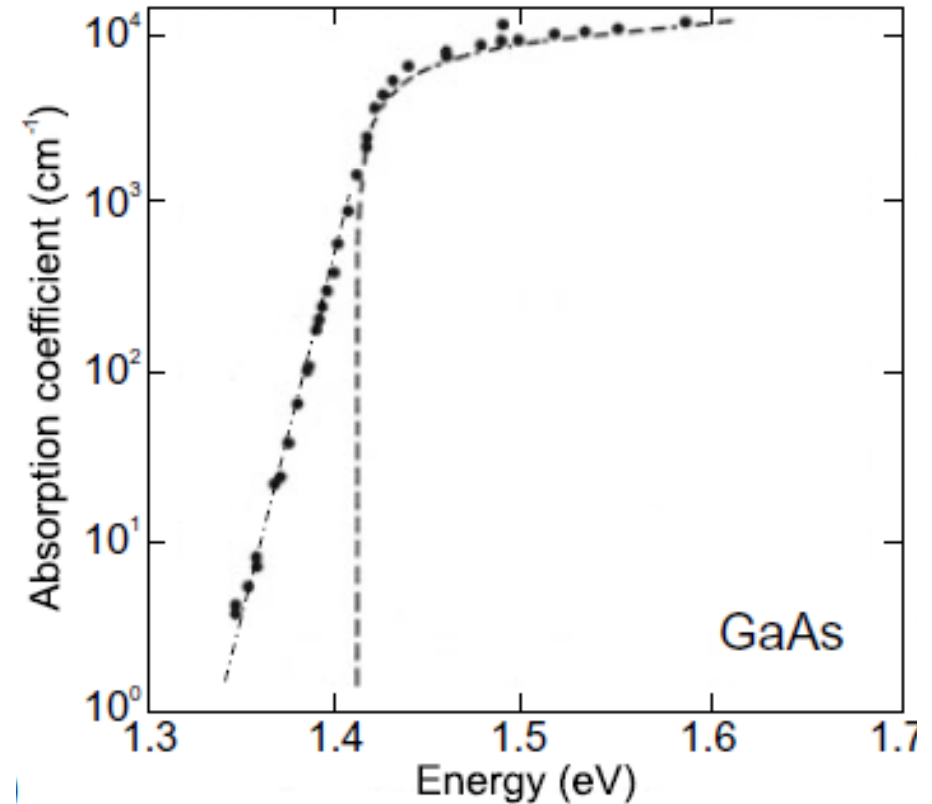
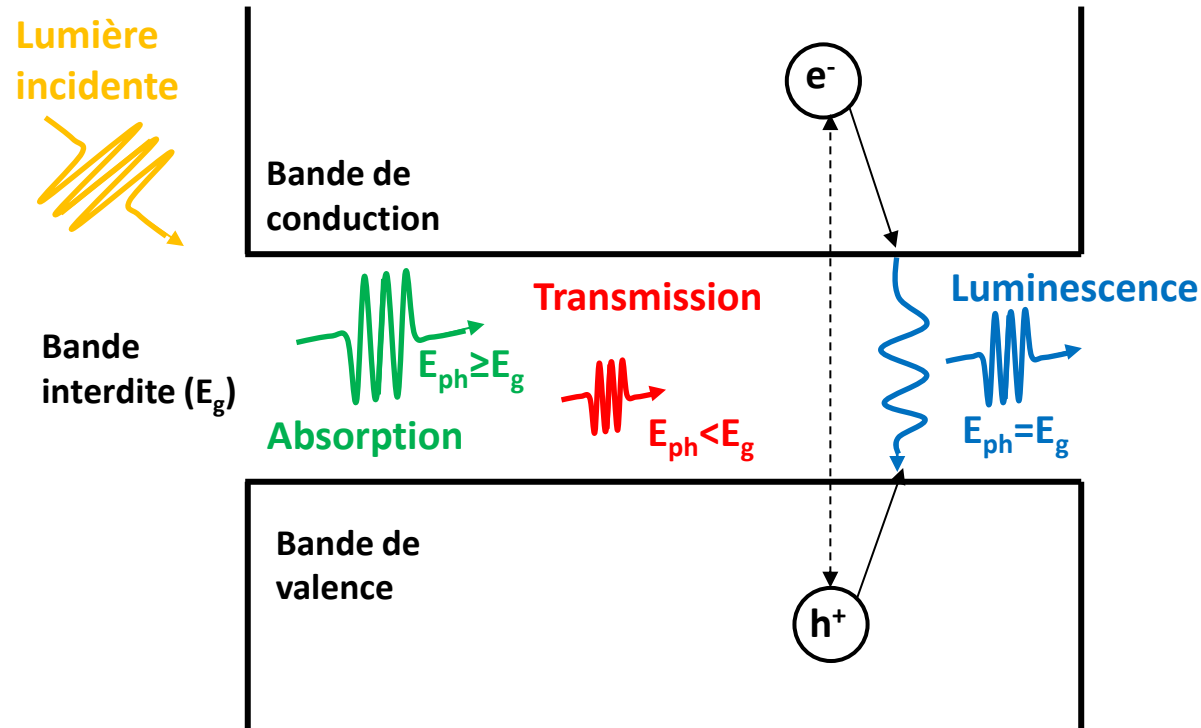
Range	Wavelength	Energy
Deep ultraviolet (DUV)	< 250 nm	> 5 eV
Ultraviolet (UV)	250-400 nm	3-5 eV
Visible (VIS)	400-800 nm	1.6-3 eV
Near infrared (NIR)	800 nm- 2 μ m	0.6-1.6 eV
Mid infrared (MIR)	2-20 μ m	60-600 meV
Far infrared (FIR)	20- 80 μ m	1.6-60 meV
Terahertz (THz)	> 80 μ m	< 1.6 meV

Les électrons dans les semiconducteurs peuvent absorber la lumière pour avoir assez d'énergie pour «sauter» dans la bande de conduction



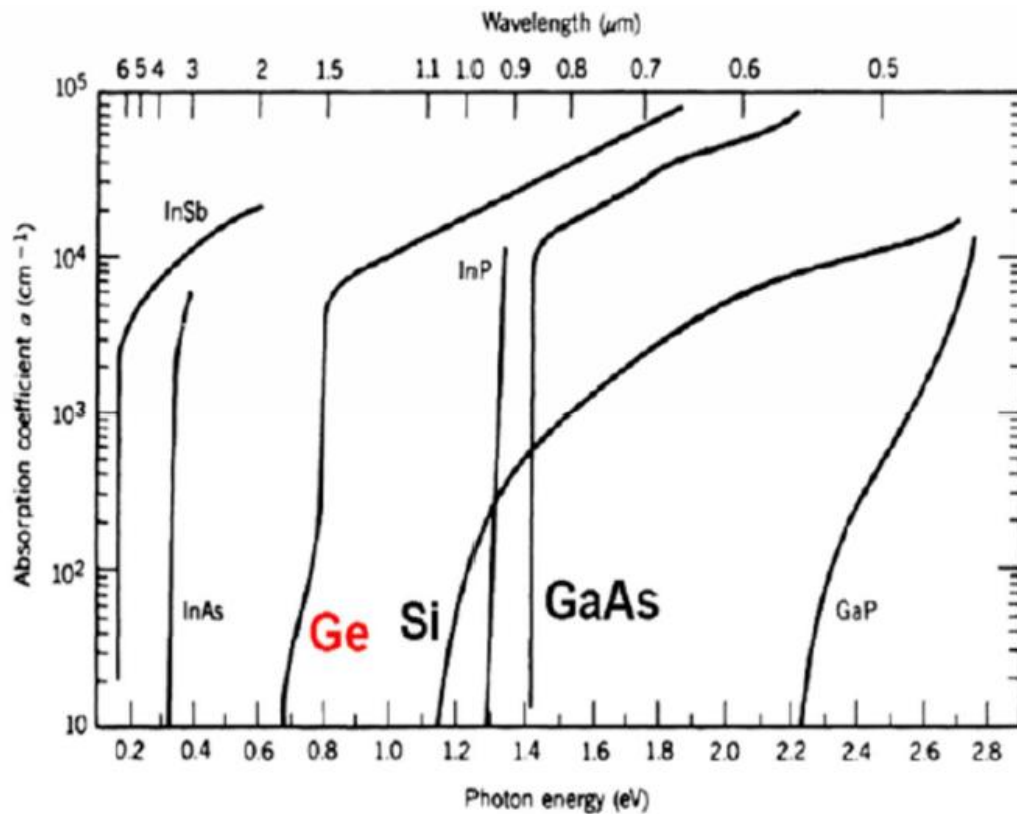
L'interaction entre un semiconducteur et la lumière dépend de l'énergie de la bande interdite par rapport à l'énergie de la radiation (E_{ph}).

Coefficient d'absorption dans le semiconducteurs



La variation du coefficient d'absorption en fonction de l'énergie de la radiation est utilisée pour mesurer l'énergie de la bande interdite. En présence de défauts, les données expérimentales peuvent dévier de l'idéal, ce qui se traduit par une queue d'Urbach.

Absorption de la lumière dans le semiconducteurs



Les semi-conducteurs pour lesquels l'excitation des électrons d'une bande à l'autre dépend uniquement de l'énergie de la radiation sont appelés des « semi-conducteurs directs ».

Dans certains cas, la condition énergétique est nécessaire mais insuffisante, car l'interaction de la lumière avec le réseau cristallin est également requise. Ces semi-conducteurs sont appelés des « semi-conducteurs indirects ».

La variation du coefficient d'absorption avec l'énergie de la lumière est bien plus marquée dans les semi-conducteurs directs (InSb, InAs, InP, GaAs) que dans les semi-conducteurs indirects (Ge, Si, GaP).