TD n°1 : L'atome

Partie 1 :

Question 1 :

Modèle de Bohr :
Représentation la plus simple possible de l'atome d'hydrogène :
2 particules :

- 1 proton p^+
- 1 electron e^-

Charge élémentaire : $e = 1{,}6 \times 10^{-19} C$
Les protons ont une charge $+e$, et les électrons une charge $-e$.

Question a :

$$\overrightarrow{Fa} = \frac{q1 \times q2}{4\pi\varepsilon_0} \times \frac{1}{r^2} \times \vec{u}$$

$$\left|\overrightarrow{Fa}\right| = Fa = \frac{\left|(-e)(+e)\right|}{4\pi\varepsilon_0 r^2} = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$$

$$= \frac{\left(1{,}6 \times 10^{-19}\right)^2 \times 8{,}9 \times 10^8}{r^2}$$

$$= \frac{1}{r^2} \times 1{,}6^2 \times 10^{-19^2} \times 8{,}9 \times 10^8$$

$$\simeq \frac{1}{r^2} \times 2{,}56 \times 9 \times 10^{-29}$$

$$\simeq \frac{1}{r^2} \times 23{,}04 \times 10^{-29} N \simeq \frac{2{,}304 \times 10^{-28}}{r^2}$$

Question b :

$$\overrightarrow{Fg} = -G \frac{m1 \times m2}{r^2} \vec{u}$$

$$Fg = \left| 6{,}674 \times 10^{-11} \times \frac{9{,}109 \times 10^{-31} \times 1{,}673 \times 10^{-27}}{r^2} \right|$$

$$= \frac{1}{r^2} \times \underbrace{6{,}674}_{6{,}5} \times \underbrace{9{,}109}_{9} \times \underbrace{1{,}673}_{1{,}5} \times 10^{-69}$$

$$\simeq \frac{87{,}75 \times 10^{-69}}{r^2}$$

La force d'attraction gravitationnelle est donc négligeable par rapport à la force d'attraction colombienne.

Question c :

$$Fc = \frac{mv^2}{r}$$

Question d :

La relation fondamentale de la dynamique (RFD) à l'équilibre :

$$\sum \overrightarrow{Fext} = \vec{0}$$

Etant donné que la force gravitationnelle est négligeable :

$$\overrightarrow{Fa} + \overrightarrow{Fc} = \vec{0}$$

Donc $\left|\overrightarrow{Fa}\right| = \left|\overrightarrow{Fc}\right|$

$$\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r^{\cancel{2}}} = \frac{mv^2}{\cancel{r}} \quad \Leftrightarrow \quad r = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 mv^2}$$

Question e :

Ep : Energie potentielle de l'électron dans le champ électrique exercé par le noyau

$$Ep = -\underbrace{W}_{\downarrow} = -\int_{+\infty}^{re} \overrightarrow{Fa} \times \overrightarrow{dr} = \int_{+\infty}^{re} -Fa \times dr$$

Travail de $\overrightarrow{Fa}$ pour amener l'électron de $+\infty$ à la distance re.

$$\begin{aligned} Ep = \int_{+\infty}^{re} \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2} dr &= \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0} \int_{+\infty}^{re} \frac{dr}{r^2} \\ &= \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0} \left[-\frac{1}{r} \right]_{+\infty}^{re} \\ &= \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0} \left[-\frac{1}{re} - \frac{1}{"\infty"} \right]_{+\infty}^{re} \\ &= \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r} \end{aligned}$$

Question f :

$$Ec = \frac{1}{2} mv^2$$

Dans la question d, on a démontré que $r = \dfrac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 mv^2}$

Donc $Ec = \dfrac{1}{2} \dfrac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r}$

Question g :

Relation de Broglie :

$$\underbrace{p}_{\substack{quantité \\ de \\ mouvement}} = mv = \frac{h}{\lambda}$$

Question h :

Hypothèse de Bohr : $2\pi r = n\lambda$

On sait que : $r = \dfrac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 mv^2}$

$$= \frac{n\lambda}{2\pi}$$

$$mv = \frac{h}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{h}{mv}$$

Donc $r = \dfrac{nh}{2\pi mv} = \dfrac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 mv^2}$

$$\Leftrightarrow v = \frac{e^2}{2\varepsilon_0 nh} \Leftrightarrow v^2 = \frac{e^4}{4\varepsilon_0{}^2 n^2 h^2}$$

$$r = \frac{e^2 4\varepsilon_0{}^2 n^2 h^2}{4\pi\varepsilon_0 me^4} = \frac{\varepsilon_0 n^2 h^2}{\pi me^2}$$

$$r_n = \frac{\varepsilon_0 h^2}{\pi me^2} n^2$$

Résumé début année :

Atome d'hydrogène :
L'énergie de l'e^- est quantifiée :

En : $\dfrac{13{,}6}{n^2}$ (eV)

1eV = 1,6$_{10}$$^{-19}$ J
n est le nombre quantique principal

En réalité, l'électron est caractérisé par 4 nombres quantiques :
- n qui définie une couche
- nombre quantique secondaire « l »

$0 \le l \le n-1$ qui définie une sous-couche
- nombre quantique magnétique « m »

$-l \le m \le +l$
- Nombre quantique de spin

$s = \pm\dfrac{1}{2}$

Pour un atome à plusieurs électrons, on remplit par ordre d'énergie croissante, soit à (n+l) croissant.

Règle de Pauli :
Dans la même case, on ne peut pas trouver 2 électrons par 4 nombres quantiques identiques

Or, une case est définie par 3 nombre (n, l, m).
Donc, les électrons différents, dans une même case, par le nombre q de spin, qui ne peut prendre que 2 valeurs → nombre d'électrons maxi/case = 2

Partie 2 :

Question 1 :

Bore (B)
Z = 5 = nombre de protons dans le noyau.
Dans un atome neutre, l'atome possède 5 électrons

Configuration électronique du Bore :

$$1s^2 \quad \underbrace{2s^2 2p^1}_{couche\,de\,valence}$$

Configuration électronique du Gallium :

$$1s^2\ 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6\ \underbrace{4s^2}_{couche\,de}\ 3d^{10}\ \underbrace{4p^1}_{valence}$$

Configuration électronique du Silicium :

$$1s^2\ 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6\ \underbrace{4s^2}_{couche\,de}\ 3d^{10}\ \underbrace{4p^3}_{valence}$$

TD n°2 : Les structures cristallines

Partie 1 :

Question 1 :

$$\underbrace{Ga}_{\substack{3ème\,colonne \\ 3e^- de\ valence}} \quad \underbrace{As}_{\substack{5ème\,colonne \\ 5e^- de\ valence}}$$

Chaque atome réagit de telle façon à acquérir la structure électronique du gaz rare le plus proche soit 8 électrons de valence.

GaAs = semi conducteur III V
SiC = IV IV

Structure cristalline de Si :
Arrangement cubique à faces centrées d'atomes Si, dont la moitié des sites tétraédriques est occupée.

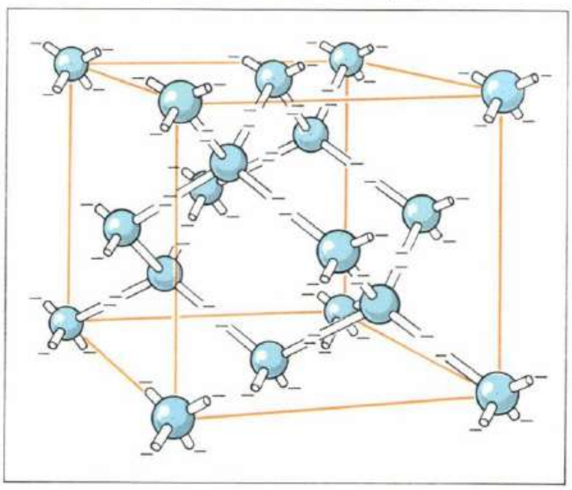
Cristal décrit par la maille élémentaire = entité la plus petite possible pour connaitre et reconstituer l'ensemble du cristal

Pour dessiner un cristal cubique à face centré, on place :
- 1 atome à chacun des 8 sommets du cube
- 1 atome au centre de chacune des 6 faces

Pour définir les sites tétraédriques :
- Couper le cube en 8 petits cubes
- Le centre de chaque petit cube est un site tétraédrique

Ou pour définir les sites tétraédrique :
- Sur les ¼ et les ¾ des grandes diagonales du cube

Structure d'un fragment de cristal de germanium ou de silicium. (Semi-conducteur intrinsèque.)



Nombre d'atome par maille élémentaire :

8 sommets $\times\frac{1}{8}$

6 faces $\times\frac{1}{2}$

4 sites tétraédrique occupé $\times 1$

Il y a donc $8\times\frac{1}{8}+6\times\frac{1}{2}+4=8$ atomes de Silicium par maille.

Le nombre d'atome par unité de volume est donc :

$$\frac{8}{\underbrace{a^3}_{\downarrow}}=\frac{8}{\left(5{,}43\times10^{-10}\right)^3}\simeq\frac{10}{5^3\times10^{-30}}=\frac{10}{5}\times\frac{10^{30}}{5^2}=\frac{100}{25}\times10^{28}=8\times10^{28}.m^{-3}$$

$a=5{,}43\mathring{A}=5{,}43\times10^{-10}m$

Question 2 :

Le GaAs est un cristal d'Arsenic dont la moitié des sites tétraédriques sont occupée par du Gallium.

Nb As/maille = $8\times\frac{1}{8}+6\times\frac{1}{2}=4$

Nb Ga/maille = 4

Question 3 :

Plans cristallins ou famille de plans. On les nomme avec les indices de Miller (hkl) :

- Plan (hkl) est perpendiculaire au vecteur de coordonnées [h; k; l]
- Plan (hkl) coupe $\begin{cases}(Ox)en\dfrac{1}{h}\\(Oz)en\dfrac{1}{k}\\(Oz)en\dfrac{1}{l}\end{cases}$

Le plan (100) est le plan où h = 1 et k=l=0

Il y a donc $4\times\frac{1}{4}+1=2$ atomes par unité de surface.

Partie 2 :

La densité ou la compacité se calcule grâce à la formule :

$$\frac{surface\ occupée\ par\ les\ atomes\ du\ plan}{surface\ du\ plan}$$

Pour un plan (100) :

$$densité=\frac{2\pi R^2}{a^2}\quad or\ 4R=a\sqrt{2}\rightarrow R=\frac{a\sqrt{2}}{4}$$

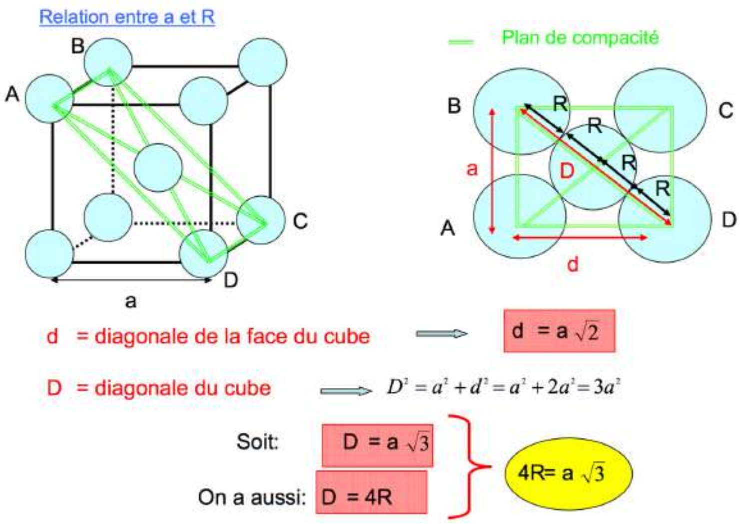
$$=\frac{2\pi\times2a^2}{16a^2}=\frac{\pi}{4}\approx\frac{3}{4}\approx75\%$$

Pour un plan (111) :

Nombre d'atome par plan : $3\times\frac{1}{2}+3\times\frac{1}{6}=2$

$$densit\acute{e}=\frac{2\pi R^2}{0{,}25\left(\left(a\sqrt{2}\right)^2\sqrt{3}\right)}=\frac{2\pi R^2\times 4}{\left(a\sqrt{2}\right)^2\sqrt{3}}=\frac{8\pi R^2}{16R^2\sqrt{3}}=\frac{\pi}{2\sqrt{3}}\approx\frac{3}{3{,}5}\approx\frac{85}{100}$$

a est la taille de maille
R = rayon de l'atome



TD n°3 : Semi-conducteurs intrinsèques, n et p

Rappel TD n°1:

L'énergie de l'électron de l'atome d'hydrogène est quantifiée et ne peut prendre que des valeurs discrètes.

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2}$$

Rappel TD n°2 :

Solide = beaucoup d'atomes polyélectroniques. On ne parle plus de niveaux mais de bandes d'énergie. À la température de 0 Kelvins, deux bandes d'énergie jouent un rôle particulier dans la détermination des propriété électroniques du solide.

La dernière bande est complètement plutôt pleine : La bande de valence
Celle immédiatement au dessus est plutôt vide : la bande de conduction

Entre ces 2 bandes, on a la bande interdite : le gap

Les électrons de la bande de valence sont localisés et contribuent à la cohésion du solide.
Les électrons de la bande de conduction sont délocalisés et participent à la conduction du courant électrique.

A t=0K, 3 cas :

1. Bande de conduction partiellement remplie d'électrons susceptibles de participer à la conduction

→ Métaux, conducteurs

2. Bande de conduction vide, Eg important > 2eV aucune électron ne conduit le courant

→ Isolant

3. Bande de conduction vide mais gap <2eV. L'apport d'énergie thermique kT ou lumineuse hO permet de promouvoir 1 électron de la bande de valence vers la bande de conduction.

→ Semi-conducteurs = Isolant à 0K, la conductivité augmente si la température augmente

Niveau de Ferni :
Niveau d'énergie occupé le plus élevé :

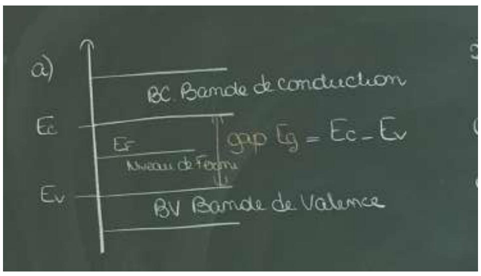
- Dans la bande de conduction (conducteur)
- Au milieu du gap (isolant ou semi-conducteur)

Partie 1 :

Question a :

Semi-conducteur intrinsèque (non dopé)

$$\text{Semi-conducteur} \xrightarrow[\text{ou } hO]{kT} \underbrace{e^-}_{\substack{\text{promu} \\ \text{dans la} \\ \text{bande de} \\ \text{conduction}}} + \underbrace{h^+}_{\substack{\text{trou dans} \\ \text{la bande de} \\ \text{valence à la} \\ \text{place de} \\ \text{l'électron}}}$$



Question b :

n = conducteur d'électron dans la bande de conduction
p = conducteur de h+ dans la bande de valence

Conducteur intrinsèque en porteur de charges, n_i définie par :

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

$$n_i^2 = Nc \exp\left(\frac{Ef - Ec}{kT}\right) Nv \exp\left(\frac{Ef - Ev}{kT}\right)$$

$$= Nc \times Nv \times \exp\left(\frac{Ef - Ec - Ef - Ev}{kT}\right)$$

$$= Nc \times Nv \exp\left(-\frac{Ec - Ev}{kT}\right)$$

$$= NcNv \exp\left(-\frac{Eg}{kT}\right)$$

$$n_i = \sqrt{NcNv} \exp\left(-\frac{Eg}{2kT}\right)$$

Partie 2 :

Silicium est un semi-conducteur intrinsèque (non dopé).
Les impuretés sont tous les atomes différents du Silicium

Question 1 :

$$n = Nc \exp\left(\frac{Ef - Ec}{kT}\right) = Nc \exp\left(-\frac{\Delta En}{kT}\right) = Nc \exp\left(\frac{Eg}{2kT}\right)$$

$$p = Nv \exp\left(-\frac{Ef - Ev}{kT}\right) = Nv \exp\left(-\frac{\Delta Ep}{kT}\right) = Nv \exp\left(-\frac{Eg}{2kT}\right)$$

Question 2 :

Pour le Silicium : $Eg = 1{,}12 eV$ $\quad 1eV = 1{,}6.10^{-19} J$ $\qquad T_{ambiante} = 300 K$

On calcule d'abord :

$$\exp\left(-\frac{Eg}{2kT}\right) = \exp\left(-\frac{1{,}12 \times 1{,}6.10^{-19}}{2 \times 1{,}38.10^{-23} \times 300}\right)$$

$$\simeq \exp\left(-\frac{1{,}1 \times \cancel{1{,}6}.10^{-19}}{2 \times \cancel{1{,}4}.10^{-23} \times 300}\right) \simeq \exp\left(-\frac{1}{2 \times 3} 100\right) \simeq \exp\left(-\frac{100}{6}\right) \simeq \exp\left(-\frac{100}{5}\right) \simeq e^{-20}$$

$$\simeq \frac{1}{e^{20}}$$

$$e \simeq 2{,}7$$

$$e^3 \simeq 19{,}71 \simeq 20$$

$$\left(e^3\right)^7 = e^{21} \simeq 20^7 \simeq 2^7 \times 10^7 \simeq 128.10^7$$

$$\frac{e^{21}}{e} = e^{20} \simeq \frac{128.10^7}{3} = 40.10^7$$

$$\frac{1}{e^{20}} \simeq \frac{1}{40.10^7} \simeq \frac{1}{4} 10^{-8}$$

On peut donc calculer n et p :

$$n = Nc\exp\left(\frac{Eg}{2kT}\right)$$
$$\simeq 2,82.10^{19} \times 0,25.10^{-8}$$
$$\simeq 2,8 \times 2,5 \times 10^{19} \times 10^{-9}$$
$$\simeq 7.10^{10}\,cm^{-3}$$

$$p = Nv\exp\left(-\frac{Eg}{2kT}\right)$$
$$\simeq 1,83.10^{19} \times 0,25.10^{-8}$$
$$\simeq 1,8 \times 2,5.10^{10}$$
$$\simeq 4,5.10^{10}\,cm^{-3}$$

Question 3 :

$ni =$ concentration intrinsèque en porteur de charge :

$$ni^2 \simeq n \times p$$
$$\simeq 7 \times 4,5.10^{20}$$
$$\simeq 31,5.10^{20}$$
$$\simeq 36.10^{20}$$
$$ni \simeq 6.10^{20}$$

Vu que ni est une caractéristique du semi-conducteur qui dépend de la température, on peut écrire :

$$ni = \sqrt{BC} \times T^{\frac{3}{2}} \times \exp\left(-\frac{Eg}{2kT}\right)$$

Partie 3 :

Semi-conducteur extrinsèque (=dopé)
Le dopage est l'introduction de très faible quantité d'impuretés (atome différent du Silicium). Le but étant d'augmenter la conductivité électrique des semi-conducteurs sans élévation de température.

Question a :

Dans un semi-conducteur intrinsèque :

$$n = N\exp\left(\frac{E_{fi} - E_c}{kT}\right)$$

$$p = Ne\exp\left(-\frac{E_{fn} - E_v}{kT}\right)$$

Donc $p = n = ni$

Question b :

Le dopage n à pour but de produire un excès d'électron libres. Les porteurs de charges sont majoritairement des électrons.
L'atome de Silicium à 4 électrons de valence et peut donc engager 4 liaisons.

Le dopage N est donc l'introduction d'un élément de la 5ème colonne (5 électrons de valence).
Il y aura donc 4 électrons engagés dans des liaisons avec les atomes de Silicium
Et 1 électron faiblement lié à l'atome qui rejoint la bande de conduction.
Semi-conducteur type N, porteurs majoritairement d'électron.

$n = Nd + ni$

Comme $Nd \gg Ni$ $\qquad n \simeq Nd$

On a aussi $Nd \gg p$

Intrinsèque : $ni = n = Ne\exp\left(\frac{E_{fi} - E_c}{kT}\right)$

Extrinsèque (dopé N) : $Nd = n = Ne\exp\left(\frac{E_{fn} - E_c}{kT}\right)$

$$\frac{Nd}{Ni} = \frac{Ne}{Ne}\exp\left(\frac{E_{fn} - E_c}{kT}\right)\exp\left(-\frac{E_{Fi} - E_c}{kT}\right)$$

$$= \exp\left(\frac{E_{fn} - E_{fi}}{kT}\right)$$

$$\ln\frac{Nd}{ni} = \frac{E_{fn} - E_{fi}}{kT}$$

$$\underbrace{kT}_{positif} \times \underbrace{\ln\frac{Nd}{ni}}_{Nd \gg Ni \text{ donc positif}}$$

Donc $E_{fn} > E_{fi}$

Question c :

Le dopage p à pour but de créer un excès d'h+ par ajout d'un élément de la 3ème colonne.
Atome accepteur : il leur manque 1 électron pour engager 4 liaisons.
Ces atomes vont capter 1 électron dans le réseau et y laisser 1 trou h^+.
Na atome dopant → Nah^+
Dopage p : porteurs de charge majoritairement h^+

$Na + ni = p$

$Na \gg ni$ donc $p \simeq Na$

On a aussi $Na \gg n$

Intrinsèque : $p = ni = Ne\exp\left(\frac{E_{fi} - E_v}{kT}\right)$

Extrinsèque (dopé P) : $Np = Na = Ne\exp\left(\frac{E_{fp} - E_v}{kT}\right)$

$$\frac{Na}{Ni} = \frac{Ne}{Ne}\exp\left(\frac{E_{fp} - E_v}{kT}\right)\exp\left(-\frac{E_{Fi} - E_v}{kT}\right)$$

$$= \exp\left(\frac{E_{fi} - E_{fp}}{kT}\right)$$

$$\ln\frac{Na}{ni} = \frac{E_{fi} - E_{fp}}{kT}$$

$$E_{fp} = E_{fi} - kT\ln\frac{Na}{ni}$$

Partie 4 :

Si dopé n : $Nd = 10^{18}\,cm^{-3}$

Question 1 :

Hypothèses :

$Nd \approx n = Ni + Nd$

$Nd \gg Ni$

$n \gg p$

$n = Nd = 10^{18}\,cm^{-3}$

On sait que $ni^2 = n \times p$

Donc : $p = \dfrac{ni^2}{Nd}$

D'après Partie 2, question 3 : $ni = 6 \times 10^{10}\,cm^{-3}$

Donc $p = \dfrac{6^2 \times 10^{20}}{10^{18}} = 36 \times 10^2$

On vérifie les hypothèses :

$Nd \gg Ni$

$10^{18} \gg 10^{10}$

$Nd \gg p$

$10^{18} \gg 3600$

Question 2 :

On a vu que :

$$E_{Fn} = E_{Fi} + \underbrace{kT \ln \frac{Nd}{ni}}_{positif}$$

$$= \overbrace{1{,}38 \times 10^{-23}}^{J.K^{-1}} \times \overbrace{298}^{K} \times \ln \overbrace{\frac{10^{18}}{6 \times 10^{10}}}^{\frac{cm^{-3}}{cm^{-3}} = sans\ unité}$$

$$\approx 1{,}4 \times 10^{-23} \times 300 \left(\ln 10^{18} - \ln\left(6 \times 10^{10}\right) \right)$$

$$\approx 4{,}2 \times 10^{-21} \times \left(18 \ln 10 - \ln 6 - 10 \ln 10\right)$$

$$\approx 4{,}2 \times 10^{-21} \left(8 \ln 10 - \ln 6\right)$$

$$\approx 4{,}2 \times 10^{-21} \left(8 \times 2{,}3 - \ln 6\right)$$

$$\approx 4{,}2 \times 10^{-21} \times 17$$

$$\approx 70 \times 10^{-21} = 7 \times 10^{-20}\,J$$

$$\approx 0{,}4\,eV$$

Partie 5 :

Question 1 :

Hypothèses :

$p \approx Na$

$Na \gg Ni$

$Na \gg n$

$p = Na = 10^{16}\, cm^{-3}$

$$n = \frac{ni^2}{Na} = \frac{\left(6\times10^{10}\right)^2}{10^{16}} = 3{,}6\times10^{5}\, cm^{-3}$$

On a vu que :

$$E_{Fp} = E_{Fi} + kT\ln\frac{ni}{Na}$$

$$\approx 1{,}38\times10^{-23} + 4{,}2\times10^{-21}\ln\frac{6\times10^{10}}{10^{16}}$$

$$\approx -0{,}3eV$$

TD n°4 : Dopage et conductivité

Rappels :

Conductivité électrique : $\sigma\,(Sm^{-1})$ (Siemens par mètre).
C'est l'aptitude d'un matériaux à laisser les charges électriques se déplacer librement soit à permettre le passage du courant électrique.
$\sigma =$ inverse de la résistivité correspond à la conductance d'une portion de matériau de 1m de long et de section $1m^2$
= Rapport de la densité de courant par l'intensité du champ électrique

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_n)$$
$$q = e$$
$\mu =$ mobilité des porteurs ($m^2V^{-1}s^{-1}$)

Partie 1 :

Question a :

SiC Si et C appartiennent tous les deux à la 4ème colonne, ils ont chacun 4 électrons de Valence.
Dopage à l'azote (N).
5ème colonne, donc 5 électrons de valence, soit 1 électron de plus que Si et C.
1 électron libre généré par arme d'azote $\Rightarrow$ dopage type n

Question b :

$\sigma_{25i} = 8\,Sm^{-1}$ à 25°C
On souhaite obtenir $\sigma_{25n} = 1000\,Sm^{-1}\,à\,25°C$
$\sigma_{25i} = e \times ni\left(\mu_p + \mu_n\right)$ car $ni = n = p$

Semi conducteur dopé n à 25°C :

Hypothèses :
$$n \approx Nd$$
$$Nd \gg Ni$$
$$Nd \gg p$$

$$\sigma_{25n} = e\left(Nd\mu_n + \underbrace{p\mu_p}_{negligeable}\right)$$

Donc $G_{25n} = eNd\mu n$

$$\rightarrow Nd = \frac{G_{25n}}{e\mu_n}$$
$$= \frac{1000}{1{,}6 \times 10^{-19} \times 0{,}4}$$
$$= \frac{10^{22}}{0{,}8}$$
$$= 1{,}25 \times 10^{22}$$

Partie 2 :

Question b :

Hypothèses (dopage p) :

$p \approx Na$

$Na \gg Ni$

$Na \gg n$

$\sigma_p = eNa\mu_p$

Donc $Na = \dfrac{Gp}{e\mu_p}$

$$Na = \frac{200}{1{,}6 \times 10^{-19} \times 0{,}04}$$

$\approx 3 \times 10^{22}$

$N_{si} \approx 5 \times 10^{22}$

$\approx 5 \times 10^{28} m^{-3}$

% de dopant :

$$\frac{3 \times 10^{22}}{5 \times 10^{28}} \approx 10^{-6} \approx 10^{-8}\%$$

Soit 1ppm

TD n°5 : Mobilité des porteurs de charge

Partie 2 :

SiC intrinsèque à 25°C, $\sigma = 85 cm^{-1}$

Question a :

On cherche ni à 25°C

$$\sigma = q\left(n\mu_n + p\mu_p\right)$$

Dans un semi-conducteur intrinsèque : $n_i \approx n \approx p$

$$\sigma = e \times ni\left(\mu_n + \mu_p\right)$$

$$ni = \frac{\sigma}{e\left(\mu_n + \mu_p\right)}$$

$$= \frac{8}{1{,}6 \times 10^{-19}\left(4 \times 10^{-2} + 2 \times 10^{-2}\right)}$$

$$= \frac{8}{1{,}6 \times 6} \times \frac{1}{10^{-21}}$$

$$\approx \frac{8}{10} \times 10^{21}$$

$$\approx 8 \times 10^{20} m^{-3}$$

$$\approx 8 \times 10^{14} cm^{-3}$$

Question b :

A 200°C (473K)
Evolution de ni avec T :

$$ni = AT^{\frac{3}{2}}$$

$$\frac{ni(473)}{ni(298)} = \left(\frac{473}{298}\right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{1{,}12 \times 10^{-19}}{2 \times 1{,}38 \times 10^{-23}}\left(\frac{1}{473} - \frac{1}{298}\right)\right)$$

$$= \frac{473}{298} \approx \frac{500}{300}$$

Partie 3 :

σ augmente, quand la température augmente.
Si $Eg = 1{,}12 eV$

$$\sigma(298) = 4{,}3 \times 10^{-4} Sm^{-1}$$

On cherche $\dfrac{T}{\sigma(T)} = 200 Sn^{-1}$

Cours : μ proportionnel à $\mu 0 \left(\dfrac{T}{T_0}\right)^{-\frac{3}{2}}$

n et p sont proportionnels à $T^{\frac{3}{2}}$

Donc $\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{Eg}{2kT}\right)$

$$\frac{\sigma(T)}{\sigma(298)} = \exp\left(-\frac{Eg}{2k}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298}\right)\right)$$

On isole $\frac{1}{T} = \frac{1}{298} - \frac{2k}{Eg}\ln\left(\frac{\sigma(T)}{\sigma(298)}\right)$

Donc :

$$\frac{1}{T} = \frac{2\times1,38\times10^{-23}}{1,12\times1,6\times10^{-19}}\ln\frac{200}{4,3\times10^{-4}}$$

$$\approx \frac{1}{300} - \frac{2\times10^{-23}}{10^{-19}}\ln\frac{2\times10^{2}}{4\times10^{-4}}$$

$$\approx \frac{1}{300} - 2\times10^{-4}\left(\underbrace{\ln\frac{1}{2}}_{-\ln 2} + 6\ln 10\right)$$

$$\approx 0,33\times10^{-2} - 2\times10^{-4}(-0,7+6\times2,3)$$

$$\approx 33\times10^{-4} - 26,2\times10^{-4}$$

$$\approx 6,8\times10^{-4}$$

Donc : $T = \frac{1}{6,8}10^{4} \approx \frac{1}{10}10^{4} \approx 1000K$

Partie 4 :

Question a :

Vitesse de dérive de l'electron dans le champ électrique :

$\vec{v} = -\mu\vec{E}$ mobilité de l'electron

L'électron se déplace dans le sens opposé au champ électrique.

Question b :

$$\underbrace{\vec{E}}_{\substack{vecteur\\ Vcm^{-1}}} = -\overrightarrow{\underbrace{grad}_{\substack{operteur\\ mathématique\\ vectoriel}}} \times \underbrace{V}_{\substack{différence\\ de\\ potentiel}}$$

On se place dans un système en une dimension (Ox).

On peut donc écrire : $E_x = -\frac{dV}{dx}$

Et donc $E = \left\|\vec{E}\right\| = \frac{V}{d}$

$$E = \frac{1}{4\times10^{-3}} = 250Vcm^{-1}$$

Question c :

$$v = \mu E$$

$$= 0,14\times250$$

$$= 35ms^{-1}$$

Question d :

Temps de traversé de l'electron :

$$v=\frac{d}{t}\rightarrow l=\frac{d}{v}\rightarrow t=\frac{4\times 10^{-3}}{35}=0{,}11ms$$

Question e :

$v(473K)\rightarrow \mu(473K)$ or $\mu(T)=\mu(T_0)\times\left(\frac{T}{T_0}\right)^{-\frac{3}{2}}$

$$\mu(473)=\mu(298)\times\left(\frac{473}{298}\right)^{-\frac{3}{2}}$$

Partie 5 :

Question a :

La loi représentant la diffusion est la loi de Fick

$$\underbrace{\vec{\Phi}}_{\substack{flux\,de\\particules}}=-\underbrace{D}_{\substack{coef\ de\\diffusion\\de\,l'espece\\(cm^2s^{-1})}}\overrightarrow{grad}\underbrace{C}_{\substack{concentration\\de\,particules}}$$

$$\overrightarrow{grad}\begin{pmatrix}\frac{\partial}{\partial x}\\ \frac{\partial}{\partial y}\\ \frac{\partial}{\partial z}\end{pmatrix}$$

Pour des particules chargées q , on peut définir un courant par : $\underbrace{Jd}_{\substack{courant\,de\\diffusion}}=-qD\overrightarrow{grad}n$

(analogue au courant de conduction $\overrightarrow{Jc}=qn\vec{v}$)

Si on se limite aux systèmes unidimensionnels le long de (Ox) :

$$Jdx=-qD\frac{dn}{dx}\underbrace{\vec{i}}_{\substack{vecteur\\unitaire\\le\,long\,de\\(Ox)}}$$

Question b :

Dans l'obscurité :

$$ni^2=n\times p$$

Donc $p=\frac{ni^2}{n}=\frac{(1{,}4\times 10^{10})^2}{2\times 10^{18}}=\frac{1{,}96\times 10^{20}}{2\times 10^{18}}$

$$\simeq\frac{2}{2}\times\frac{10^{20}}{10^{18}}\simeq 10^2\simeq 100trous.cm^{-3}$$

Question c :

Sous éclairage :

$$p_{tot} = \underbrace{p_i}_{\substack{concentration \\ initiale\,en\,h^+ \\ en\,x=0}} + \underbrace{p_e}_{\substack{concentration \\ amenée\,par \\ l'éclairage}}$$

$$p_{tot} = 10^2 + 10^6 \approx 10^6\,cm^{-3}$$

$10^2 \ll 10^6$: surpopulation locale en h^+ en $x = 0$

Question d :

$$p(x) = p(x=0)\exp\left(-\frac{x}{lp}\right)$$

(lp = longueur de diffusion des h^+ dans le semi-conducteur)

Question e :

$$\frac{p(x)}{p(x=0)} = \exp\left(-\frac{x}{lp}\right)$$

$$lp = -\frac{x}{\ln\frac{p(x)}{p(x=0)}} = \frac{x}{\ln\frac{p(x=0)}{p(x)}}$$

Donc : $lp = \dfrac{10\times10^{-6}}{\ln\dfrac{10^6}{10^2}} = \dfrac{10^{-6}}{4\ln 10} \simeq \dfrac{10\times10^{-6}}{4\times2{,}3} \simeq \dfrac{10\times10^{-6}}{9{,}2} \simeq 10^{-6}\,cm = 1\,\mu m$

Question f :

$$Dp = up\frac{kT}{e}\left(cm^2\times s^{-1}\right)$$

$$Dp = 1900\times\frac{1{,}38\times10^{-23}\times298}{1{,}6\times10^{-19}}$$

$$\simeq \frac{19\times1{,}4\times3}{1{,}6}\times\frac{10^2\times10^{-23}\times10^2}{10^{-19}}$$

$$\simeq \frac{19\times4{,}2}{1{,}6} = 50\,cm^2\times s^{-1}$$

Question g :

Courant de diffusion des h^+ :

$$\vec{j_o} = \vec{j_h} = -eDp\frac{dp(x)}{dx}\vec{i}$$

Or, $p(x) = p(x=0)\times\exp\left(-\dfrac{x}{lp}\right)$

$$\frac{dp(x)}{dx} = p(x=0)\times\left(-\frac{1}{lp}\right)\times\left(\exp-\frac{x}{lp}\right)$$

$$\rightarrow \vec{j_h} = -e\times D_p\times p(x=0)\times\left(-\frac{1}{lp}\right)\times\exp\left(-\frac{x}{lp}\right)\vec{i}$$

$$jh = \frac{e \times D_p \times p(x=0)}{lp} \exp\left(-\frac{x}{lp}\right)$$

$$= \frac{1{,}6 \times 10^{-19} \times 50 \times 10^{-4} \times 10^{6}}{10^{-6}} \exp\left(\frac{2\mu m}{1\mu m}\right)$$

$$= 1{,}6 \times 50 \times 10^{-19} \times 10^{-4} \times 10^{6} \times e^{-2}$$

$$= 80 \times 10^{-11} \times \frac{1}{e^{2}}$$

$$\simeq \frac{8}{7{,}3} \times 10^{10}$$

$$j_h \simeq 10^{-10}\, Am^{-2}\, (ampère\ par\ mètre)$$

Question h :

Flux de trous pour $x = 2\mu m$

$$\Phi_p = \frac{j_h}{e} = \frac{10^{-10}}{1{,}6 \times 10^{-19}} \simeq \frac{10}{1{,}6} \times \frac{10^{-11}}{10^{-19}} \simeq 6 \times 10^{8}\, m^{-2} s^{-1}$$

TD 7 : Jonctions PN. Diode

Partie 1 :

On sait que $\begin{cases} \overrightarrow{v_n} = -\mu n \times \vec{E} \\ \overrightarrow{v_P} = \mu p \times \vec{E} \end{cases}$

On a vu que $\vec{j} = q \times n \times \vec{v}$

Donc : $\begin{cases} \overrightarrow{j_n} = -e \times n \times \overrightarrow{v_n} \\ \overrightarrow{j_p} = e \times p \times \overrightarrow{v_p} \end{cases}$

On en déduit que : $\begin{cases} \overrightarrow{j_n} = e \times n \times \mu_n \times \vec{E} \\ \overrightarrow{j_p} = e \times p \times \mu_p \times \vec{E} \end{cases}$

Selon l'axe (Ox) : $\begin{cases} j_n x = e \times n \times \mu_n \times E_x \\ j_p x = e \times p \times \times \mu_p \times E_x \end{cases}$

Partie 2 :

Question a :

jp_diff : Densité du courant de diffusion

$$\begin{aligned} jp\_diff &= -e \times Dp \times \frac{dp(x)}{dx} \\ &= -e \times \mu_p \frac{kT}{e} \times \frac{dp(x)}{dx} \\ &= \mu_p kT \times \frac{dp(x)}{dx} \end{aligned}$$

Question b :

$\rightarrow$ densité totale de courant de trous J_p

$$J_p = \underbrace{j_h}_{conduction} + jp\_diff$$

$$J_p = e \times p \times \mu_p \times Ex - \mu_p \times kT \times \frac{dp(x)}{dx}$$

* Diffusion :

La loi des mélanges suppose que le electrons vont vers le coté P et les trous (h^+)vont vers le coté N. Durant la mise à l'équilibre, les électrons vont laisser des ions D^+ , et les trous vont laisser des ions A^-

$\rightarrow$ Formation d'une barrière de potentiel qui induit la formation d'un champ $\vec{E}$ dirigé du + vers le -.

* Conduction :

Le champ $\vec{E}$ s'oppose à la diffusion des espèces et la compense.

$\vec{E}$ s'oppose au mouvement des electrons et des trous.

$w_o =$ largeur de la $\begin{cases} zone\ des\ charges\ d'espace(ZCE) \\ zone\ dépeuplée \\ zone\ de\ déplétion \end{cases}$

A la jonction : il ne se passe rien (conduction compense diffusion), donc $J_p = 0$

Question c :

Le champ électrique $\vec{E}$ dérive d'un potentiel : $\vec{E} = -\overrightarrow{grad} \times V$
Si on se limite à (Ox)

$$E_x = -\frac{dv(x)}{dx}$$

$$dv(x) = -Ex \times dx$$

$$\int_{-xa}^{+xn} dv(x) = v_\Phi = -\int_{-xa}^{+xn} Ex\,dx$$

Question d :

$$J_p = e \times \mu_p \times p \times E - \mu_p \times kT \times \frac{dp(x)}{dx} = 0$$

$$e \times \mu_p \times p \times E = \mu_p \times kT \times \frac{dp(x)}{dx}$$

$$E = \frac{kT}{e}\frac{dp(x)}{p(x)} \times \frac{1}{dx}$$

$$V_\Phi = \int_{-xa}^{+xn} -\frac{kT}{e} \times \frac{dp(x)}{p(x)} \times \frac{1}{dx} \times dx$$

$$= -\frac{kT}{e}\int_{-xa}^{+xn} \frac{dp(x)}{p(x)} = -\frac{kT}{e}\left[\ln p(x)\right]_{-xa}^{+xn}$$

$$= -\frac{kT}{e}\left[\underbrace{\ln p(xn)}_{\substack{Si\ dopé\ N \\ n=Nd \\ ni^2=n\times p}} - \underbrace{\ln p(-xa)}_{\substack{p(-xa) \\ Si\ dopé\ P \\ p(-xa)=Na}}\right]$$

$$ni^2 = Nd \times p(xn)$$

$$p(xn) = \frac{ni^2}{Nd}$$

Donc $V_\Phi = -\frac{kT}{e}\left(\ln\frac{ni^2}{Nd} - \ln Na\right)$

$$= -\frac{kT}{e}\ln\left(\frac{ni^2}{Nd \times Na}\right)$$

Donc $V_{\Phi} = \dfrac{1{,}38\times10^{-23}\times300}{1{,}6\times10^{-19}}\times\ln\left(\dfrac{10^{18}10^{15}}{\left(1{,}45\times10^{10}\right)^{2}}\right)$

$$\simeq \frac{1{,}4\times3}{1{,}6}\times\frac{10^{-23}\times10^{2}}{10^{-19}}\times\ln\frac{10^{33}}{\left(\frac{3}{2}\right)^{2}\times10^{20}}$$

$$\simeq \frac{4{,}2}{1{,}6}\times10^{-2}\times\ln\left(10^{13}\times\frac{4}{9}\right)$$

$$\simeq 3\times10^{-2}\times\left[13\ln10+\ln0{,}5\right]$$

$$\simeq 3\times10^{-2}\times\left[30-0{,}7\right]$$

$$\simeq 3\times29{,}3\times10^{-2}$$

$$\simeq 0{,}88V$$

Partie 2 :

Champ électrique moyen dans la ZCE :

$E_0 = \dfrac{v_{\Phi}}{w_0}$ ($w_0 =$ largeur de la ZCE)

$$E_0 = \frac{0{,}88}{0{,}96\times10^{-6}} \simeq 10^{6}V\times m^{-1}$$

TD 8 : MOSFETs, Portes Logiques et Technologie CMOS

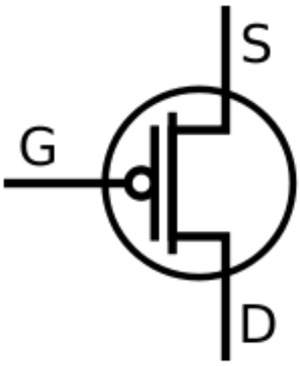
MOS = Metal Oxide Semi-conducteur
FET = Field Effect Transistor
= Transistor à effet de champ, c'est un transistor unipolaire (un seul type de porteur de charge)
≠ Transistors bipolaires (NPN, PNP)
= Utilise un champ électrique pour contrôler la forme et la conductivité d'un canal dans un semi-conducteur

La présence de ce champ $\vec{E}$ peut autoriser ou réduire la conduction électrique dans le canal (enrichissement ou appauvrissement).
But : Moduler le courant qui traverse le transistor à l'aide du potentiel appliqué à la grille

Partie 1 :

Question a :

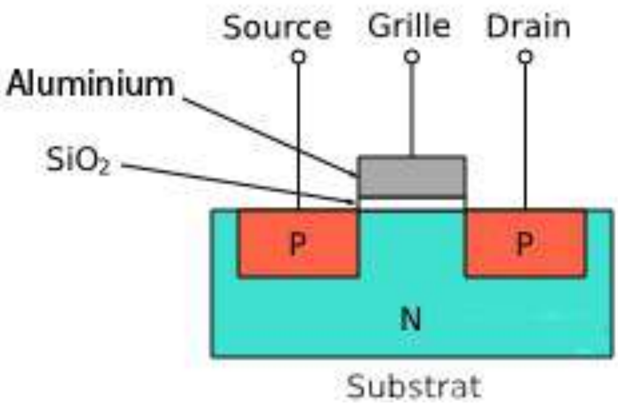
Représentation schématique



S = Source
D = Drain
G = Gate = Grille

Question b :

Schéma en coupe 2D



Isolant = Silice (SiO_2)
= Oxyde

SiO_2 se forme naturellement à la surface des wafers de Si = couche de passivation protectrice
But : créer un courant de conduction entre la source et le drain

S et D sont très fortement dopé P par rapport au substrat faiblement dopé N.
Courant I_{SD} créé en appliquant un potentiel à la grille qui va induire le champ électrique de conduction.

Les porteurs libres du canal de conduction sont les même que ceux de Set D et de type opposé à B.

Canal = continuité électrique entre la Source et le Drain

Le substrat est relié à la masse.

Fonctionnement du PMOS en fonction de Vg
* Vg = 0 état OFF PMOS bloqué
* Vg < 0 état ON transistor devient passant
* Vg > 0 → Les electrons à la jonction SC/oxyde vont être repoussés

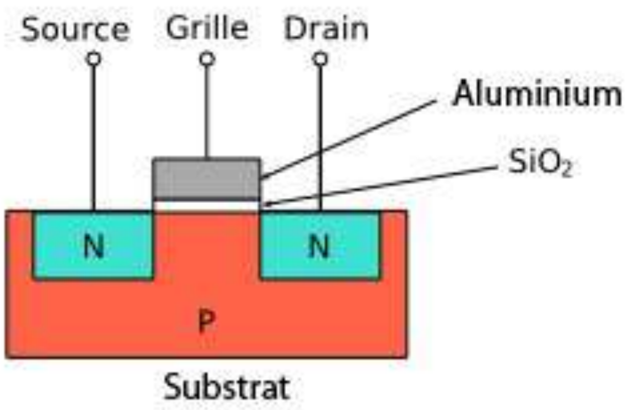
Une zone de déplétion apparait à la jonction SC/oxyde (e^- repoussés)

Vg ↘ Vg <V_{seuil}

Zone d'inversion :
Zone où les porteurs de charge libres ne sont pas les porteurs mais du substrat. On a formé le canal.

Lorsque Vg devient tiopnegative, on a deux autres régimes
* Pincement
* Saturation (le transistor ne fonctionne plus)

Vg > 0 accumulation d'electron à la jonction SC/oxyde → PMOS bloqué



Vg <= 0 NMOS Bloqué
Vg > 0 NMOS Passant

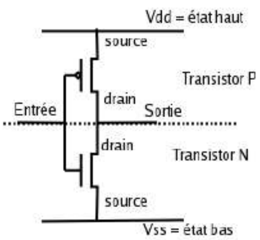
Partie 2 :

Question a :

CMOS = Complementary Metal Oxyde Semi-Conductor

Question b :

Inverseur CMOS = Porte NOT



Etat bas : Vg < 0
Etat haut : Vg > 0

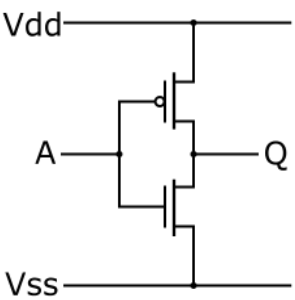
Partie 3 :

PORTE NOT

Question a :

a	$\overline{a}$
0	1
1	0

Question b :

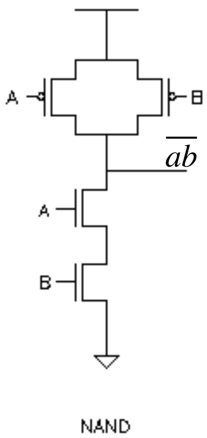


PORTE NAND :

Question a :

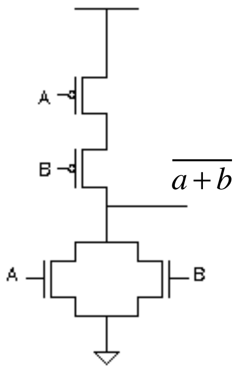
a	b	$\overline{ab}$
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Question b :



PORTE NOR :

a	b	$\overline{a+b}$
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0



NOR