

De l'atome à la puce

Devoir surveillé de rattrapage

Durée : 2 heures

Calculatrices autorisées (tous types)

Les exercices sont indépendants

Vous devez expliquer le détail de votre raisonnement. Un résultat seul ne suffit pas.

Les données utiles :

Soit h la constante de Planck : $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$

Soit ϵ_0 la permittivité du vide. $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}$

Soit G la constante gravitationnelle : $G = 6,674 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ (ou $\text{N.m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$)

On a aussi $1/(4\pi\epsilon_0) = 8,9 \cdot 10^9 \text{ N.m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ (vitesse de la lumière)

Le "gap" du silicium est $E_g = 1,12 \text{ eV}$ à 25°C

On prendra la charge élémentaire $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$

Dans le silicium, $\mu_p = 0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ et $\mu_e = 0,14 \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

A. Le modèle de Bohr.

Soit un électron de masse m_e , un noyau de masse m_n ,

Retrouvez, selon l'hypothèse de Bohr, la relation liant l'énergie totale de l'électron de l'atome d'hydrogène au "nombre quantique principal" n .

a. Faites le bilan des forces s'appliquant sur l'électron tournant à une distance r_e et une vitesse v_e autour du noyau.

d. A l'équilibre, exprimez r_e en fonction de e , m_e et v_e .

c. Exprimez l'énergie cinétique E_c de l'électron en fonction de e et r_e . Exprimez l'énergie potentielle E_p de l'électron dans le champ électrique exercé par le noyau en fonction de e et r_e .

d. Ecrivez la relation de De Broglie associant quantité de mouvement et longueur d'onde.

e. En appliquant l'hypothèse de Bohr, exprimez le rayon r_n de l'orbite n de l'électron en fonction de n et m_e (et des autres constantes fondamentales).

Application numérique :

Lors de la relaxation, il y a émission d'une radiation, d'énergie $h\nu$ (relaxation radiative).

Soit ν la fréquence de la radiation

Calculer la longueur d'onde correspondant au passage de l'électron :

- a- de l'état $n=2$ à l'état fondamental
- b- du troisième état excité au 1er état excité

B. Dopage et conductivité du silicium.

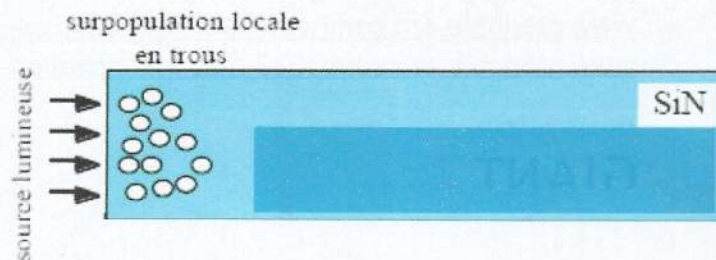
Le silicium est, non dopé, un semi-conducteur intrinsèque. On négligera la présence d'éventuelles impuretés avant dopage. Sa conductivité intrinsèque est $\sigma_i = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ S.m}^{-1}$.

- a. Ce silicium est dopé par des atomes d'azote.
- b. Calculer la concentration (n ou p selon le cas) d'atomes de dopant à introduire dans le Si pour qu'il possède une conductivité de 530 S.m^{-1} .
- c. Vérifier l'approximation faite en b.
- d. Calculer le % d'atomes de dopant par rapport au nombre d'atomes de Si, sachant qu'il y a $4,99 \cdot 10^{22}$ atomes de Si par cm^3 .
- e. Faire le schéma énergétique des bandes de valence, interdite et de conduction, en faisant apparaître E_v , E_c , E_{Fi} , E_g . On considèrera, pour le Si intrinsèque, qu'il y a autant de porteurs de charges e^- (électrons) que h^+ (trous) et donc que le niveau de Fermi est situé au milieu de la bande interdite.
- f. Rappeler les expressions des concentrations en électrons (n) et en trous (p) dans chacune des bandes.
- g. Calculer la variation de l'énergie de Fermi pour le silicium de la question b., par rapport au silicium intrinsèque, pour une température de 25°C .
- h. Sur un nouveau schéma, positionner le niveau de Fermi E_{Fn} (respecter l'échelle).

C. Diffusion des charges dans un semiconducteurs

- a. Rappeler la loi régissant la diffusion (Fick générale, puis appliquée aux charges)

On considère une zone d'un semi-conducteur de type n éclairée (en $x = 0$), tandis que le reste du même semi-conducteur est dans le noir complet. L'énergie qu'amène l'éclairage permet la génération de paires électrons-trous.



On prend $n = 1.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ et $n_i = 1,4.10^{10} \text{ cm}^{-3}$. L'éclairage amène localement (en $x = 0$) 10^6 cm^{-3} trous.

- b. A quoi est égal p dans le noir ? (pour $x=\infty$) ?
- c. A quoi est égal $p(x=0)$ sous l'éclairage ?
- d. Rappeler la relation liant $p(x)$ à $p(x=0)$, x et L_p , longueur de diffusion des trous dans le silicium.
- e. Posez l'application numérique permettant de calculer la longueur de diffusion des trous dans ce matériau, sachant que la concentration de trous est égale à $p(x=5 \mu\text{m}) = p(x=\infty) + 100 \text{ cm}^{-3}$.

D. Procédés de lithographie

- a. Rappelez le procédé général de gravure par lithographie (photorésist, illumination, lift-off, évaporation, épitaxie, etc.)
- b. Décrivez, étape par étape (avec des schémas clairs), la gravure d'un transistor bipolaire npn. Précisez les matériaux utilisés.
- c. Décrivez, étape par étape (avec des schémas clairs), la gravure d'un transistor unipolaire nMOS. Précisez les matériaux utilisés.

E. Transistor unipolaire

Expliciter le fonctionnement d'un transistor nMOS à enrichissement. Utilisez tous les schémas que vous jugerez utile d'utiliser.