

**L3 Physique et Applications****Examen de Physique des Composants—1<sup>ère</sup> session****Durée 3 heures**

Documents non autorisés. Calculatrices autorisées. Les téléphones portables doivent être éteints.

**RAPPELS** : pour une structure à une dimension suivant  $x$ 

Equation de Poisson dans un semiconducteur : 
$$\frac{d\mathcal{E}}{dx} = -\frac{d^2\phi(x)}{dx^2} = \frac{\rho}{\epsilon}$$

Modèle de dérive-diffusion du courant : 
$$J_n(x,t) = e.n(x,t).\mu_n.\mathcal{E} + e.D_n \frac{\partial n(x,t)}{\partial x}$$

$$J_p(x,t) = e.p(x,t).\mu_p.\mathcal{E} - e.D_p \frac{\partial p(x,t)}{\partial x}$$

Relation d'Einstein : 
$$D = \frac{k_B T}{e} \mu$$

Equations de continuité : 
$$\frac{\partial n(x,t)}{\partial t} = \frac{1}{e} \frac{\partial J_n(x,t)}{\partial x} + G_n - R_n$$

$$\frac{\partial p(x,t)}{\partial t} = -\frac{1}{e} \frac{\partial J_p(x,t)}{\partial x} + G_p - R_p$$

Densité d'électrons dans la bande de conduction d'un semiconducteur non dégénéré :

$$n = N_C \exp\left(\frac{E_F - E_C}{k_B T}\right)$$

Densité de trous dans la bande de valence d'un semiconducteur non dégénéré:

$$p = N_V \exp\left(\frac{E_V - E_F}{k_B T}\right)$$

Constantes universelles et données à  $T = 300$  K pour le silicium et l'oxyde de silicium

$k_B T = 26$ meV	$N_V = 10^{19}$ cm <sup>-3</sup>	$N_C = 2,8 \times 10^{19}$ cm <sup>-3</sup>	$n_i = 10^{10}$ cm <sup>-3</sup>	$E_g = 1,12$ eV
$\mu_n = 1345$ cm <sup>2</sup> /Vs	$\mu_p = 458$ cm <sup>2</sup> /Vs	$e = 1,6 \times 10^{-19}$ C	$k_B = 1,38 \times 10^{-23}$ J.K <sup>-1</sup>	$= 8,62 \times 10^{-5}$ eV.K <sup>-1</sup>
$\epsilon_{SC} = 10^{-10}$ F.m <sup>-1</sup>	$\epsilon_{OX} = 3,2 \times 10^{-13}$ F.cm <sup>-1</sup>			

**I. Choix multiples :***Plus d'une réponse peut être correcte. Les mauvaises réponses seront pénalisées.*

Sur votre copie, notez la (ou les) lettre(s) de la (ou des) réponse(s) correcte(s). Par ex. : 1. a ; 2. b,c ; 3. d, e,f ; etc.

1. Quand la température augmente...

- a. **La concentration d'électrons dans la bande de conduction augmente, quelle que soit la gamme de température, dans un semiconducteur intrinsèque.**
- b. La concentration d'électrons dans la bande de conduction augmente, quelle que soit la gamme de température, dans un semiconducteur dopé n.
- c. La concentration d'électrons dans la bande de conduction augmente, quelle que soit la gamme de température, dans un semiconducteur dopé p.
- d. La concentration d'électrons dans la bande de conduction augmente, quelle que soit la gamme de température, dans un semiconducteur extrinsèque.
- e. La concentration de trous dans la bande de valence augmente *par rapport à la concentration d'électrons dans la bande de conduction*, pour une gamme de température précise, dans un semiconducteur intrinsèque.
- f. La concentration de trous dans la bande de valence augmente *par rapport à la concentration d'électrons dans la bande de conduction*, pour une gamme de température précise, dans un semiconducteur dopé n.
- g. **La concentration de trous dans la bande de valence augmente par rapport à la concentration d'électrons dans la bande de conduction, pour une gamme de température précise, dans un semiconducteur dopé p.**
- h. La concentration de trous dans la bande de valence augmente *par rapport à la concentration d'électrons dans la bande de conduction*, pour une gamme de température précise, dans un semiconducteur extrinsèque.
- i. Il fait chaud, il faut aller boire un coup.

Réponse « c » : c'est vrai mais subtile ; donc point bonus !

2. Quand on « dope » un semiconducteur :

- a. On ajoute *directement* des électrons dans la bande de conduction (avec un « canon à électrons » par exemple) pendant la croissance.
- b. On ajoute *directement* des trous dans la bande de valence (avec un « canon à trous » par exemple) pendant la croissance.
- c. Pendant la croissance on ajoute des impuretés de la même colonne du tableau périodique que le semiconducteur afin d'effectuer un dopage N.
- d. **Pendant la croissance on ajoute des impuretés de la colonne supérieure du tableau périodique que le semiconducteur afin d'effectuer un dopage N.**
- e. Pendant la croissance on ajoute des impuretés de la colonne inférieure du tableau périodique que le semiconducteur afin d'effectuer un dopage N.

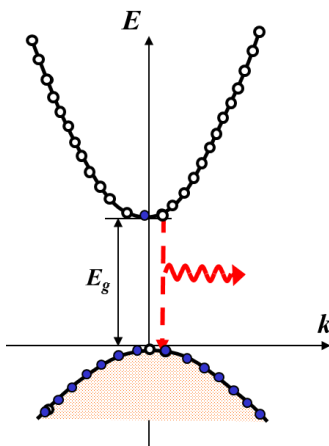
- f. **Ces impuretés remplacent les atomes du semiconducteur dans le cristal.**
- g. Ces impuretés se placent entre les atomes du semiconducteur dans le cristal, en dehors du réseau.
- h. Ces impuretés et les atomes du semiconducteur se trouvent « les uns sur les autres » dans le cristal.

## II. Réponses courtes

1. Vous voulez fabriquer un laser semiconducteur qui émet de la lumière rouge (620 nm), et il vous faut choisir quel matériau utiliser.
  - a. Expliquer comment la lumière peut être émise par un semiconducteur (faire un schéma).

Voir schéma ci-dessous. Recombinaison paire électron-trou, émission d'un photon.

- b. Expliciter quels caractéristiques le semiconducteur doit posséder afin d'être approprié pour votre application, et expliquer pourquoi ces caractéristiques sont nécessaires (n'hésitez pas à faire des schémas).



\*\*\*Il faut que

- 1)  $E_g = hc/\lambda$  où  $\lambda = 620$  nm donc  $E_g = 2$  eV. Sinon, le laser n'aura pas la longueur d'onde désirée.
- 2) Le SC doit avoir un gap *direct*, c-à-d le bas de la bande de conduction doit se retrouver au même vecteur k (vecteur d'onde) que le haut de la bande de valence. Sinon, pas de transition *radiative* possible qui conserve à la fois l'énergie ET la quantité de mouvement (~vecteur k).

(Il faut aussi que la durée de vie radiative soit plus courte que la durée de vie non-radiative, bonne remarque !)

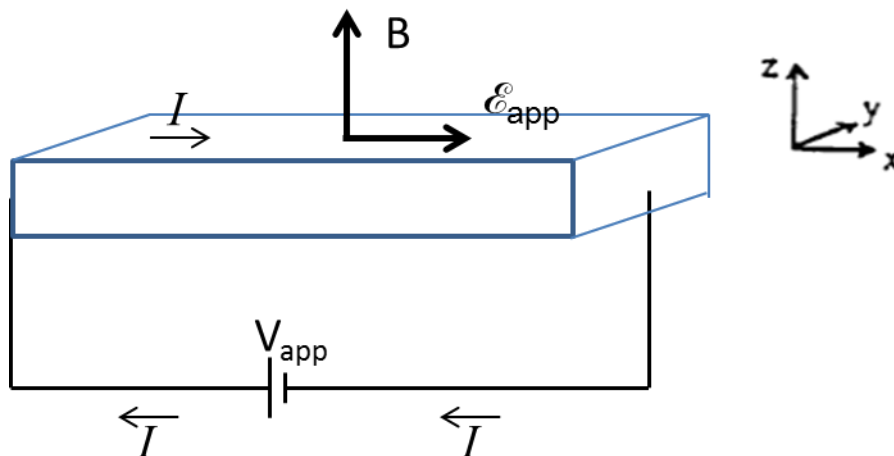
2. L'étude du graphène est très à la mode actuellement, en partie parce que sa relation de dispersion, c'est-à-dire la façon dont l'énergie des électrons varie en fonction du vecteur d'onde soit  $E(k)$ , est *linéaire* plutôt que *parabolique* comme c'est le cas pour d'autres matériaux, incluant les semiconducteurs. Peut-on utiliser pour le graphène la même approximation de masse effective que celle que l'on utilise pour les semiconducteurs ? Justifier votre réponse.

Pour un électron libre nous avons  $E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_0}$ , c'est à dire une relation parabolique. Comme le bas de la bande de conduction et le haut de la bande de valence peuvent être approximés par des paraboles, nous avons  $E = E_c + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e^*}$  (pour la bande de conduction) et  $E = E_v - \frac{\hbar^2 k^2}{2m_v^*}$  (pour la bande de valence). Autrement dit,  $\frac{1}{m_e^*} = \frac{1}{\hbar^2} \frac{d^2 E}{dk^2}$ . Par contre, pour le graphène, la relation est linéaire (dit l'énoncé), donc nous ne pouvons PAS utiliser la même expression. Si l'on applique quand même, on a  $\frac{1}{m_e^*} = 0$  ou une masse effective infinie, ce qui paraît étrange !

### III. Effet Hall

Vous avez deux échantillons semiconducteur de forme identique (barreau), que vous utilisez pendant votre stage, l'un dopé N et l'autre dopé P. Comme vous étiez distrait, vous avez mélangé les échantillons en les rangeant, et vous ne savez plus les distinguer. Il vous faut donc trouver comment les identifier (sans demander à votre maître de stage). Vous mettez donc en place une mesure de type « Effet Hall ».

1. Afin d'effectuer une mesure de type « Effet Hall », il faut appliquer un champ magnétique et un champ électrique. Faire un schéma (dessiner les axes x, y, z) montrant l'orientation de ces deux champs par rapport à votre échantillon. Un circuit fermé est-il nécessaire pour la réalisation d'une mesure du type « Effet Hall » ? Si oui, dessinez-le.



Oui ! Il faut un circuit fermé, par ex. entre les deux bouts du barreau.

On applique une tension  $V_{app}$  qui donne lieu à un champ électrique (tension) appliqué selon la longueur du dispositif (dans la direction +x) pour qu'un courant passe de gauche à droite dans le schéma ci-dessus.

Champ magnétique constant appliqué sur l'axe perpendiculaire (voir schéma)

2. Quelle est l'influence du champ électrique sur les porteurs de l'échantillon dopé N ? Quelle est l'influence du champ électrique sur les porteurs de l'échantillon dopé P ? Peut-on ainsi distinguer les deux échantillons ? Expliquer.

Dopé N : porteurs majoritaires = électrons (charges négatives). Le champ électrique « pousse » ces charges négatives dans la direction  $-x$ , c'est-à-dire vers la gauche dans le schéma ci-dessus.

Dopé P : porteurs majoritaires = trous (« charges » positives). Le champ électrique « pousse » ces « charges » positives dans la direction  $+x$ , c'est-à-dire vers la droite dans le schéma ci-dessus.

Même si la direction du mouvement des charges est différente, comme le signe des charges est aussi différent, le courant de dérive est dans la **même** direction. Ainsi nous ne pouvons PAS distinguer ces échantillons avec une simple mesure de courant.

3. Quelle est l'influence du champ magnétique sur les porteurs de l'échantillon dopé N (champ électrique toujours appliqué) ? Quelle est l'influence du champ magnétique sur les porteurs de l'échantillon dopé P (champ électrique toujours appliqué) ? Peut-on ainsi distinguer les deux échantillons ? Expliquer.

Force de Lorentz  $\vec{F}_{mag} = \pm q\vec{v} \times \vec{B}$  ; pour l'échantillon dopé N,  $v$  est dans la direction  $-x$  et  $q < 0$ . La force de Lorentz « pousse » les électrons dans la direction  $-y$ .

Pour l'échantillon dopé P,  $v$  est dans la direction  $+x$  et  $q > 0$ . A nouveau, la force de Lorentz « pousse » les trous dans la direction  $-y$ .

Cette fois-ci, les deux types de charges sont « poussés » dans le même sens. La tension de Hall qui apparaît dans la direction « courte » du barreau (selon axe  $y$ ) est donc de signe **différent** pour les deux échantillons. On peut ainsi les distinguer.

#### IV. Comparaison entre un dispositif pn et un dispositif p<sup>+</sup>p

##### 1. Dispositif pn à l'équilibre thermodynamique

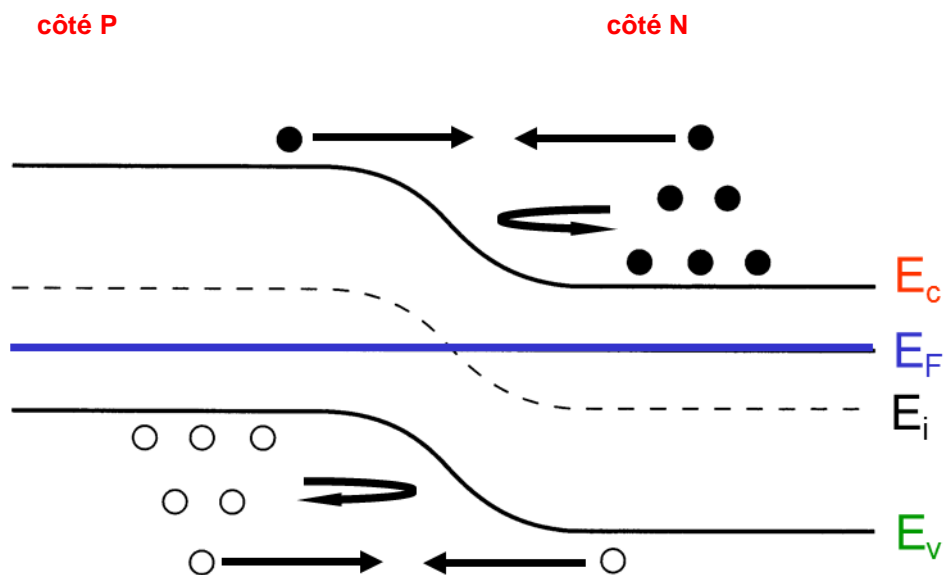
On considère une jonction PN à base de Si avec comme dopage en accepteurs  $N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  et en donneurs  $N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ .

- a) Expliquer qualitativement l'établissement de la barrière de potentiel dans une jonction PN à l'équilibre thermodynamique.

- Dû au gradient de concentration, les porteurs diffusent à l'autre côté de la jonction

- Ces porteurs ensuite rencontrent les porteurs majoritaires et se recombinent
- Il y a donc moins de porteurs majoritaires que d'impuretés ionisées près de la jonction—une zone chargée se crée (la zone de charge d'espace, ZCE)
- La ZCE est chargée négativement côté p et positivement côté n—un champ électrique dans la direction n vers p se crée !

b) Tracer le diagramme de bandes en énergie (tracer et étiqueter les bandes de conduction et de valence, ainsi que le niveau de Fermi le long de la jonction). Définir clairement le côté P et le côté N. Prendre en compte les différences de densité de dopage dans votre schéma.



$E_C$  : énergie en bas de la bande de conduction

$E_F$  : énergie de Fermi

$E_V$  : énergie en haut de la bande de valence

**Le schéma ci-dessus est pour une jonction pn où le dopage  $N_A=N_D$ . Dans notre cas,  $N_A>N_D$ , la ZCE doit être dessinée plus large côté n car dopage plus faible.**

c) Etablir l'expression donnant le potentiel de diffusion  $V_D$ . Application numérique.

$$n_n = N_c e^{(E_F - E_{Cn})/kT} \quad p_p = N_v e^{(E_{Vn} - E_F)/kT}$$

$$n_p = N_c e^{(E_F - E_{Cp})/kT}$$

$$p_p = N_v e^{(E_{Vp} - E_F)/k_B T}$$

$$V_D = \frac{1}{e} (E_{Vp} - E_{Vn}) = \frac{k_B T}{e} \ln \frac{p_p}{p_n}$$

$$= \frac{1}{e} (E_{Cp} - E_{Cn}) = \frac{k_B T}{e} \ln \frac{n_n}{n_p} \quad \text{avec } n_n = N_D \text{ et } n_p = n_i^2 / N_A$$

$$V_D = \frac{k_B T}{e} \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2}$$

0,72 V A.N.

- d) Existe-il une zone de déplétion/charge d'espace dans ce dispositif ? Justifiez votre réponse.  
 Oui ! Les charges qui se diffusent de l'autre côté de la jonction métallurgique rencontrent des charges majoritaires et elles se recombinent, laissant derrière des charges fixes (impuretés ionisées). Dans cette région il y a un champ électrique fort et elle est « déplétée » de charges mobiles.
- e) A l'équilibre thermodynamique existe-il dans ce dispositif,
- i) Un courant total (électrons et trous) non-nul ? Non, nous sommes à l'équilibre thermodynamique, pas de courant total.
  - ii) Un courant total d'électrons non-nul ? Non, nous sommes à l'équilibre thermodynamique, pas de courant total d'électrons. Les courants de trous et d'électrons sont indépendants et ne peuvent pas « s'annuler »
  - iii) Un courant total de trous non-nul ? Non, nous sommes à l'équilibre thermodynamique, pas de courant total de trous. Les courants de trous et d'électrons sont indépendants et ne peuvent pas « s'annuler »
  - iv) Un courant de diffusion et/ou de dérive d'électrons non-nul ? Oui ! Le courant de diffusion des électrons (dû au gradient de concentration d'électrons à la jonction métallique) est contre-balancé par le courant de dérive d'électrons (dans le sens opposé) qui existe dû au champ électrique. Le courant total d'électrons est—rappelons-le— toujours zéro à l'équilibre thermodynamique.
  - v) Un courant de diffusion et/ou de dérive de trous non-nul ? Oui ! Le courant de diffusion des trous (dû au gradient de concentration de trous à la jonction métallique) est contre-balancé par le courant de dérive de trous (dans le sens opposé) qui existe dû au champ électrique. Le courant total de trous est—rappelons-le— toujours zéro à l'équilibre thermodynamique.
- Justifiez vos réponses.

On considère une jonction  $p^+p$  (dite « unipolaire ») à base de Si avec comme dopage en accepteurs côté  $p^+$   $N_A(p^+) = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  et côté  $p$   $N_A(p) = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ .

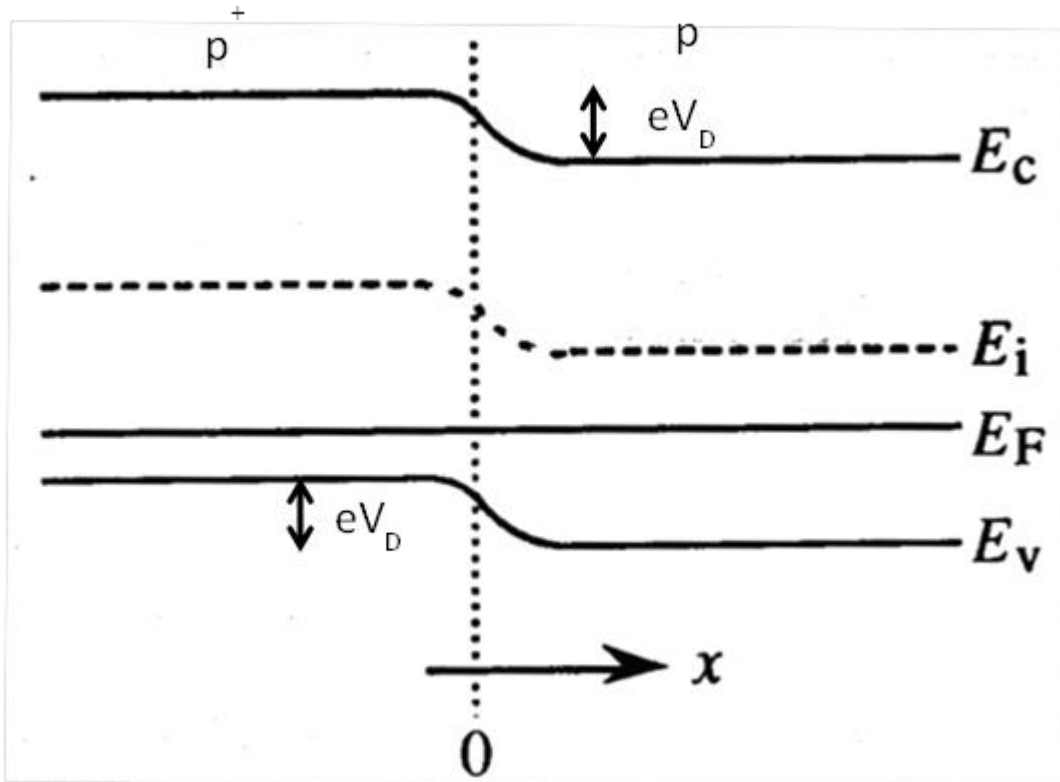
*Note : on peut raisonner de la même façon que pour la jonction pn, en gardant en tête quand même que dans ce cas les porteurs majoritaires sont du même type de chaque côté de la jonction métallurgique.*

a) Expliquer qualitativement l'établissement de la barrière de potentiel dans une jonction  $p^+p$  à l'équilibre thermodynamique. Notez ce qui est similaire et ce qui est différent par rapport à une jonction pn.

- Dû au gradient de concentration, les porteurs diffusent du côté  $p^+$  au côté  $p$  (càd, la diffusion est dans une seule direction cette-fois, contrairement au cas PN).
- On a le même type porteurs majoritaires de chaque côté de la jonction métallurgique, **PAS** de recombinaison
- Comme il n'y a pas de recombinaison, il n'y a pas de création d'une zone de charge d'espace
- Cependant, il y a un déplacement de charge d'un côté à l'autre, ce qui va engendre une charge positive côté  $p$  et une charge négative côté  $p^+$ , ce qui va donner lieu à un champ électrique/ barrière de potentiel

b) Tracer le diagramme de bandes en énergie (tracer et étiqueter les bandes de conduction et de valence, le niveau de Fermi et le niveau intrinsèque le long de la jonction). Définir clairement le côté  $P^+$  et le côté  $P$ .





- c) Etablir l'expression donnant le potentiel de diffusion  $V_D$ . Application numérique.

$$p_p = N_v e^{(E_{vp} - E_F)/k_B T} \quad p_{p+} = N_v e^{(E_{vp+} - E_F)/k_B T}$$

$$V_D = \frac{1}{e} (E_{vp+} - E_{vp}) = \frac{k_B T}{e} \ln \frac{p_{p+}}{p_p}$$

A.N.  $V_D = 0,24 \text{ V}$

- d) Existe-il une zone de déplétion/charge d'espace dans ce dispositif ? Justifiez votre réponse.  
**Non ! Pas de recombinaison donc pas de zone sans charge mobile (càd ZCE).**
- e) A l'équilibre thermodynamique existe-il dans ce dispositif,
- Un courant total (électrons et trous) non-nul ? **Même raisonnement que pour la jonction PN.**
  - Un courant total d'électrons non-nul ? **Même raisonnement que pour la jonction PN (d'ailleurs il y a très peu d'électrons car dopé P)**
  - Un courant total de trous non-nul ? **Même raisonnement que pour la jonction PN.**
  - Un courant de diffusion et/ou de dérive d'électrons non-nul ? **Non ! ou au moins très peu, car les deux côtés sont dopés P (et donc il y a très peu d'électrons). Sinon, même raisonnement que pour la jonction PN.**
  - Un courant de diffusion et/ou de dérive de trous non-nul ? **Même raisonnement que pour la jonction PN.**

Justifiez vos réponses.

- f) (Bonus) : Pourquoi utilisons-nous des jonctions pn plutôt que des jonctions  $p^+p$  ? L'effet « jonction » est plus important pour une jonction pn par rapport à une jonction  $p^+p$ , par ex.  $V_D$  pour la jonction PN est plus important même si les concentrations de dopants sont moindres.

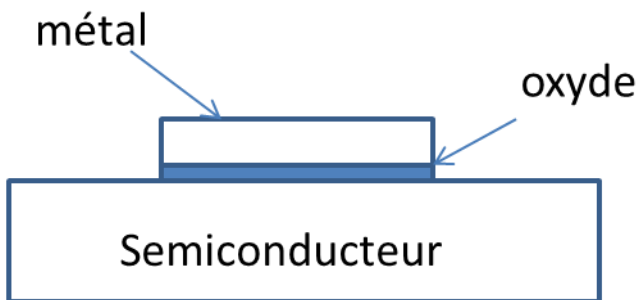
## VI. Capacité MOS

Dans cet exercice, on considère une structure de type MOS. La figure 1 ci-après représente une mesure de la capacité formée par cette structure en fonction de la tension de polarisation  $V_G$  appliquée entre l'électrode de grille et celle de substrat de Si. On notera S l'aire de la surface du métal.

$$S = 3,84 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$$

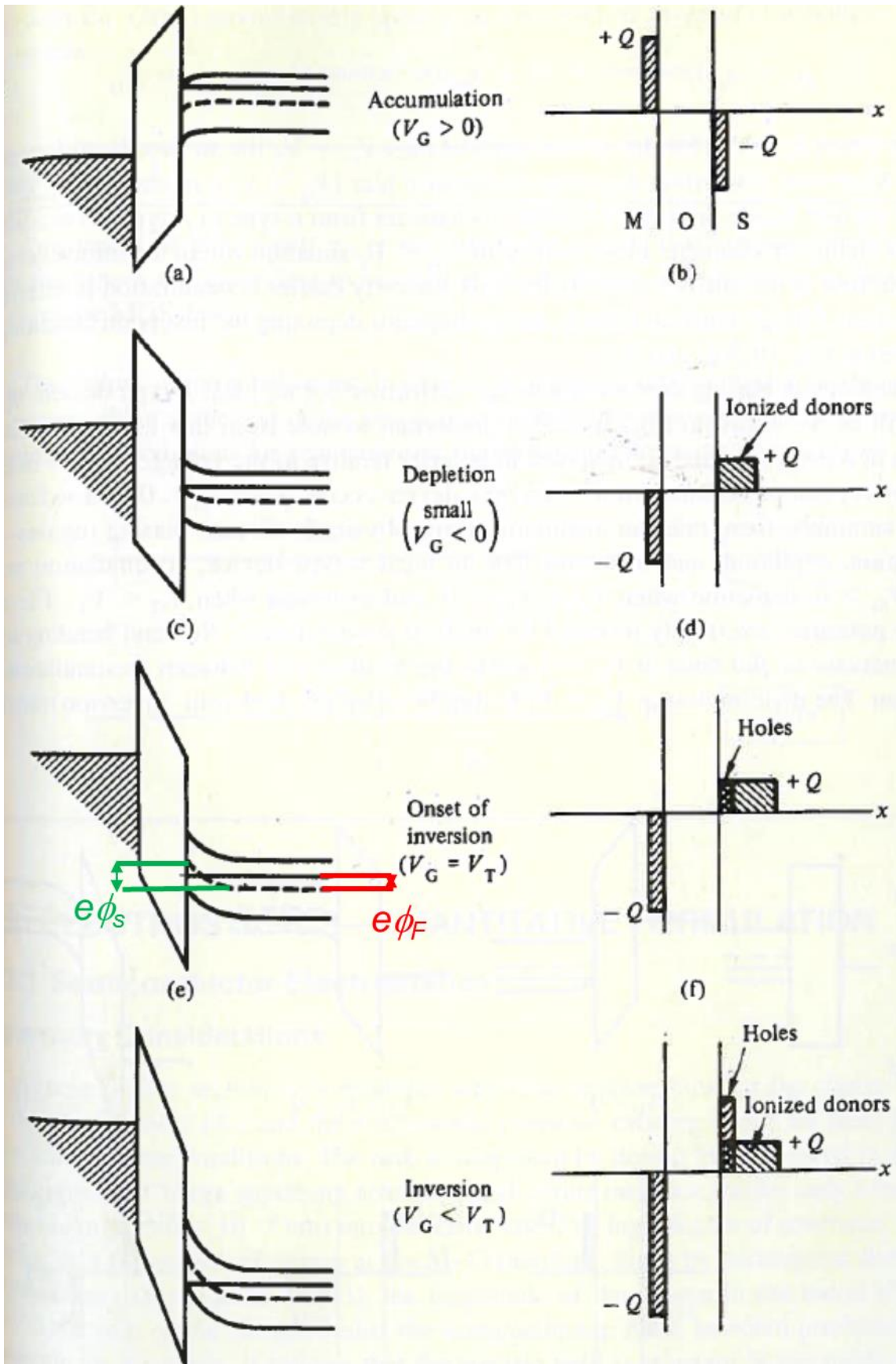
1. Expliciter l'acronyme MOS. Faire un schéma montrant clairement les trois parties du dispositif.

Métal, Oxyde, Semiconducteur.



2. Nommer, faire un diagramme de bande et un diagramme de charge pour les différents régimes de polarisation d'une structure MOS dans le cas d'un des deux types de dopage (dans le cas idéal, tension de bandes plates  $V_{FB} = 0$  V et oxyde non chargé). En déduire le type de dopage de Si pour la structure étudiée. On notera  $N_{dop}$  la concentration de dopants dans le semiconducteur. Noter approximativement les gammes de tension pour chaque régime.

Dopé N car accumulation pour  $V_G > 0$ .



3. A partir de la figure 1, calculer l'épaisseur  $e_{ox}$  de la couche d'oxyde.

On a  $C_{ox} = 2,1 \times 10^{-4} \mu\text{F}$  d'après la figure 1. Or  $C_{ox} = S\epsilon_{ox}/e_{ox}$  et donc  $e_{ox} = 59 \text{ nm}$ .

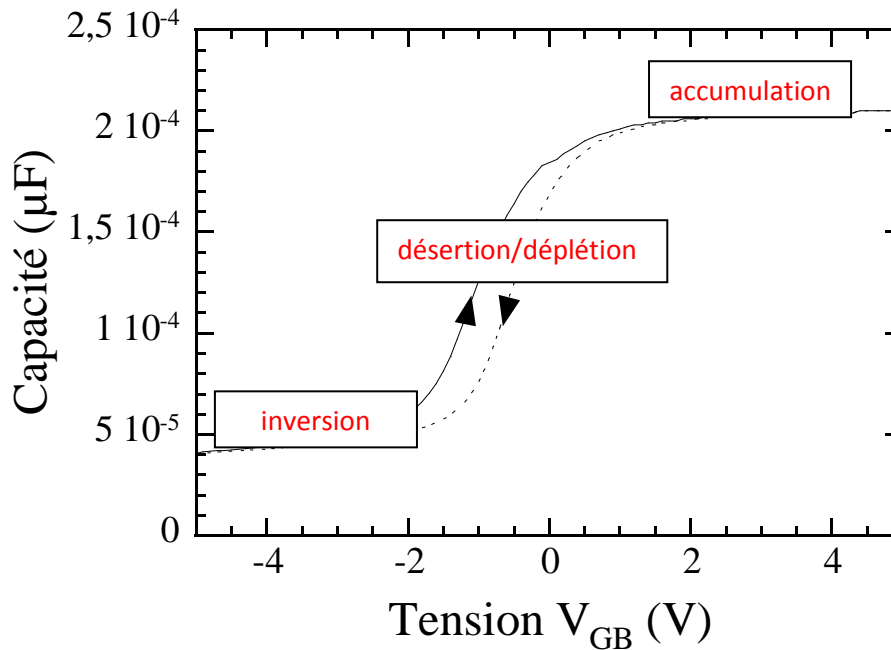


Figure 1 : Capacité d'une structure MOS en fonction de la tension de polarisation

4. Expliquer qualitativement comment est effectuée une mesure de  $C(V)$ .
  - a. On applique une tension de grille DC.
  - b. On ajoute une tension de grille alternative AC de faible amplitude.
  - c. On mesure le courant alternatif.
  - d. On change la tension de grille DC et on recommence.

5. S'agit-il d'une mesure réalisée à haute fréquence ou à basse fréquence ? Expliquer.

Haute fréquence car et en inversion (haute fréquence)  $\frac{1}{C_{INV}^{HF}} = \frac{1}{C_I} + \frac{1}{C_{ZCE}}$  et en inversion

(basse fréquence)  $C_{INV}^{BF} C_{ACC} = C_I = \epsilon_i / e_i$ . La raison pour ceci est la suivante. Les charges minoritaires dans la ZCE sont créées thermiquement, ce qui est un processus « lent ». Donc à haute fréquence, il n'y a pas assez de temps pour la création de ces charges minoritaires, donc en réponse de la charge  $\Delta Q_M$  sur la grille, la ZCE s'élargit. Du schéma, nous voyons donc que nous avons en série la capacité de l'oxyde plus la capacité de la ZCE. Par contre à basse fréquence, il y a assez de temps pour la génération des

charges minoritaires, la  $\Delta Q_{sc}$  se trouve à l'interface oxyde/SC (voir schéma). La capacité est donc juste celle de l'oxyde

## VII. Tension de seuil

Cet exercice est indépendant de l'exercice précédent.

Capacité MOS dopée n,  $N_D=10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , cas idéal (travaux de sortie égaux, pas de charge dans l'oxyde). Epaisseur de l'oxyde :  $e_i=100 \text{ nm}$ .

Prendre  $x=0$  à l'interface isolant/semiconducteur.

$k_B T = 25 \text{ meV}$     $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$     $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$     $\epsilon_{sc} = 10^{-10} \text{ F.m}^{-1}$     $\epsilon_i = 3,2 \times 10^{-13} \text{ F.cm}^{-1}$

### 1. Tension au seuil d'inversion, début :

a. Physiquement, quelle est la définition du seuil d'inversion ?

A la tension de seuil,  $V_T$ , la densité des porteurs minoritaires en surface est égale à la densité des porteurs majoritaires à l'équilibre en profondeur ! Autrement dit

$$p_s = n_B$$

b. Définir le potentiel de surface  $\phi_s$  ainsi que le « potentiel de Fermi »  $\phi_F$ , en fonction de  $E_i$  et  $E_F$ . À quoi le « potentiel de Fermi » est-il lié ? Si vous avez tracé des schémas dans l'exercice précédent, montrer  $\phi_s$  et  $\phi_F$  sur un schéma.

$$\phi_s = \frac{1}{e}(E_{i\_B} - E_{i\_S})$$

$$\phi_F \equiv \frac{1}{e}(E_{i\_B} - E_F)$$

**\*\*Le potentiel de Fermi est lié au dopage. Plus le dopage est important, plus le potentiel de Fermi est important.**

c. Montrer que  $\phi_s = 2\phi_F$ . Par la suite, on notera  $\phi_s$  (seuil) =  $\phi_T$ .

**Au seuil,  $E_{i\_B} - E_F = E_F - E_{i\_S}$ , ce qui amène à  $\phi_s = 2\phi_F$  avec les expression ci-dessus.**

d. Trouver une expression de  $\phi_F$  en fonction de la densité de dopants. Effectuer l'application numérique. Que représente le signe de  $\phi_F$  ?

$$n_B = n_i e^{(E_F - E_{i\_B})/kT} = N_D \text{ (dopage n)}$$

$$\phi_F = -\frac{k_B T}{e} \ln \frac{N_D}{n_i} \text{ dopage n A.N. -0,4 V Signe } < 0 \text{ car dopé n}$$

e. Trouver une expression de  $\phi_T$  en fonction de la densité de dopants. Effectuer l'application numérique.

$$\phi_T = -\frac{2k_B T}{q} \ln \frac{N_D}{n_i} = -0.8 \text{ V}$$

2. **Largeur de la zone de charge d'espace.**

- a. En régime de désertion/déplétion, utiliser l'équation de Poisson et des conditions aux limites adaptées afin de déterminer le champ électrique dans le semiconducteur en fonction de  $x$  et  $x_D$  dans la zone de charge d'espace (ZCE), où  $x_D$  est la largeur de la ZCE.

- **condition aux limites**  $\mathcal{E}_{SC}(x = x_D) = 0$ .

- $$\frac{d\mathcal{E}_{SC}}{dx} = \frac{\rho}{\varepsilon_{SC}} = \frac{q}{\varepsilon_{SC}} N_D, \quad 0 \leq x \leq x_D$$

$$\mathcal{E}_{SC}(x) = \frac{q}{\varepsilon_{SC}} N_D (x - x_D), \quad 0 \leq x \leq x_D$$

- b. En utilisant la relation entre le champ électrique et le potentiel, trouver une expression pour le potentiel en fonction de  $x$  et  $x_D$  dans la ZCE. Prendre  $\phi(x = x_D) = 0$ .

$$\phi = -\int^x \mathcal{E} dx$$

$$\phi(x) = -\frac{q}{2\varepsilon_{SC}} N_D (x - x_D)^2, \quad 0 \leq x \leq x_D$$

- c. Trouver  $\phi_s$  en évaluant  $\phi(x=0)$ , et exprimer  $x_D$  en fonction de  $\phi_s$ . Au seuil d'inversion  $\phi_s \equiv \phi_T$  et  $x_D \equiv x_T$ . Effectuer l'application numérique afin de trouver la largeur de la ZCE au seuil d'inversion.

$$\phi_s = \phi(x=0) = -\frac{q}{2\varepsilon_{SC}} N_D x_D^2 \quad x_D = \sqrt{-\frac{2\varepsilon_{SC}}{qN_D} \phi_s} \quad x_T = 0,1 \mu\text{m}$$

3. **Tension au seuil d'inversion, fin :**

- a. La tension au seuil d'inversion est égale à  $V_T = V_I + \phi_T$  où  $V_I$  est la différence de potentiel dans l'isolant. Trouver une expression de  $V_I$  (sachant qu'il s'agit d'une *capacité* MOS). Effectuer l'application numérique. Comment cette valeur évoluerait-elle si on augmente l'épaisseur de l'oxyde ? En déduire pourquoi les capacités MOS sont fabriquées avec de faibles épaisseurs d'oxyde ( $\leq 100$  nm).

$$V_I = Q_M / C_I = qN_D x_T / C_I$$

- $C_I = \varepsilon_i / e_i$  où  $\varepsilon_i$  est la permittivité de l'isolant ( $\varepsilon_i / \varepsilon_o$  est la constante diélectrique) ; et  $e_i$  est l'épaisseur
- $V_I = 5$  V

Plus l'oxyde est épais, plus la tension de seuil est élevée (valeur absolue). Pour cette raison on utilise des faibles épaisseurs.

- b. Trouver une valeur numérique pour la tension au seuil d'inversion.

$$V_T = -5.8 \text{ V} \quad \text{Attention au signe}$$