

L3 Physique et Applications

Examen de Physique des Composants—1^{ère} 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 ⁻³	$N_C = 2,8 \times 10^{19}$ cm ⁻³	$n_i = 10^{10}$ cm ⁻³	$E_g = 1,12$ eV
$\mu_n = 1345$ cm ² /Vs	$\mu_p = 458$ cm ² /Vs	$e = 1,6 \times 10^{-19}$ C	$k_B = 1,38 \times 10^{-23}$ J.K ⁻¹	$= 8,62 \times 10^{-5}$ eV.K ⁻¹
$\epsilon_{SC} = 10^{-10}$ F.m ⁻¹	$\epsilon_{OX} = 3,2 \times 10^{-13}$ F.cm ⁻¹			

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.

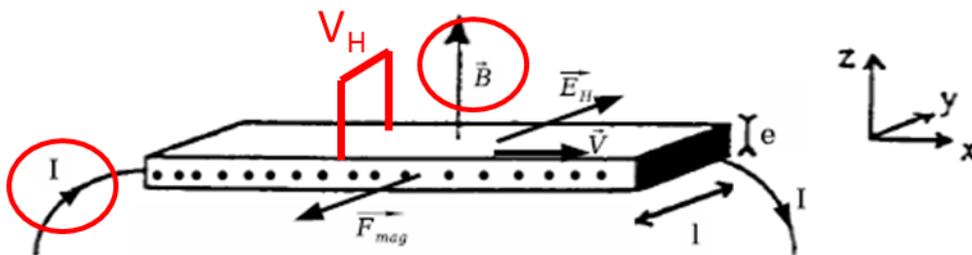
1. Le silicium est le semiconducteur le plus utilisé car :
 - a. Il a un gap (une bande interdite) directe.
 - b. C'est le seul semiconducteur qui peut être dopé n ou p.
 - c. Son oxyde natif (SiO₂) est de bonne qualité.**
 - d. C'est le seul semiconducteur où la concentration des porteurs majoritaires reste constante dans le régime extrinsèque de température.
 - e. C'est le semiconducteur le plus abondant.**
 - f. C'est le seul semiconducteur qui a une structure cristalline.
 - g. L'industrie internationale semiconductrice veut projeter une image positive (Si=oui).
2. Un semiconducteur dopé (à T=300K, sauf dans le cas a.):
 - a. Est isolant à T=0K.**
 - b. Est chargé négativement ou positivement, selon le type de dopage.
 - c. Doit être très pur.
 - d. Est créé en ajoutant des ions pendant la croissance du matériau.
 - e. Peut avoir très peu d'électrons dans la bande de conduction mais quand même avoir une résistivité faible.**
 - f. N'a pas d'états isolés existant dans le gap (la bande interdite).
 - g. Est peu utilisé pour les dispositifs.
 - h. Est interdit d'utilisation pour les dispositifs de caractère sportif (Tour de France, Jeux Olympiques...)
3. La *masse effective* d'un électron dans un cristal semiconducteur :
 - a. Est la masse qu'on mesurerait effectivement si l'on pouvait mettre un électron sur une balance.
 - b. Est lié à la courbure de la bande de conduction à son minimum sur un graphique E(k) (énergie de l'électron en fonction de son vecteur d'onde).**
 - c. Est toujours plus grande que la masse d'un électron libre.
 - d. Est toujours plus petite que la masse d'un électron libre.
 - e. Est toujours la même que la masse d'un électron libre.
 - f. Est la masse qui prend en compte les forces du cristal exercées sur l'électron.**
 - g. Est la masse à utiliser dans l'équation $\vec{F}_{intérieure} = m\vec{a}$ (càd, les forces existantes dues au cristal).
 - h. Est la masse à utiliser dans l'équation $\vec{F}_{extérieure} = m\vec{a}$ (càd les forces d'origine extérieure du cristal).**
 - i. Est la masse à utiliser dans l'équation $\vec{F}_{total} = m\vec{a}$ (forces extérieures et intérieures).

II. Effet Hall

Nous sommes en 2034, il y a tant de satellites en orbite qu'ils se cognent et se cassent, les systèmes GPS ne fonctionnent plus. Le service commercial de l'entreprise que vous avez créée (vous êtes fabricant de vélo, le vélo étant devenu le mode de transport individuel principal à cause de l'interdiction absolue des engins motorisés dans la région parisienne une fois « le brouillard éternel » de pollution installé) vous demande de proposer une solution pour mesurer les distances parcourues à vélo pour vos clients. Vous vous souvenez vaguement de votre cours de physique des semiconducteurs d'il y a 20 ans où on avait parlé de l'effet Hall et vous vous mettez au travail.

1. Comment réaliser une sonde à effet Hall ? Faire un schéma montrant la géométrie nécessaire pour mesurer une tension de Hall. Ne pas oublier de noter en quelle matière sera réalisé votre dispositif, les orientations d'éventuels champs appliqués, etc.

- Sonde réalisée (par ex) en Si dopé (barreau rectangulaire de section $w \times h$)
- [Champ électrique (tension) appliqué selon la longueur du dispositif pour qu'un courant passe.]—Pas tout à fait nécessaire car le dispositif est en mouvement par rapport au champ magnétique !
- Champ magnétique constant appliqué sur l'axe perpendiculaire (voir schéma)



2. Choisir un seul type de porteurs dans votre dispositif. Quelles forces s'exercent sur ces porteurs de charges dans la géométrie que vous avez choisie ? En déduire une expression de la tension de Hall. Expliciter clairement **chaque** symbole que vous utilisez.

Force de Lorentz $\vec{F}_{mag} = \pm q \vec{v} \times \vec{B}$, où $q = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$, \vec{v} est la vitesse d'un porteur de charge, et B est le champ magnétique appliqué.

Si les sens de \vec{B} et de I sont en pratique ceux indiqués sur la figure ci-dessus, la force de Lorentz a tendance à déplacer les porteurs vers la face avant du barreau rectangulaire. Ceci va générer une *tension de Hall* et donc un champ électrostatique.

Force électrostatique : $F_{elec} = \pm q \vec{E}_H$; \vec{E}_H champ de Hall

A l'équilibre nous avons donc : $\pm q \vec{E}_H \pm q \vec{v} \times \vec{B} = \vec{0}$

$\mathcal{E}_H = v_x B_z$ (en notant v_k la coordonnée du vecteur \vec{v} sur l'axe k). Si on suppose une densité de courant J_x constante sur tout le barreau, alors on a $J_x = \pm q N_{dop} v_x$, où N_{dop} est la densité *volumique* de porteurs, ou encore $I = \pm q w h N_{dop} v_x$. (pour un barreau rectangulaire de section $w \times h$).

$$\mathcal{E}_{Hy} = \pm \frac{J_x B_z}{q N_{dop}} = \pm \frac{I B_z}{q N_{dop} w h}$$

$$V_H = \pm \frac{I B_z}{q N_{dop} h}$$

3. Expliquer brièvement comment vous fabriqueriez un compte-tours vélo à partir de l'effet Hall.
 - On met un aimant sur la roue, le capteur sur la fourche.
 - Chaque fois que l'aimant passe la sonde, une tension de Hall est mesurée, et ainsi les tours sont comptés.

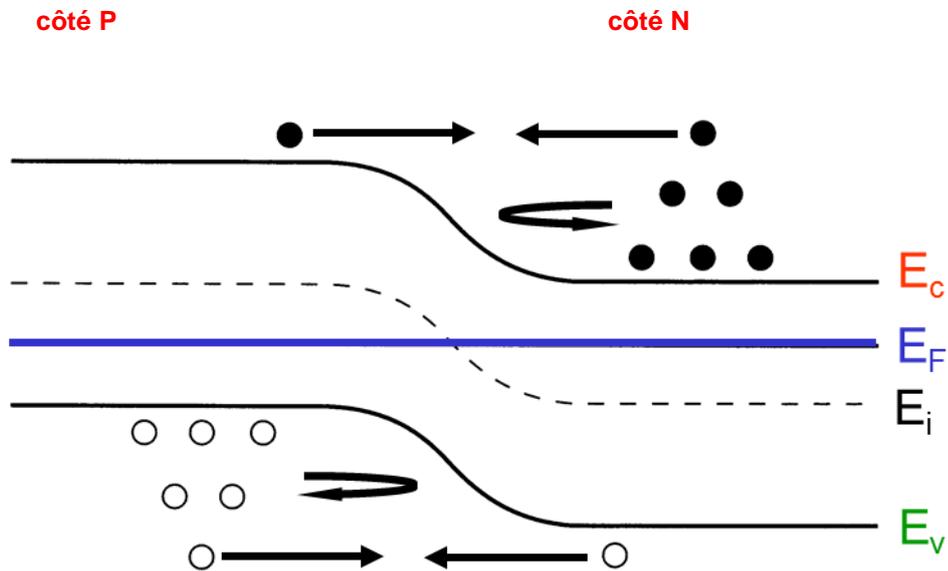
III. Etude d'une diode pn

1. Diode à l'équilibre thermodynamique

On considère une diode à jonction PN à base de Si avec comme dopage en accepteurs $N_A = 10^{17}$ cm^{-3} et en donneurs $N_D = 10^{15}$ cm^{-3} . On fera l'hypothèse de complète déplétion

Définitions : on définit x_n l'extension de la zone de charge d'espace côté N, et $-x_p$ la même chose côté P. La jonction métallurgique se trouve à $x=0$.

- a) Expliquer qualitativement l'établissement de la barrière de potentiel dans une jonction PN à l'équilibre thermodynamique.
 - En raison du gradient de concentration, les porteurs diffusent vers l'autre côté de la jonction
 - Ces porteurs rencontrent ensuite 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, le niveau de Fermi et le niveau intrinsèque le long de la jonction). Définir clairement le côté P et le côté N. Prendre en compte les différences 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 représente 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 le dopage est plus faible.

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

$$n_n = N_c e^{(E_F - E_{Cn})/kT}$$

$$p_n = N_v e^{(E_{Vn} - E_F)/kT}$$

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

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

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

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

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

0,72 V A.N.

- d) Établir les expressions du champ électrostatique dans les différentes régions côté P et côté N. Tracer l'allure du champ électrostatique dans la diode. Où la valeur absolue du champ est-il maximum et quelle est son expression $|\mathcal{E}_{\max}|$?

$$\frac{d\mathcal{E}}{dx} = \frac{e}{\epsilon_{SC}} N_D, \quad 0 < x < x_n$$

$$\frac{d\mathcal{E}}{dx} = -\frac{e}{\epsilon_{SC}} N_A, \quad -x_p < x < 0$$

$$\frac{d\mathcal{E}}{dx} = 0, \quad x > x_n, \quad x < -x_p$$

$\mathcal{E}=0$ loin de la jonction, donc \mathcal{E} doit être égal à zéro partout hors de la ZCE.

- Conditions aux limites (pas de charge surfacique) donc : $\mathcal{E}(x_n)=0$; $\mathcal{E}(-x_p)=0$;

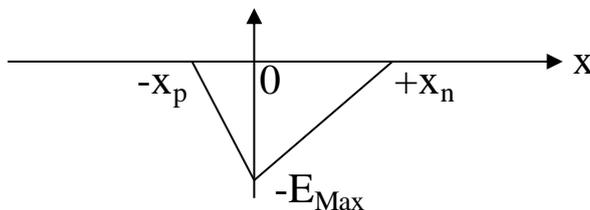
$$\mathcal{E} = \frac{e}{\epsilon_{SC}} N_D (x - x_n), \quad 0 < x < x_n$$

- $\mathcal{E} = -\frac{e}{\epsilon_{SC}} N_A (x + x_p), \quad -x_p < x < 0$

$$\mathcal{E} = 0, \quad x > x_n, \quad x < -x_p$$

- La valeur absolue du champ est maximale en $x=0$.

$$|\mathcal{E}_{\max}| = \frac{e}{\epsilon_{SC}} N_D x_n = \frac{e}{\epsilon_{SC}} N_A x_p$$



- e) Établir l'expression de V_D en fonction de $|\mathcal{E}_{\max}|$ et de l'épaisseur de la zone de charge d'espace W .

$$V_D = -\frac{1}{2} \mathcal{E}_{\max} W$$

- f) Établir l'expression donnant l'épaisseur de la zone de charge d'espace W et celles donnant ses extensions x_p et x_n dans les régions P et N. Application numérique pour les trois grandeurs et commenter.

A partir de

$$x_p N_A = x_n N_D$$

$$|\mathcal{E}_{\max}| = \frac{e}{\epsilon_{SC}} N_D x_n = \frac{e}{\epsilon_{SC}} N_A x_p$$

$$W = x_n + x_p$$

$$V_D = -\frac{1}{2} \mathcal{E}_{\max} W$$

Nous avons $W = \left[\frac{2\epsilon_{SC} V_D}{e} \left(\frac{N_D + N_A}{N_D N_A} \right) \right]^{1/2}$; $x_p = \frac{N_D W}{N_A + N_D}$; $x_n = \frac{N_A W}{N_A + N_D}$

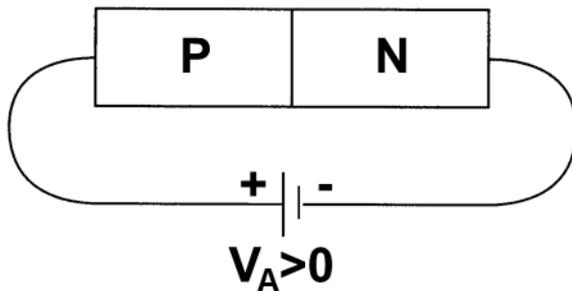
$W \sim 0,95 \mu\text{m}$; $x_n \sim 0,94 \mu\text{m}$; $x_p \sim 9,4 \text{nm}$

Commentaire: $x_n \gg x_p$ comme attendu car $N_D \ll N_A$

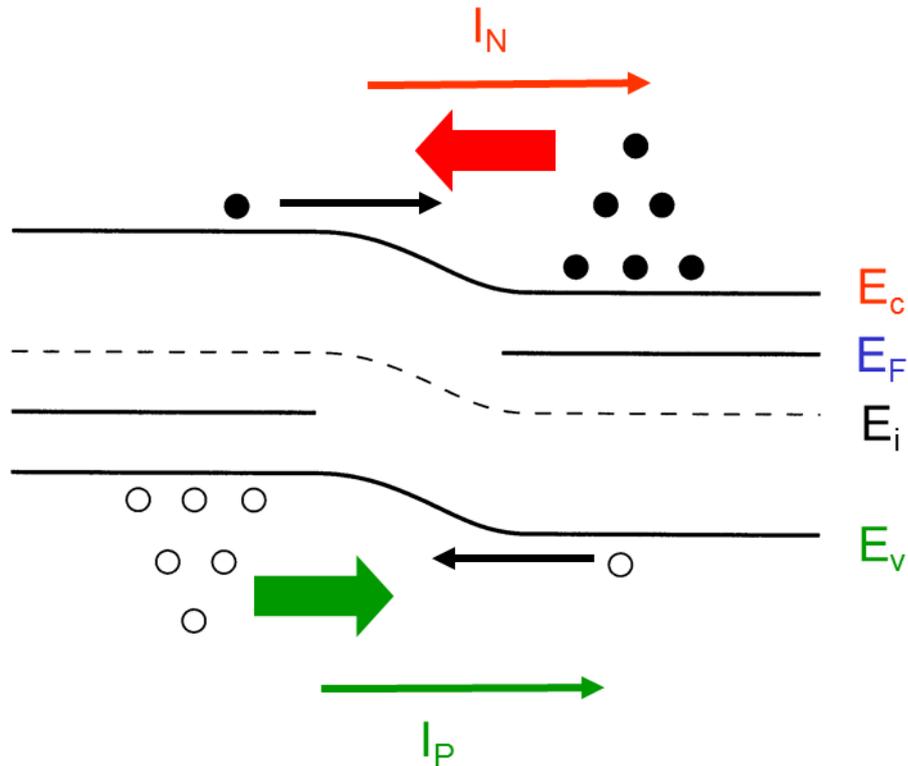
2 - Diode polarisée en direct

On polarise la diode en direct sous une tension $V_A = 0,36 \text{ V}$ positive.

- a) Schématiser comment la diode est polarisée par une source de tension en directe (càd dans quel sens sont les terminaux de la batterie par rapport à la jonction PN).



- b) Tracer le diagramme de bandes en énergie (tracer et étiqueter les bandes de conduction et de valence, etc) et inclure quelques porteurs (électrons et trous) dans les bandes.



- c) Lister les différences dans ce diagramme de bandes par rapport à celui de la diode non-polarisée.

Différences : Barrière de potentiel plus petite, largeur de la ZCE plus petite ... E_F n'est plus horizontale

- d) Le courant passe-t-il ? Si oui, quelle est sa nature principale (courant de dérive, diffusion, électrons, de trous...) ? Expliquer.

Oui, il existe un courant *total*, nous ne sommes plus à l'équilibre. La tension appliquée fait baisser la barrière de diffusion. L'origine du courant est donc *la diffusion* des porteurs majoritaires. Il existe aussi un petit courant de *dérive* dû aux porteurs minoritaires

- e) A partir de III.1 e) et f) ci-dessus, trouver des expressions de W_{direct} , x_n^{direct} et x_p^{direct} .

$$W_{direct} = \left[\frac{2\epsilon_{SC}(V_D - V_A)}{e} \left(\frac{N_D + N_A}{N_D N_A} \right) \right]^{1/2} ; \quad x_p^{direct} = \frac{N_D W_{direct}}{N_A + N_D} ; \quad x_n^{direct} = \frac{N_A W_{direct}}{N_A + N_D}$$

- f) Application numérique pour les trois grandeurs et commenter.

$W_{direct} \sim 0,67 \mu m$; $x_n \sim 0,66 \mu m$; $x_p \sim 6,6 nm$

Commentaire: les trois grandeurs sont plus petites comme attendu dans le cas d'une polarisation directe.

g) Que vaut W_{direct} pour $V_A=1$ V ? A.N.

$V_A > V_D$ donc $W=0$!!!!

IV. Capacité métal-oxyde-semiconducteur

Dans cet exercice, on considère une structure de type MOS (Métal–Oxyde–Semiconducteur). La courbe 1 ci-dessous 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 silicium. On notera S l'aire de la surface du métal ($S = 3,84 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$).

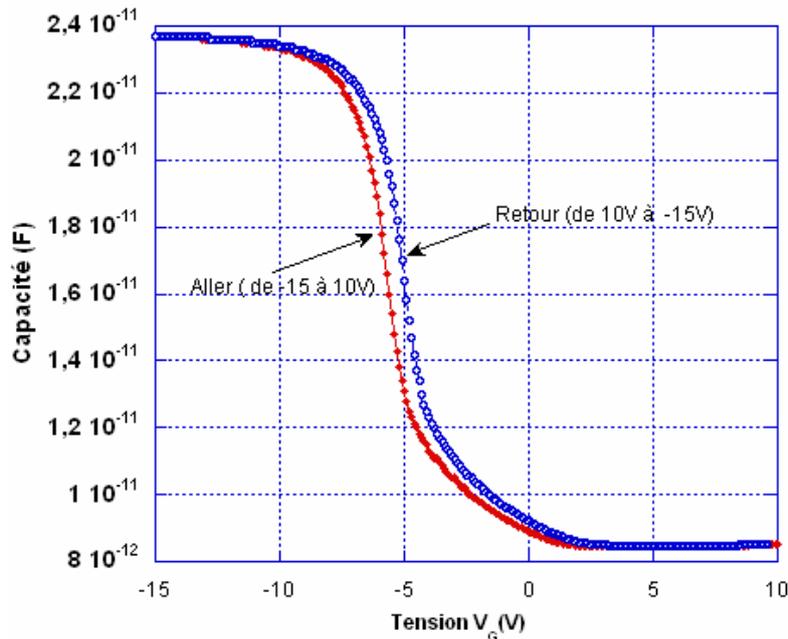
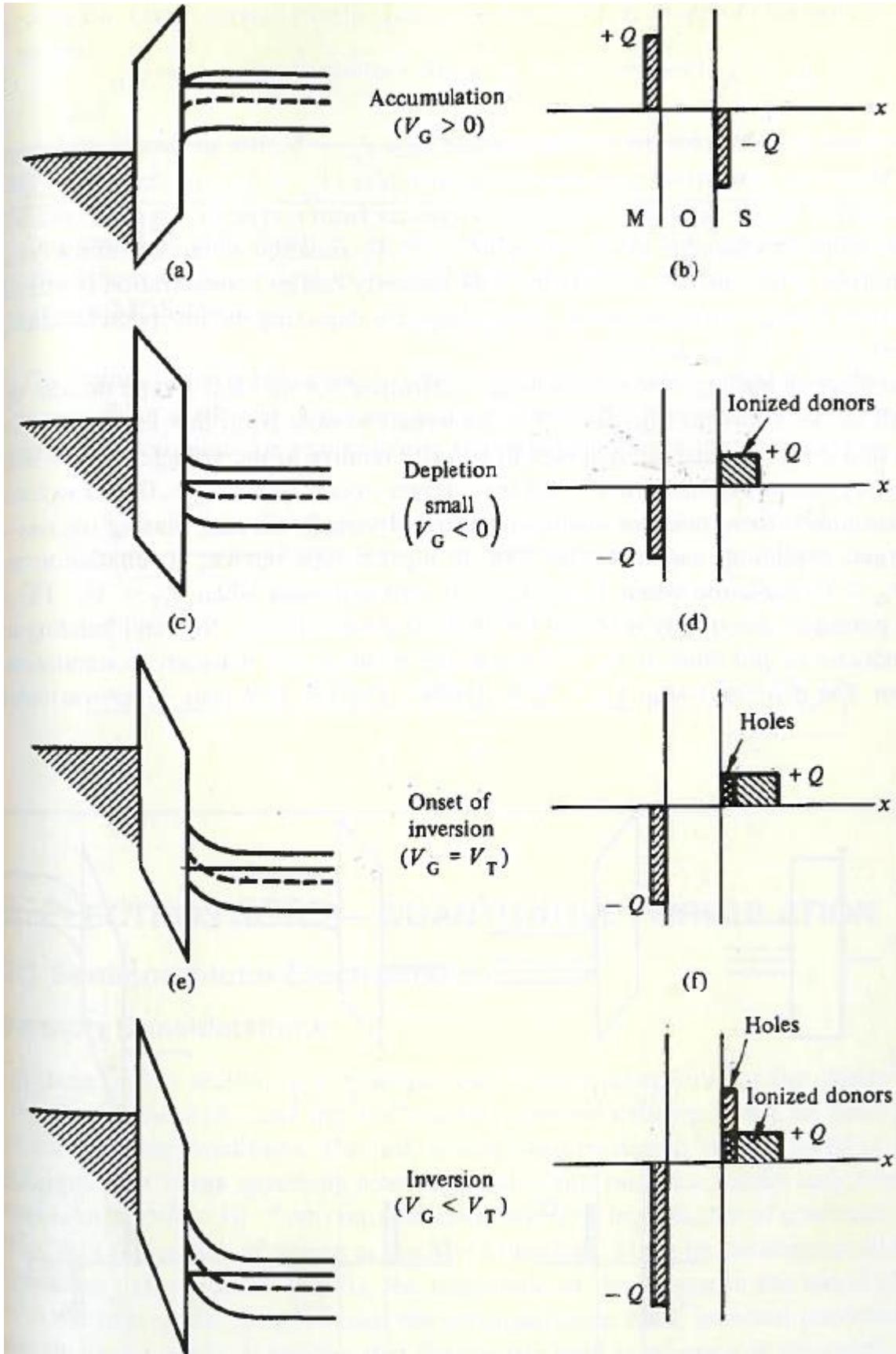


Figure 1 : Capacité d'une structure MOS en fonction de la tension de polarisation

1. 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.

2. Tracer des diagrammes de bandes (bande de conduction, bande de valence, niveau de Fermi...) pour une capacité MOS dopée n ou dopée p (votre choix) pour les trois différents régimes de fonctionnement. Ne pas oublier d'indiquer sur votre schéma où se trouvent les différentes parties du dispositif. Noter bien le dopage que vous avez choisi, le nom de chaque régime, et le signe de la tension nécessaire pour chaque régime de fonctionnement dans le cas d'une capacité MOS idéale (le semiconducteur est à la masse et la tension est appliquée à la grille métallique). **Dopé N**



3. Quelle est la nature de dopage de la capacité MOS de la Figure 1 ? Justifier. Noter (approximativement) les gammes de tension des différents régimes de la Figure 1.

Dopé p : En accumulation $C_{ACC} = C_I = \varepsilon_i / e_i$ (e_i : épaisseur, ε_i : permittivité absolue de

l'oxyde) et en inversion (haute fréquence) $\frac{1}{C_{INV}} = \frac{1}{C_I} + \frac{1}{C_{ZCE}}$ Alors $C_{ACC} > C_{INV}$. Donc on est

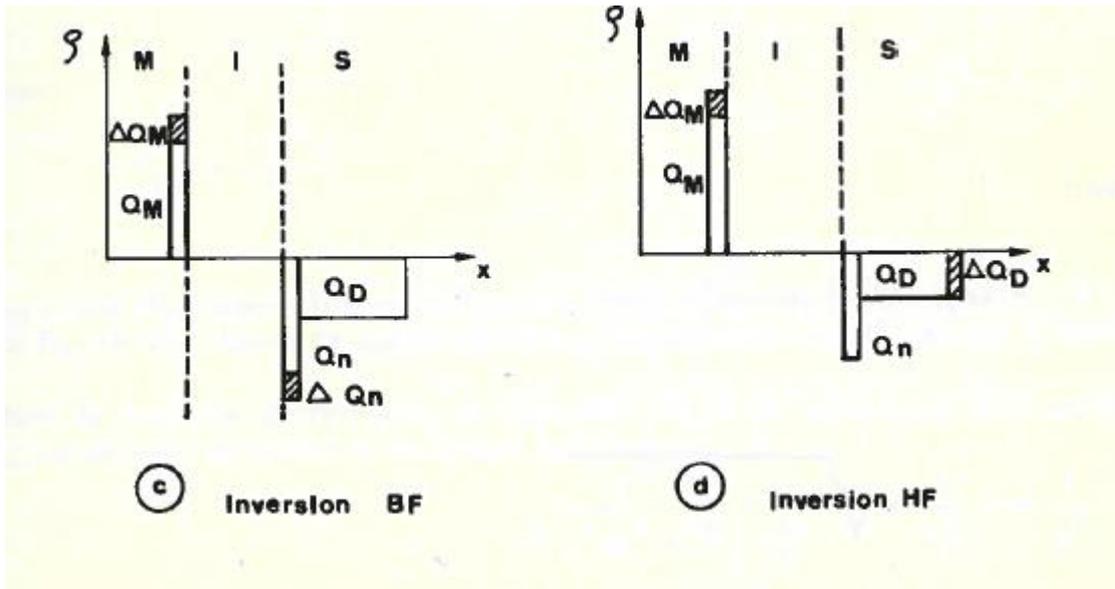
en accumulation pour $V_G < V_{FB}$. Nous avons donc une capacité MOS dopé p.

Acc : $V_G < -9V$ Déplétion : $-9V < V_G < 0V$; Inversion $V_G > 0V$

4. S'agit-il d'une mesure réalisée à haute ou à basse fréquence ? Justifier votre réponse et tracer un diagramme de charge (Q or ρ en fonction de x) et montrer dans le dispositif où la charge varie pour une mesure à haute fréquence, puis pour une mesure à basse fréquence afin d'illustrer votre réponse.

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

fréquence) $C_{INV}^{BF} = C_{ACC} = C_I = \varepsilon_i / e_i$. La raison pour ceci est la suivante. Les charges minoritaires dans la ZCE sont créées thermiquement, ce qui est un processus « lent ». Ainsi à haute fréquence, il n'y a pas assez de temps pour la création de ces charges minoritaires, donc en réponse à la charge ΔQ_M sur la grille, la ZCE s'élargit. Grâce au 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 ΔQ_{SC} se trouve à l'interface oxyde/SC (voir schéma). La capacité est donc limitée à celle de l'oxyde.



5. A partir du graphique, déterminer l'épaisseur de l'oxyde.

$$C_{ACC} = C_I = \epsilon_i / e_i \quad e_i = 0,5 \mu\text{m}$$

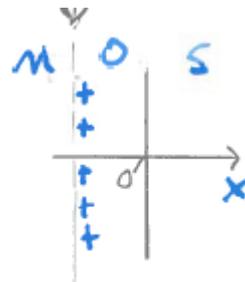
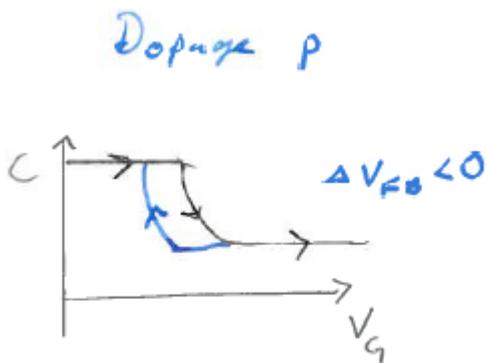
6. La caractéristique C(V) montre de l'hystérésis.

- a. A quelle interface doit se trouver une charge dans l'oxyde afin de pouvoir influencer la caractéristique C(V) ?

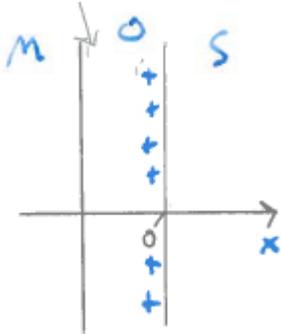
L'interface oxyde/semiconducteur

- b. Hypothèse d'une charge mobile dans l'oxyde.

- i. Tracer un diagramme de charge montrant dans l'oxyde où se trouve la charge mobile et une caractéristique C(V) pour le cas où une tension de -15 V est appliquée au dispositif pendant une heure avant la réalisation de la mesure C(V) (des tensions négatives aux tensions positives).

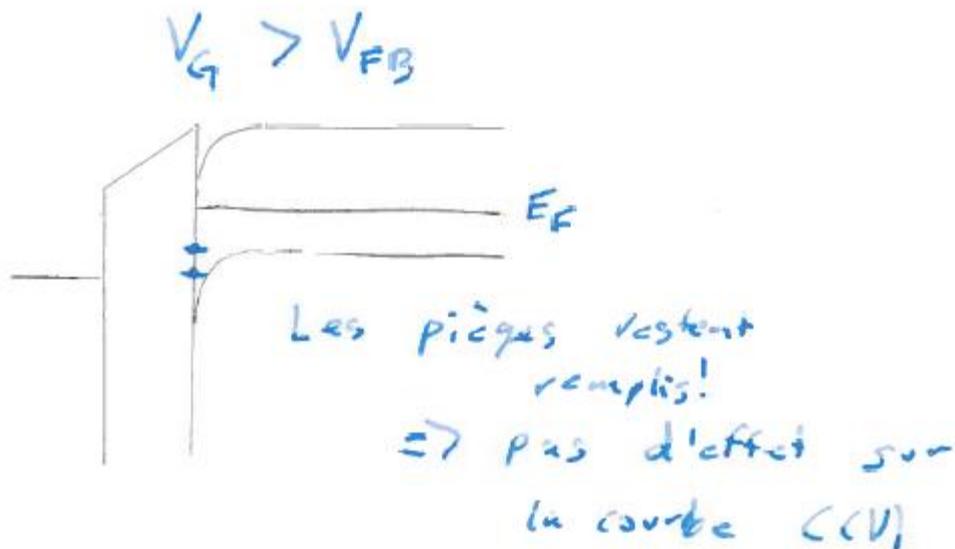


- ii. Tracer un diagramme de charge montrant dans l'oxyde où se trouve la charge mobile et ajouter une courbe sur votre caractéristique $C(V)$ pour le cas où une tension de +15 V est appliquée au dispositif pendant une heure avant la réalisation de la mesure $C(V)$ (des tensions positives aux tensions négatives).



- c. Hypothèse des pièges à l'interface oxyde/semiconducteur :

- i. Tracer un diagramme de bande et une caractéristique $C(V)$ pour un échantillon ayant des « pièges à trous » à l'interface oxyde/semiconducteur. (Ces pièges sont des états neutres si occupés par des électrons. Leur énergie est *en dessous* du niveau de Fermi à l'équilibre). Commencer (par exemple) par le cas où une tension de +15 V est appliquée au dispositif pendant une heure avant la réalisation de la mesure $C(V)$ (par ex de +15 V à -15 V).



3. Expliquer comment la tension appliquée entre grille et source permet de contrôler la formation d'un canal de conduction entre source et drain.

En appliquant une tension positive à la grille, les porteurs majoritaires du substrat (les trous) sont repoussés et les porteurs minoritaires (les électrons) sont attirés. Quand la tension appliquée dépasse la valeur de tension de seuil un canal se forme, c'est-à-dire que la densité d'électrons en dessous de la grille est au moins égale à la densité des trous dans le substrat en profondeur. Grâce à cette densité d'électrons élevée, un courant passe entre la source et le drain pour une tension V_{DS} appliquée.

4. A quoi sert ce dispositif ? Dans quel(s) appareil(s) se trouve-t-il ?

Ce dispositif fait partie des portes logiques et des fonctions mémoires. Il se trouve dans les ordinateurs, téléphones portables etc. etc. !!!

