

De l'atome à la puce

Corrigé du devoir surveillé – Décembre 2011

Durée : 2 heures

Calculatrices interdites (tous types)

Les exercices sont indépendants.

Vous devez expliquer le détail de votre raisonnement. Un résultat non justifié ne suffit pas à obtenir les points de la question.

Les données utiles (vous pourrez éventuellement les arrondir selon les besoins du calcul) :

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

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

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

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

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

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

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

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

1. Questions de cours

a. Procédés de lithographie

- A quoi sert la résine (positive ou négative) ? **1 point**

La résine sert à protéger le substrat de silicium que l'on souhaite graver.

- A quoi sert l'illumination ? **1 point**

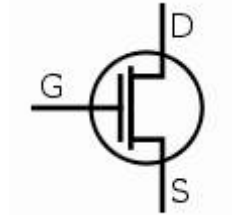
L'illumination permet de durcir la résine négative (photorésist) ou de décomposer la résine positive.

- Quel type d'irradiation doit être utilisé ? **1 point**

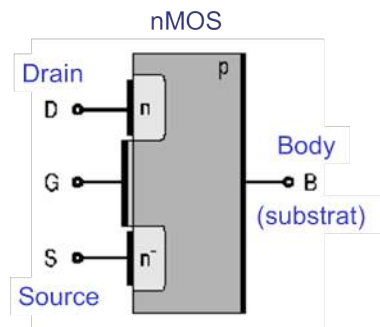
On utilise un rayonnement ultraviolet (UV).

b. Transistor nMOS

- Donnez la représentation schématique conventionnelle d'un nMOS. **1 point**

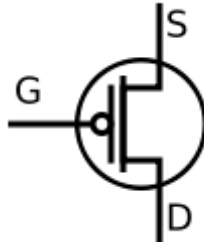


- Faites un schéma « en coupe » d'un nMOS, faisant apparaître Gate, Source, Drain, Isolant, Body (précisez le dopage des différents éléments). **1 point**

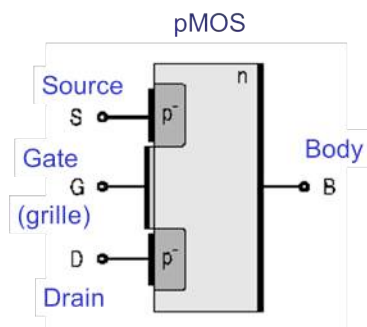


c. Transistor pMOS

- Donnez la représentation schématique conventionnelle d'un pMOS. **1 point**



- Faites un schéma « en coupe » d'un pMOS, faisant apparaître Gate, Source, Drain, Isolant, Body (précisez le dopage des différents éléments). **1 point**



2. Porte logique « NOT »

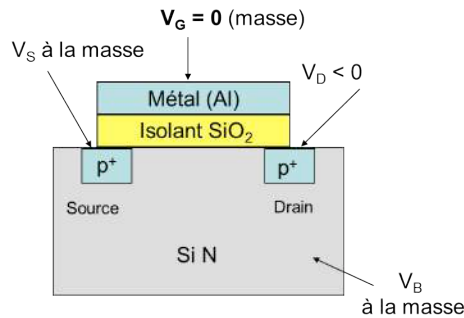
a. Transistor pMOS

Explicitez le fonctionnement d'un transistor pMOS, comme celui que vous avez décrit dans la question 1, en répondant aux questions suivantes :

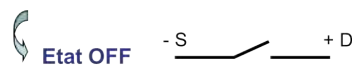
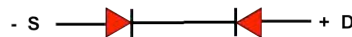
- Attribuez les polarités (Body, Source, Drain). **1 point**

Body et Source à la masse et Drain < 0.

- Montrez que les jonctions PN présentes sont toutes « bloquées ». **1 point**

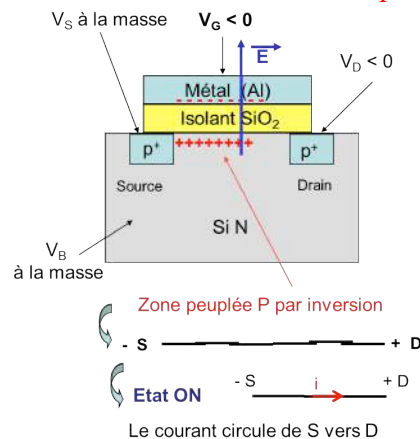


La diode P+N source-substrat est polarisée en inverse → pas de courant



- Si $V_G < 0$, que se passe-t-il ?

- Pourquoi un canal se forme-t-il ? **1 point**
- Pourquoi le courant peut-il passer entre la Source et le Drain ? **1 point**
- Dans quel sens circule ce courant ? **1 point**



- Discutez de l'état « passant » ou « bloqué » du transistor pMOS en fonction du potentiel de Gate (faites un tableau récapitulatif). **1 point**

$V_G < 0$	Passant
$V_G = 0$	Bloqué
$V_G > 0$	Bloqué

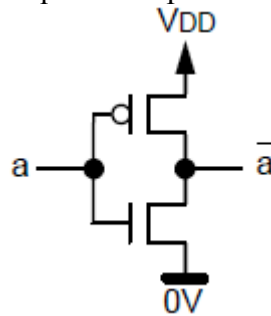
b. Transistor nMOS

- Discutez de l'état « passant » ou « bloqué » du transistor nMOS en fonction du potentiel de Gate (faites un tableau récapitulatif). **1 point**

$V_G > 0$	Passant
$V_G = 0$	Bloqué
$V_G < 0$	Bloqué

c. Porte NOT

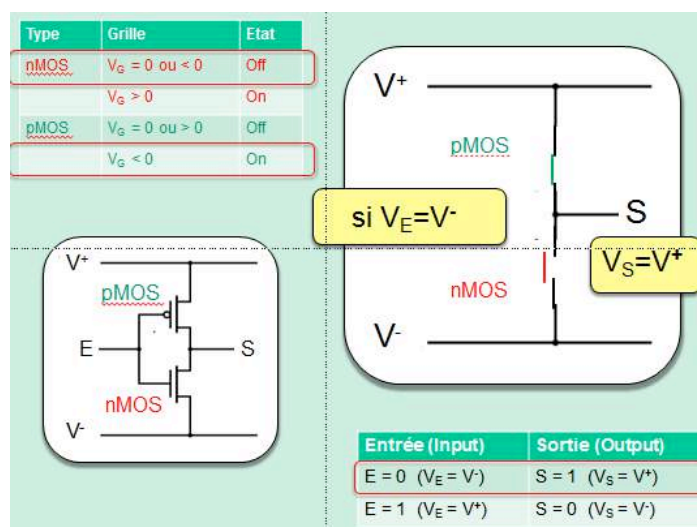
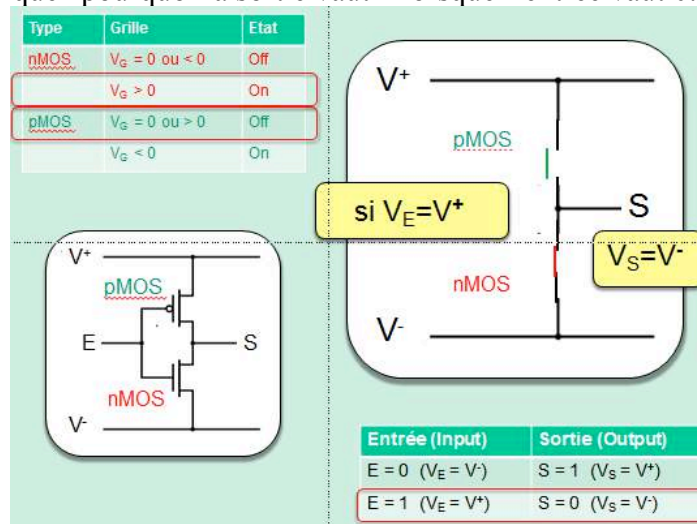
- Faites le schéma électrique d'une porte NOT. 1 point



- Donnez la table de vérité de cette porte. 1 point

a	\bar{a}
0	1
1	0

- Expliquez pourquoi la sortie vaut 1 lorsque l'entrée vaut 0. 1 point

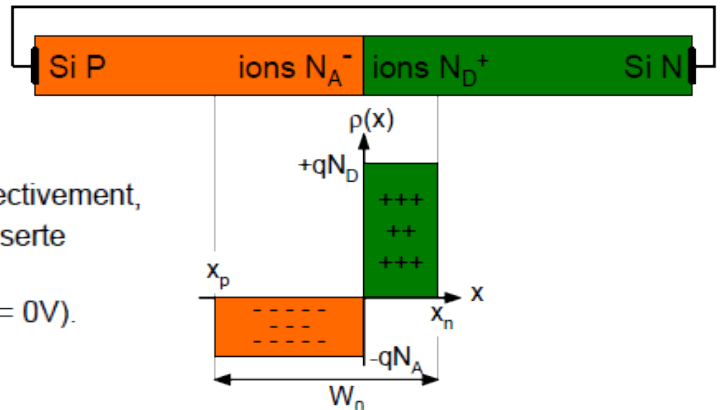


3. Zone de charges d'espace (ou zone déserte) & jonction PN

On considère une jonction PN :

Jonction PN en court-circuit ($V_{PN} = 0V$):

- $\rho(x)$: quantité de charge en fonction de x ,
- N_A et N_D : densités des dopages P et N respectivement,
- x_p et x_n : abscisses des limites de la Zone Déserte (Zone de Charge d'Espace),
- W_0 largeur de la ZD à polarisation nulle ($V_{PN} = 0V$).



a. Considérations qualitatives

- Tracez qualitativement les fonctions $n(x)$ (porteurs n) et $p(x)$ (porteurs p) dans la ZCE. **1 point.**

Se reporter au TD sur la jonction (la ZCE). p décroît entre $-x_p$ et 0 (maximum à x_p et minimum à 0), tandis que n décroît de x_n à 0 (maximum à x_n et minimum à 0).

- Pourquoi, à votre avis, la ZCE s'appelle aussi « zone déserte » ? **1 point.**

La jonction PN est obtenue en juxtaposant un SC dopé P et un SC dopé N. Au niveau de la jonction, on observe l'apparition d'une zone de charges d'espace, dans laquelle il n'y a pas de charges mobiles, d'où le nom de « zone déserte ou « zone de déplétion ».

b. Calculs

Soit $E(x)$ la norme du champ électrique régnant dans la ZCE, et V_Θ le potentiel de jonction.

- Montrez que le potentiel de jonction est : $V_\Theta = -\int_{x_p}^{x_n} E(x) dx$ 1 point.

$\vec{E}(x) = -\overrightarrow{\text{grad}} V(x)$ soit $E(x) = -\frac{dV(x)}{dx}$ et $E(x) dx = -dV(x)$. Dans la zone déserte pour $x_p \leq x \leq x_n$: $\int_{x_p}^{x_n} dV(x) = \int_{x_p}^{x_n} -E(x) dx$

soit : $V_\Theta = -\int_{x_p}^{x_n} E(x) dx$

- Sachant que $E(x) dx = \frac{kT}{q} \frac{dp}{p(x)}$, montrez que $V_\Theta = +\frac{kT}{q} \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2}$ 1 point.

(avec n_i la concentration de porteurs intrinsèques)

$$V_\Theta = -\frac{kT}{q} \int_{x_p}^{x_n} \frac{dp}{p(x)} = -\frac{kT}{q} [\ln(p(x))]_{x_p}^{x_n} = \frac{kT}{q} [\ln(p(x_p)) - \ln(p(x_n))] = \frac{kT}{q} \left[\ln N_A - \ln \frac{n_i^2}{N_D} \right] \text{ Enfin : } V_\Theta = +\frac{kT}{q} \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2}$$

- Application numérique. $N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $n_i = 1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, $T = 298 \text{ K}$, $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ et $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$. Calculez V_Θ . 1 point.

(pensez que $\ln(u) = 2,3 \times \log(u)$)

$$V_\Theta = 26 \cdot 10^{-3} \ln \left[\frac{10^{+24} \cdot 10^{+21}}{(1,45 \cdot 10^{+16})^2} \right] \approx +0,73 \text{ V}$$

Diode

- Tracez la caractéristique courant-tension ($i=f(V)$) de la diode composée de la jonction PN décrite ci-dessus. 1 point.

