COMBETTE
ElisePIL
2013

2014

PIL

NOM : Combette

PRENOM : Elise .

DE De l'Atome à la Puce

Question 1 :

On donne l'expression de la densité de courant totale dans un semi-conducteur:

$$J = q\mu_n n E + q\mu_p p E + qD_n \frac{dn}{dx} - qD_p \frac{dp}{dx}$$

On considère un échantillon de Germanium à $T=300\text{ K}$ avec une concentration de dopage de $N_d=0$ et $N_a=10^{16}\text{ cm}^{-3}$. On suppose que les mobilités des électrons et des trous sont $3900\text{ cm}^2/\text{V.s}$ et $1900\text{ cm}^2/\text{V.s}$ respectivement. Le champ électrique appliqué est de 50 V/cm . Soit $n_i=2,4 \times 10^{13}\text{ cm}^{-3}$. Calculer la densité de courant dans l'échantillon. Justifier raisonnement et calcul.

On sait d'après la relation d'Einstein que $\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{q}$.

Donc $qD_n = \mu_n kT$ et $qD_p = \mu_p kT$. D'où :

$$J = q(\mu_n n + \mu_p p)E + kT(\mu_n \frac{dn}{dx} - \mu_p \frac{dp}{dx})$$

① $p = N_A = 10^{16}\text{ cm}^{-3}$ et $n = N_D = 0$ donc on ne considère que les trous, le semi-conducteur est dopé p:

$$J = q\mu_p p E - kT\mu_p \frac{dp}{dx} = \mu_p (q p E - kT \frac{dp}{dx})$$

$$\frac{d(10^{16})}{dx} = 0!!$$

$$= 1900 (1,6 \cdot 10^{-19} \times 10^{16} \times 50 - 0,0259 \times 10^{16})$$

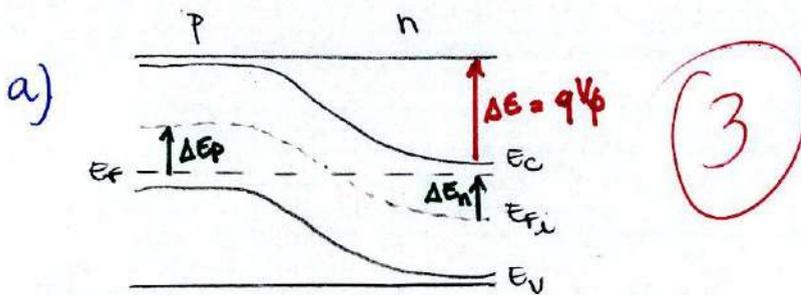
$$= 152 - 4,921 \cdot 10^{17} = -4,921 \cdot 10^{17}\text{ C cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$$

①.5

Question 2 :

- a) Tracer le modèle énergétique d'une jonction pn en équilibre thermique.
b) Démontrer que le potentiel de jonction peut être exprimé avec l'expression suivante :

$$V_{\phi} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$$



b) $\Delta E = qV_{\phi} = \Delta E_n + \Delta E_p = E_f - (E_{fi})_n + (E_{fi})_p - E_f = (E_{fi})_p - (E_{fi})_n$ ①
 On sait que $n = n_i e^{(E_f - E_{fi})/kT} = N_D$ et $p = n_i e^{(E_{fi} - E_f)/kT} = N_A$. On calcule donc $(E_{fi})_n$ et $(E_{fi})_p$: ①

* $N_D = n_i e^{(E_f - E_{fi})/kT} \Leftrightarrow e^{(E_f - E_{fi})/kT} = \frac{N_D}{n_i}$

$\frac{E_f - E_{fi}}{kT} = \ln \frac{N_D}{n_i}$ donc $(E_{fi})_n = -kT \ln \frac{N_D}{n_i} + E_f$

* $N_A = n_i e^{(E_{fi} - E_f)/kT} \Leftrightarrow e^{(E_{fi} - E_f)/kT} = \frac{N_A}{n_i}$

$\frac{E_{fi} - E_f}{kT} = \ln \frac{N_A}{n_i}$ donc $(E_{fi})_p = kT \ln \frac{N_A}{n_i} + E_f$

D'où $\Delta E = qV_{\phi} = kT \ln \frac{N_A}{n_i} + E_f + kT \ln \frac{N_D}{n_i} - E_f$ 2/5

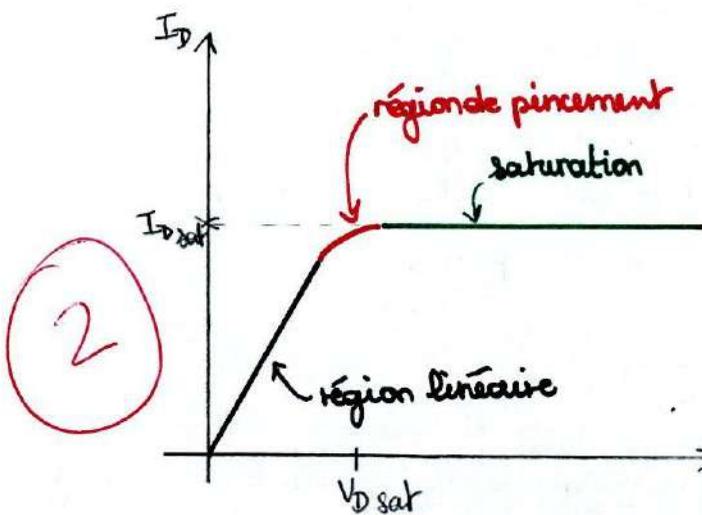
$\Leftrightarrow qV_{\phi} = kT \left(\ln \frac{N_A}{n_i} + \ln \frac{N_D}{n_i} \right)$ ①

$\Leftrightarrow V_{\phi} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$

Question 3 :

Tracer l'évolution d'une courbe caractéristique (I-V) d'un transistor MOS de type n à enrichissement, et décrire les modes d'opération correspondant à chaque région de la courbe en termes de tensions appliquées à la grille et au drain relativement à la source. Répondre aux questions suivantes qui vous serviront comme guide.

- Que se passe-t-il si la tension à la grille est nulle ?
- A partir de quelle valeur de tension à la grille commence à se former un canal d'inversion ? quelle est l'influence de la tension du drain sur la conductance dans ce cas ?
- Pour quelle condition principale de tension correspond la région linéaire ?
- Comment passe-t-on du mode linéaire au pincement ? à quelle valeur de tension de drain se produit le point de pincement ?
- Comment est appelé le mode d'opération au-delà du pincement ? pourquoi ?
- Si le transistor est passant, comment varie la courbe caractéristique en fonction de la tension à la grille ?



0,5 a) Si la tension à la grille est nulle, le courant ne passe pas.

0,5 b) Un canal d'inversion commence à se former à partir d'une tension à la grille $V_G = 0,7V$. ($V_G > V_T$)

0,5 c) La région linéaire correspond à une faible tension de drain mais supérieure à V_G .

pt de pincement

0,5 d) Le passage du mode linéaire au pincement se fait pour $V_D = V_{D,sat}$: le canal d'inversion se rétrécit au niveau du drain, le courant passe donc plus difficilement, c'est-à-dire que I_D augmente plus lentement.

0,5 e) Au-delà du pincement a lieu la saturation : le canal d'inversion finit par se fermer complètement, les électrons ne peuvent plus passer qu'avec le champ électrique donc le courant I_D ne dépend plus de V_D , il est constant pour $V_D > V_{D,sat}$ ($I_D = I_{D,sat}$)

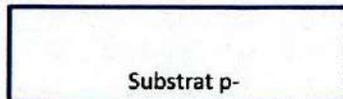
0,5 f) Si le transistor est passant, lorsque V_G augmente $I_{D,sat}$ augmente également.

Question 4 :

Décrire avec une ou deux phrases l'étape de fabrication appliquée pour produire chacune des transformations dans la fabrication d'un transistor nMOS à enrichissement.

①

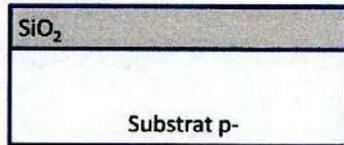
a)



on dope légèrement le substrat en silicium avec des atomes de Bore (p).

①

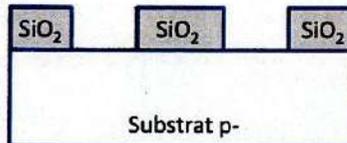
b)



on ajoute une couche d'oxyde SiO₂ par oxydation épaisse sur le substrat dopé p.

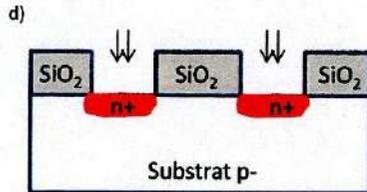
①

c)



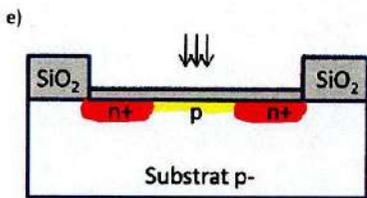
on ouvre les zones de source et de drain par photolithographie: on applique une résine positive, on l'expose à un rayonnement UV avec un masque optique laissant passer les UV au niveau des zones à éliminer, on développe (la résine exposée est éliminée), on grave l'oxyde à l'aide d'une solution acide, puis on retire la résine restante.

(1)



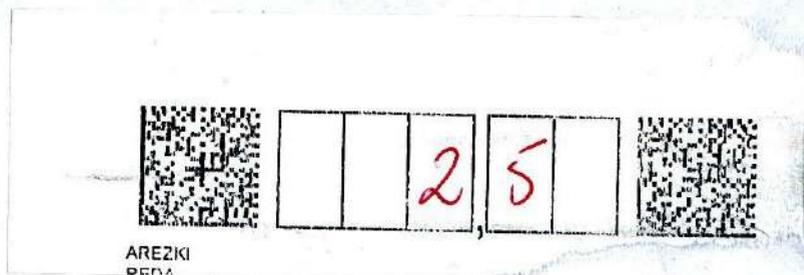
On dope fortement les zones de source et de drain avec du phosphore (n).

(1)



On dope la zone de canal d'inversion avec des atomes de Bore (p), après avoir retiré l'oxyde au niveau de la grille par photolithographie et ajouté une couche d'oxyde par oxydation fine.

Ensuite, on ouvre les zones de drain et de source par photolithographie, on dépose une couche d'aluminium et on ouvre les zones complémentaires aux zones de contact par photolithographie.



NOM : AREZKI

PRENOM : Réda

DE De l'Atome à la Puce

Question 1 :

On donne l'expression de la densité de courant totale dans un semi-conducteur:

$$J = q\mu_n n \varepsilon + q\mu_p p \varepsilon + qD_n \frac{dn}{dx} - qD_p \frac{dp}{dx}$$

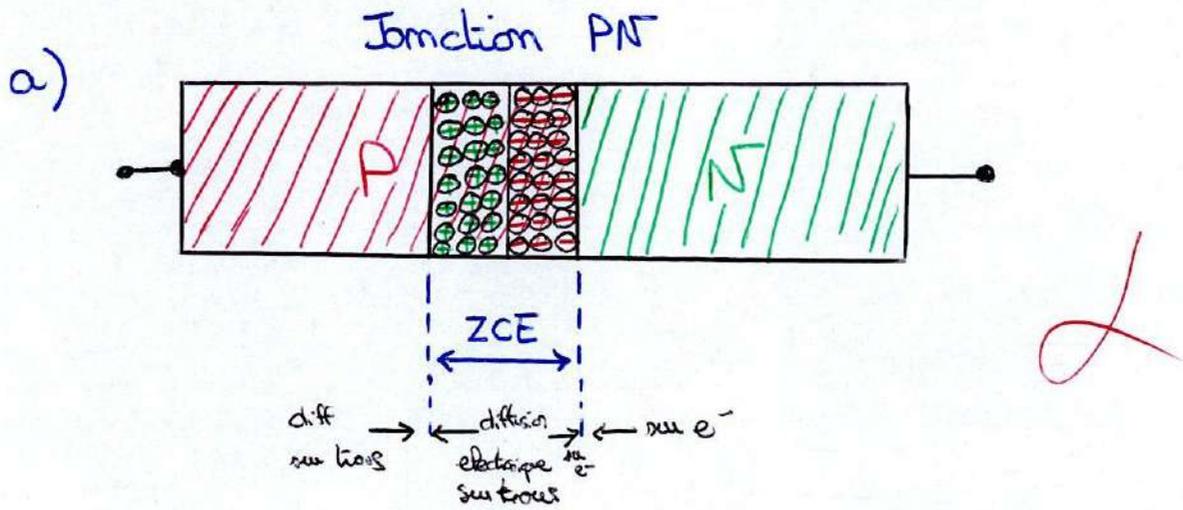
On considère un échantillon de Germanium à $T=300$ K avec une concentration de dopage de $N_d=0$ et $N_a=10^{16} \text{ cm}^{-3}$. On suppose que les mobilités des électrons et des trous sont $3900 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ et $1900 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ respectivement. Le champ électrique appliqué est de 50 V/cm . Soit $n_i=2,4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. Calculer la densité de courant dans l'échantillon. Justifier raisonnement et calcul.

2

Question 2 :

- a) Tracer le modèle énergétique d'une jonction pn en équilibre thermique.
- b) Démontrer que le potentiel de jonction peut être exprimé avec l'expression suivante :

$$V_{\phi} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$$



b)

$$V_{\phi} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \text{ correspond à la tension de diffusion}$$

avec :

$$\Delta E = q V_{\phi} = -q N_A + q N_D$$

0.5^{2/5}

$$n_i^2 = n_p = N_A n_0$$

$$n = \frac{n_i^2}{N_D}$$

or

$$q V_{\phi} = q N_D - q N_A = q (N_D - N_A)$$

On sait que:

$$\begin{cases} N_D = m_i \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right) \\ N_A = m_i \exp\left(\frac{E_A - E_F}{kT}\right) \end{cases}$$

$$N_A N_D = m_i^2 \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right) \exp\left(\frac{E_A - E_F}{kT}\right)$$

$$\frac{N_A N_D}{m_i^2} = \exp\left(\frac{-E_C + E_F + E_A - E_F}{kT}\right)$$

$$\frac{N_A N_D}{m_i^2} = \exp\left(\frac{E_A - E_C}{kT}\right)$$

$$\frac{E_A - E_C}{kT} = \ln\left(\frac{N_A N_D}{m_i^2}\right) \quad \text{or} \quad E_A - E_C = q$$

$$V_\phi = \frac{q}{kT} = \ln\left(\frac{N_A N_D}{m_i^2}\right)$$

$$V_\phi = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A N_D}{m_i^2}\right)$$

Question 3 :

Tracer l'évolution d'une courbe caractéristique (I-V) d'un transistor MOS de type n à enrichissement, et décrire les modes d'opération correspondant à chaque région de la courbe en termes de tensions appliquées à la grille et au drain relativement à la source. Répondre aux questions suivantes qui vous serviront comme guide.

- Que se passe-t-il si la tension à la grille est nulle ?
- A partir de quelle valeur de tension à la grille commence à se former un canal d'inversion ? quelle est l'influence de la tension du drain sur la conductance dans ce cas ?
- Pour quelle condition principale de tension correspond la région linéaire ?
- Comment passe-t-on du mode linéaire au pincement ? à quelle valeur de tension de drain se produit le point de pincement ?
- Comment est appelé le mode d'opération au-delà du pincement ? pourquoi ?
- Si le transistor est passant, comment varie la courbe caractéristique en fonction de la tension à la grille ?

0.5 a) Si la tension à la grille est nulle alors le semi-conducteur est un isolant.

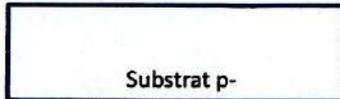
b) A partir d'une tension supérieure à 4 V le canal de grille commence à former un canal d'inversion.
la tension du drain permet de réguler cette tension

c) la région linéaire correspond

Question 4 :

Décrire avec une ou deux phrases l'étape de fabrication appliquée pour produire chacune des transformations dans la fabrication d'un transistor nMOS à enrichissement.

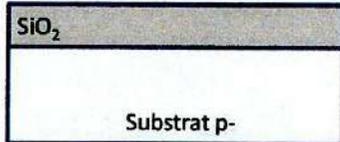
a)



Plaque de substrat grille

✗

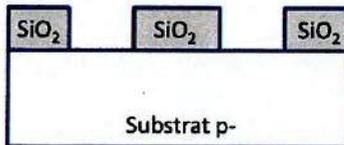
b)



on ajoute une plaque de SiO₂

0,5

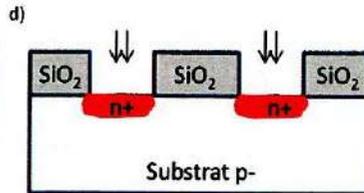
c)



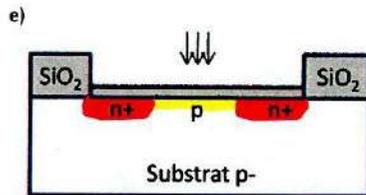
Affranchissement de la plaque de SiO₂

✗

0.5



Dopage par des ions m⁺



Affranchissement et Ajout du drain

