

TRANSISTOR A EFFET DE CHAMP (JFET) CANAL N ¹

1° PARTIE : ETUDE DE LA « ZONE OHMIQUE »

La figure 1 représente la structure d'un transistor JFET à canal N. Il est formé :

- D'un barreau de silicium de type N ($N_d = 10^{15}$ atomes cm^{-3} , résistivité $\rho_n = 5 \Omega \cdot \text{cm}$) dont les extrémités forment la source et le drain du dispositif.
- De silicium de type P ($N_a = 10^{16}$ atomes cm^{-3} , résistivité $\rho_p = 1,5 \Omega \cdot \text{cm}$) divisé en deux zones, séparées de la distance H , qui prennent en « sandwich » le silicium N. Cette zone P constitue la grille du dispositif.

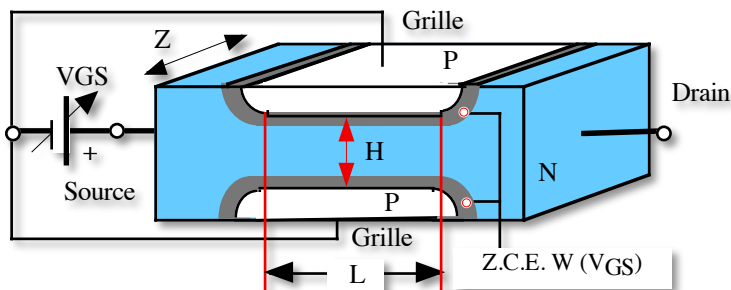


Figure 1

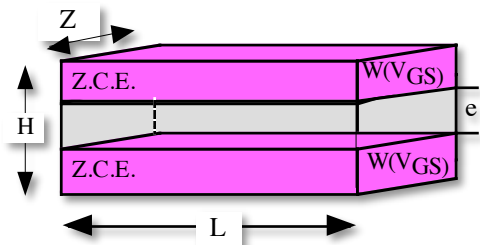


Figure 2

Le drain est "en l'air" (figure 1) c'est à dire déconnecté. On applique alors une tension V_{GS} **négligée** entre grille et source. La jonction PN, dont l'anode est formée par la grille et la cathode par la région N entre source et drain, est polarisée en inverse par la tension V_{GS} . Elle présente alors une zone de charge d'espace (Z.C.E.) dépourvue de porteurs et donc isolante, d'épaisseur $W(V_{GS})$ telle que :

$$W(V_{GS}) = k \sqrt{V_{\Phi} - V_{GS}} \quad (1)$$

Avec :

- $k = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_{si}}{qN_d}} \quad (2)$
- V_{Φ} est le potentiel interne de jonction : $V_{\Phi} = U_T \ln \left[\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right] = 0,639V$ à $25^\circ C$ (3)
- On donne de plus : $\epsilon_0 \epsilon_{si} = 1,05 \cdot 10^{-12} \text{F cm}^{-1}$ (4)

Dans cet exercice, on s'intéressera uniquement au canal situé sous la grille (figure 2) de largeur L et de section (Z, e) où la distance e est variable (on néglige les résistances d'accès au canal sous la grille du côté source et drain).

On donne de plus : $H = 5 \mu\text{m}$, $L = 6 \mu\text{m}$ et $Z = 600 \mu\text{m}$.

¹ Philippe ROUX© 2010 <http://philippe.roux.7.perso.neuf.fr>

A la distance x de la source l'épaisseur de la zone de charge d'espace est telle que :

$$W(x) = k\sqrt{V_\Phi - V_{GS} + V(x)} \quad (4)$$

On se propose de calculer l'expression du courant de drain I_D en fonction de V_{DS} , V_{GS} et des paramètres technologiques du dispositif.

A la distance x de la source, le canal possède une section : $S(x) = Z[H - 2W(x)] \quad (5)$

Pour un déplacement de x vers $x + dx$, on définit alors :

- Une résistance élémentaire du canal : $dR = \rho_n \frac{dx}{S(x)} \quad (6)$
- Une variation correspondante de potentiel : $dV(x) = I_D dR \quad (7)$

1. Déterminer, compte tenu des équations précédentes, l'expression de l'équation différentielle du premier ordre reliant I_D , $V(x)$ et dx .
2. Afin d'exprimer le courant de drain I_D (V_{DS} , V_{GS}), résoudre cette l'équation différentielle en séparant les variables dx , $V(x)$ et en prenant pour bornes d'intégrations :
 - x variant de 0 à L (la largeur du canal)
 - $V(x)$ variant de 0 à V_{DS} .
3. On se propose de déterminer la tension particulière V_{DS} appelée V_{Dsat} qui conduit au maximum du courant de drain I_D et ceci pour une tension V_{GS} maintenue constante.

a. Calculer l'expression la dérivée partielle : $\left[\frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} \right]_{V_{GS}const.}$

b. En déduire en fonction de V_p et V_{GS} , l'expression de V_{Dsat} (où I_D doit être maximal)

c. Pour $V_{GS} = 0$ V, Calculer la tension V_{Dsat} correspondante et la valeur correspondante du courant maximum de drain I_{DSS} . Faire l'application numérique.

4. On suppose maintenant que la tension V_{DS} est suffisamment faible pour effectuer l'approximation :

$$\left[1 + \frac{V_{DS}}{V_\Phi - V_{GS}} \right]^{\frac{3}{2}} \approx 1 + \frac{3}{2} \frac{V_{DS}}{V_\Phi - V_{GS}}$$

- a. Dans l'expression du courant de drain I_D , faire apparaître le 1° membre de l'équation précédente.
- b. Effectuer l'approximation indiquée et montrer que la tension V_{DS} est proportionnelle au courant de drain I_D . Que pensez-vous du résultat compte tenu de la relation (2) ?

CORRECTION

1° PARTIE : ETUDE DE LA ZONE OHMIQUE

1. La tension de pincement V_p est obtenue lorsque la zone de charge d'espace d'épaisseur W , de part et d'autre des deux zones P, envahit tout le canal du dispositif.

On a alors : $H = 2W = 2k\sqrt{V_\phi - V_p}$

On en déduit la tension de pincement : $V_p = V_\phi - \frac{H^2}{4k^2}$ (5)

A.N. $V_p = -4,129$ V

Remarque : La tension de pincement du JFET varie dans une même série de composants, en effet, lors de sa fabrication, il est difficile de maîtriser la distance H qui intervient dans l'expression de V_p .

2. Résistance R_{DS} du canal en fonction de ses paramètres technologiques. La résistance du canal est à géométrie variable :

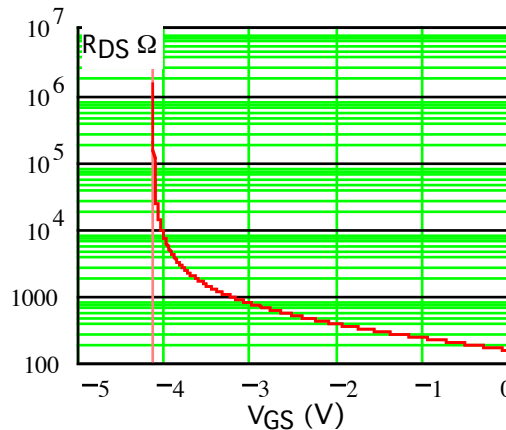
$R_{DS} = \rho_n \frac{L}{Z.e}$ avec : $e = H - 2W(V_{GS}) = H - 2k\sqrt{V_\phi - V_{GS}}$

$R_{DS} = \rho_n \frac{L}{Z[H - 2k\sqrt{V_\phi - V_{GS}}]}$ soit : $R_{DS} = \frac{\rho_n L}{ZH} \frac{1}{\left[1 - \frac{2k}{H}\sqrt{V_\phi - V_{GS}}\right]}$

L'équation (5) permet d'exprimer : $\frac{H}{2k} = \sqrt{V_\phi - V_p}$

Dans ces conditions :

$R_{DS} = \rho_n \frac{L}{ZH} \frac{1}{1 - \sqrt{\frac{V_\phi - V_{GS}}{V_\phi - V_p}}}$ (6)



Evolution de la résistance du canal en fonction de la tension V_{GS}

2° PARTIE : ETUDE DE LA REGION DE COUDE

1. Equation différentielle du premier ordre reliant I_D , $V(x)$ et dx .

$$dR = \rho_n \frac{dx}{S(x)} \quad S(x) = [H - 2W(x)]Z \quad W(x) = k\sqrt{V_\Phi - V_{GS} + V(x)}$$

$$dV(x) = I_D dR$$

$$dV(x) = \frac{I_D \rho_n}{Z} \frac{dx}{[H - 2k\sqrt{V_\Phi - V_{GS} + V(x)}]} \quad (7)$$

2. Résolution de l'équation différentielle.

$$I_D dx = \frac{Z}{\rho_n} [H - 2k\sqrt{V_\Phi - V_{GS} + V(x)}] dV(x)$$

$$I_D \int_0^L dx = \frac{Z}{\rho_n} \left\{ H \int_0^{V_{DS}} dV(x) - 2k \int_0^{V_{DS}} [V_\Phi - V_{GS} + V(x)]^{\frac{1}{2}} dV(x) \right\}$$

$$I_D = \frac{Z}{\rho_n L} \left\{ HV_{DS} - \frac{4}{3} k [V_\Phi - V_{GS} + V_{DS}]^{\frac{3}{2}} + \frac{4}{3} k [V_\Phi - V_{GS}]^{\frac{3}{2}} \right\} \quad (8)$$

3. Tension particulière V_{DS} appelée V_{DSat} qui conduit au maximum du courant de drain I_D et ceci pour une tension V_{GS} maintenue constante.

a. $\left[\frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} \right]_{V_{GS} \text{ const.}} = \frac{ZH}{\rho_n L} \left\{ 1 - \frac{2k}{H} [V_\Phi - V_{GS} + V_{DS}]^{\frac{1}{2}} \right\}$

b. La dérivée partielle précédente s'annule lorsque : $\frac{2k}{H} = [V_\Phi - V_{GS} + V_{DSat}]^{\frac{1}{2}}$.

On en déduit alors : $V_{DSat} = \left[\frac{H^2}{4k^2} - V_\Phi \right] + V_{GS}$

Compte tenu de la relation (5), il vient :

$$V_{DSat} = V_{GS} - V_P$$

c. Pour une tension V_{GS} nulle, on obtient : $V_{DSat} = -V_P = 4,123V$.
Calculons la valeur correspondante du courant maximum de drain I_{DSS} :

$$I_{DSS} = \frac{ZH}{\rho_n L} \left\{ -V_P - \frac{4}{3} \frac{k}{H} [V_\Phi - V_P]^{\frac{3}{2}} + \frac{4}{3} \frac{k}{H} [V_\Phi]^{\frac{3}{2}} \right\} \text{ sachant que : } \frac{k}{H} = \frac{1}{2\sqrt{[V_\Phi - V_P]}}$$

Il vient :

$$I_{DSS} = \frac{ZH}{\rho_n L} \left\{ -V_P - \frac{2}{3} [V_\Phi - V_P] + \frac{2}{3} \frac{[V_\Phi]^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{V_\Phi - V_P}} \right\}$$

Application numérique : $I_{DSS} = 11 \text{ mA}$.

4. La tension V_{DS} est supposée faible.

a. Expression du courant de drain :

$$I_D = \frac{ZH}{\rho_n L} \left\{ V_{DS} - \frac{4}{3H} k [V_\Phi - V_{GS}]^{\frac{3}{2}} \left[1 + \frac{V_{DS}}{V_\Phi - V_{GS}} \right]^{\frac{3}{2}} + \frac{4}{3H} k [V_\Phi - V_{GS}]^{\frac{3}{2}} \right\}$$

b. En utilisant l'approximation, on obtient après simplifications :

$$I_D = \frac{ZH}{\rho_n L} \left[1 - \frac{\sqrt{V_\Phi - V_{GS}}}{\sqrt{V_\Phi - V_P}} \right]$$

Soit compte tenu de la relation (6) :

$$I_D = \frac{V_{DS}}{R_{DS}}$$

On retrouve donc la zone « ohmique » du transistor JFET comme indiqué ci-dessous.

