MOBILITE EFFECTIVE DANS LE CANAL D'INVERSION D'UN TRANSISTOR MOSFET REALISE DANS UNE COUCHE MINCE DE SILICIUM POLYCRISTALLIN

A. Mercier, M. El Koosy, A. Le Glaunec, E. Le Tiran

► To cite this version:

A. Mercier, M. El Koosy, A. Le Glaunec, E. Le Tiran. MOBILITE EFFECTIVE DANS LE CANAL D'INVERSION D'UN TRANSISTOR MOSFET REALISE DANS UNE COUCHE MINCE DE SILICIUM POLYCRISTALLIN. Journal de Physique Colloques, 1982, 43 (C1), pp.C1-369-C1-374. 10.1051/jphyscol:1982149 . jpa-00221806

HAL Id: jpa-00221806

<https://hal.science/jpa-00221806>

Submitted on 1 Jan 1982

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MOBILITE EFFECTIVE DANS LE CANAL D'INVERSION D'UN TRANSISTOR MOSFET
REALISE DANS UNE COUCHE MINCE DE SILICIUM POLYCRISTALLIN

A. Mercier, M. El Koosy, A. Le Glaunec et E. Le Tiran

*Ecole Supérieure d'Electricité, Antenne de Rennes, Avenue de la Boulais,
B.P. 20, 35510 Cesson Sévigné, France*

Résumé - Nous avons étudié les caractéristiques électriques de transistors MOSFET réalisés dans une couche de silicium polycristallin déposé par LPCVD et dopé par implantation ionique. La mobilité effective des porteurs dans le canal formé par inversion, déduite de la mesure de la conductance augmente avec la tension appliquée sur la grille ; elle est activée thermiquement et l'énergie d'activation qui est de même nature que la barrière de potentiel aux joints de grains décrite par Seto, décroît lorsque $|V_G|$ augmente.

Abstract - We studied the electrical characteristics of MOSFET transistors fabricated in polycrystalline silicon films deposited by LPCVD technique and doped by ion implantation. The effective mobility of the carriers in the inverted channel has been calculated from the conductance measurements. This mobility increases with the gate applied voltage, it is thermally activated and the energy of activation is the same as the potential barrier at the grain boundaries described by Seto, this barrier has been found to decrease when $|V_G|$ increases.

1 - Introduction - Le Silicium polycristallin, déposé en couches minces, est de plus en plus utilisé dans la technologie des circuits intégrés - couches fortement dopées pour les grilles de transistors MOS, et les niveaux d'interconnexion, mais aussi couches faiblement dopées pour obtenir des résistances de forte valeur, résistances de charge dans les mémoires MOS statiques par exemple. Dans la recherche d'une densité d'intégration toujours plus grande, les couches de polySi devraient permettre la réalisation de structures tridimensionnelles et dans cette perspective, une bonne compréhension des propriétés physiques et électriques des couches de polySi est indispensable.

Dans ces perspectives, nous nous sommes intéressés à la caractérisation électrique de transistors MOSFET canal n et canal p réalisés dans du polySi obtenu par dépôt chimique en phase vapeur sous pression réduite (LPCVD) et dopé par implantation ionique. La question posée était de vérifier si le modèle électrique du transistor MOS établi dans le cas du matériau monocristallin pouvait s'appliquer et d'analyser les propriétés qui en découlaient pour le paramètre de mobilité effective, en particulier variation avec la température et avec la tension appliquée sur la grille.

2 - Etude expérimentale - Des couches de polySi (épaisseur $\sim 7500 \text{ \AA}$, taille des grains $\sim 550 \text{ \AA}$) ont été déposées par LPCVD à 620°C sur un substrat de Silicium monocristallin orientation $\langle 111 \rangle$ dopé n^+ ($\rho = 0,01 \Omega \times \text{cm}$), oxydé thermiquement (épaisseur de la couche de $\text{SiO}_2 \sim 800 \text{ \AA}$). Le dopage du polycristal dans les zones actives (résistances et canaux des TMOS) est effectuée par implantation d'ions phosphore

(P⁺, dose = 10^{11} à $5 \cdot 10^{15}$ /cm², E = 100 keV) ; les deux autres étapes de dopage à forte concentration (p⁺ ou n⁺), pour la réalisation des régions de drain et source et des régions de contact pour les résistances sont faites par diffusion, l'oxyde de grille ~ 700 Å, obtenu par oxydation thermique (1050°C, 30' O₂) ; l'implantation est faite à travers cette couche d'oxyde et un recuit post implantation est effectué à 970°C (40' N₂ + 10' O₂). Sur chaque plaque nous disposons de résistances de différentes géométries, de TMOS canal n et de canal p (Largeur W = 100 μ et Longueur L = 12 μ)

3 - Mesures - a) Résistances :

A partir de la mesure des résistances (pente de la caractéristique I(V) dans sa partie linéaire), et connaissant les paramètres longueur et largeur des résistances, nous avons calculé la résistance superficielle R_s des couches de polySi sur les différentes plaques et à des températures variant entre 25° et 175° C. Log R_s varie linéairement en fonction de $\frac{1}{kT}$ (Fig. 1) et la pente des droites qui est (l'énergie d'activation) E_a varie avec le niveau de dopage N_D [1].

b) Transistors MOS :

- Nous avons relevé les caractéristiques de drain et de transfert pour un fonctionnement du transistor dans la région linéaire. Pour les TMOS canal p, le canal est formé par inversion lorsqu'on applique sur la grille une tension suffisamment négative, on remarque (Fig. 2) que la tension de seuil V_T ne varie pas avec le niveau de dopage du substrat polySi tant que celui-ci reste inférieur à une valeur critique que nous noterons N_t^{*}.

- Les remarques qui vont suivre, sont relatives aux mesures effectuées sur une même plaque (dose d'implantation = $5 \cdot 10^{12}$ /cm²).

L'analyse des caractéristiques de transfert des TMOS canal p montre que, dans le domaine des valeurs de V_G envisagées, I_D ne varie pas linéairement avec V_G, comme dans le cas d'un substrat en silicium monocristallin; nous avons établi la relation empirique suivante :

$$I_D = I_D - I_0 = \alpha (V_G - V_T)^2 \text{ dans laquelle}$$

α est un coefficient expérimental qui dépend de V_{DS} et T.

I₀ est la valeur constante de I_D quand V_G diminue en dessous de V_T, et varie avec la température.

Fig. 1 Log R_s = f($\frac{10^3}{T}$) pour différentes doses d'implantation.

Fig. 2 I_D = f(V_G) pour différents niveaux de dopage (N_D/cm³)

Ainsi, nous avons déterminé pour chaque température la valeur de la tension de seuil V_T (Fig. 3). Nous avons mesuré la conductance du canal formé par inversion

$g_s = \left| \frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} \right|_{V_{GS}}$ en fonction de V_G pour différentes températures [25 - 150°C] (Fig.4)

Fig. 3 $\sqrt{I_D} = f(V_G)$: détermination de $V_T = f(T)$ Fig. 4 $g_s = f(V_G)$ pour $T = 25, 75, 125, 150^\circ\text{C}$

4 - Analyse et discussion

a) Densité des états pièges

Sur la Figure 5, on a porté l'énergie d'activation E_a en fonction de la concentration en dopants N_D ; celle-ci est obtenue en divisant la dose d'implantation par l'épaisseur de la couche polycristalline. En effet, on peut admettre que lors du recuit thermique post-implantation, les atomes d'impureté se redistribuent uniformément dans toute l'épaisseur de la couche. L'énergie d'activation est inversement proportionnelle à la concentration des dopants. Ce résultat est en accord avec le modèle de piégeage des porteurs aux joints de grains proposé par Seto [2]. Les états pièges aux joints de grains (densité N_t/cm^2) proviennent du

Fig. 5 $E_a = f(N_D)$ = détermination de N_t

désordre dans la structure polycristalline, les porteurs sont piégés dans ces régions et il se forme une zone de charge d'espace et par suite une barrière de potentiel ϕ_B qui s'oppose au déplacement des porteurs libres entre les grains.

Pour une taille de cristallite (L), lorsque le niveau de dopage est suffisamment grand ($LN_D > N_t$), les pièges sont complètement remplis, la cristallite partiellement

appauvrie et

$$E_a = \phi_B = \frac{q2N_t^2}{8\epsilon N_D}$$

La courbe de la Figure 5 est en accord avec cette équation c'est-à-dire que pour les niveaux de dopage correspondant aux résistances mesurées, les cristallites sont partiellement appauvries, $N_D > N_t^*$ ($N_t^* = \frac{N_t}{L}$), $\phi_B = E_a$. A partir de la courbe

$E_a = f(\frac{1}{N_D})$ nous avons calculé $N_t = 2.3 \times 10^{12}/\text{cm}^2$, valeur qui est voisine de celles données par divers auteurs [3] et $N_t^* = 4.6 \times 10^{17}/\text{cm}^3$.

b) Mobilité effective dans les couches d'inversion :

La mobilité des porteurs dans les couches d'inversion et d'accumulation est un paramètre fondamental pour la conception des dispositifs et la simulation des circuits. Dans tous les modèles c'est la mobilité effective ou mobilité de conduction qui intervient.

Considérons l'expression du courant I_D dans un TMOS en Si monocristallin pour un canal p formé par inversion et pour un fonctionnement dans la région linéaire :

$$I_D = \mu_{\text{eff}} \frac{W}{L} \cdot C_{\text{ox}} \cdot (V_G - V_T) V_D$$

W largeur du canal

L longueur du canal

C_{ox} capacité de l'oxyde

μ_{eff} mobilité effective des trous dans le canal formé par inversion.

Reprenons la même expression de I_D en fonction de V_D pour le TMOS en poly Si ; si l'on fait apparaître la variation de μ_{eff} en fonction de V_G la conductance du canal s'écrit :

$$g_S = \mu_{\text{eff}} (V_G) \cdot \frac{W}{L} \cdot C_{\text{ox}} \cdot (V_G - V_T)$$

A partir de la mesure de $g_S(V_G, T)$, nous avons pu calculer $\mu_{\text{eff}}(V_G, T)$.

- Nous avons tracé $\mu_{\text{eff}} = f(V_G)$ à différentes températures (Fig. 6) : l'augmentation de μ_{eff} lorsque $|V_G|$ augmente est tout à fait contraire à ce qui est observé pour une couche d'inversion dans du silicium monocristallin [4] où l'effet de dispersion des porteurs par la surface entraîne une diminution de la mobilité d'autant plus importante que le potentiel appliqué à la surface est grand.

Les valeurs faibles de la mobilité μ_{eff} dans le polySi sont dues à l'effet de dispersion des porteurs aux joints de grains. Waxman [5] a admis qu'il existait une barrière de potentiel relative à des concentration de porteurs libres p_c et p_g différentes

dans deux domaines différents, la cristallite et le joint de grains respectivement :

$\phi_B = kT \log \frac{p_c}{p}$; lorsque V_G varie p_c et p_g ne varient pas la même quantité à cause des pièges qui existent dans le joint de grains, mais lorsque V_G croît, les pièges se remplissent, p_g tend vers p_c , par suite ϕ_B diminue et l'effet de dispersion des porteurs aux joints de grains devient négligeable par rapport à l'effet de la surface.

La forme des courbes $\mu_{\text{eff}}(V_G)$ montre bien que pour des valeurs de $|V_G|$ plus élevées (non envisagées dans notre étude, compte tenu de la faible épaisseur de couche d'oxyde), la mobilité doit passer par une valeur maximum et de redécroître ensuite [6].

Fig. 6 $\mu_{\text{eff}} = f(V_G)$ pour $T = 25, 75, 125, 150^\circ\text{C}$

- Nous avons tracé $\text{Log } \mu_{\text{eff}}$ en fonction de $\frac{1}{kT}$ (Fig. 7) pour différentes valeurs de V_G : les droites obtenues nous montrent que la mobilité est activée thermiquement et la tension de grille peut s'écrire :

$$\mu_{\text{eff}} = A \times \frac{1}{V_G^a} \times \exp \frac{-\phi_B(V_G)}{kT} \quad \text{pour } V_G > V_T$$

L'analyse des courbes de la figure 7, nous a permis de déterminer les coefficients A , a , la fonction $\phi_B(V_G)$, et par suite μ_{eff}

$$\mu_{\text{eff}} [\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}] = 0.4 \times \frac{1}{V_G^{4.4}} \exp - \frac{2.08}{kT(V_G^{1.19})} \quad \text{pour } V_G > V_T$$

La variation en fonction de la température de μ_{eff} , pour une tension de grille V_G , est en accord avec le modèle de Seto, en effet pour la gamme des températures envisagées dans cette étude, le terme prépondérant dans la variation de μ avec la température, correspond au franchissement des barrières de potentiel par effet thermionique. Le modèle de Seto ne prend pas en compte l'effet d'un champ transversal sur le déplacement des porteurs ; qualitativement on peut admettre que la variation de la hauteur de la barrière de potentiel est liée à une modification du coefficient de remplissage des pièges lorsque les bandes d'énergie se déplacent par rapport à E_F .

Sur une même plaque et pour deux motifs voisins, une résistance et un TMOS canal n, nous avons trouvé un bon accord entre les valeurs de l'énergie d'activation calculée à partir de R_S et à partir de g_S . Ce résultat nous laisse supposer que le modèle de Seto peut s'appliquer dans le cas de TMOS.

Fig. 7 $\text{Log } \mu_{eff} = f\left(\frac{10^3}{L}\right)$ pour différentes valeurs de V_G

Fig. 8 $\phi_B = f(V_G)$

Conclusion

Le modèle électrique du TMOS établi dans le cas du Silicium monocristallin, peut s'appliquer dans le cas où le substrat est une couche mince de Silicium polycristallin. En effet, la mobilité effective des porteurs dans le canal formé par inversion, varie en fonction de la température conformément au modèle de Seto et la hauteur de la barrière de potentiel aux joints de grains diminue lorsque la tension appliquée sur la grille augmente.

References

- [1] James D. MEINDL - IEEE Trans. Electron Devices - Vol ED-28, N°7, pp.818-830 - 1981
- [2] John Y.W. SETO - J. Appl. Phys, Vol 46, N°12, pp. 5247-5254, 1975.
- [3] S.W. DEPP - Proc of the Materials Research Society, Boston, November 1981.
- [4] S.C. SUN - IEEE J. Solid State Circuits, Vol SC 15, N°4, pp. 562-573, 1980.
- [5] A. WAXMAN - J. Appl. Phys., Vol 36, N°1, pp. 168-175, 1965.
- [6] J.T.C. CHEN - J. Appl. Phys., Vol 45, n°2, pp. 828-834, 1974.