

PRÀCTICA 4. ESTUDI D'UNA ESTRUCTURA MOS

4.1. Introducció

Aquesta pràctica no té per objectiu estudiar el transistor MOS, sino que tan sols s'hi estudien els diferents estats d'una estructura MOS i com es formaria el canal en un transistor PMOS. S'utilitzaran els arxius MOS.prm, subs.txt i batchmoscond.txt. Els resultats que es demanen es descriuen en el darrer apartat d'aquest guió.

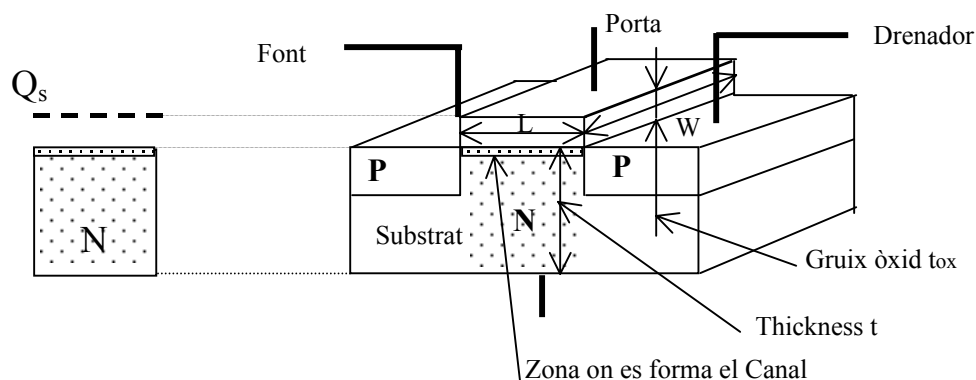
TREBALL PREVI A LA REALITZACIÓ DE LA PRÀCTICA:

- a) Llegir amb deteniment aquest guió
- b) Reproduir personalment les simulacions de l'apartat 4.2.1

4.2. Descripció de l'estructura MOS

Primer es realitza una breu descripció física de l'estructura i després es descriu el comportament de les variables mitjançant diverses simulacions guiades.

En apilar tres llenques de materials de diferent conductivitat (metall(M), òxid(O) i semiconductor(S)) s'obté una estructura que, convenientment polaritzada, permet conduir el corrent elèctric per la zona del semiconductor propera de la interfície amb l'òxid, on es forma l'anomenat canal. Dues zones adjacents, anomenades Font i Drenador, queden unides a través del canal quan s'aplica a la Porta una tensió, en valor absolut superior a l'anomenada tensió llindar. A l'esquema de la figura, corresponent a un PMOS, la tensió de porta ha de ser negativa per formar el canal, constituït per forats.



El metall i el semiconductor estan separats per l'òxid i la tensió que s'aplica al terminal de porta es tradueix en la càrrega de l'anomenat condensador de porta, el dielèctric del qual és l'òxid de l'estructura MOS. Això ens permet simular el comportament de l'estructura MOS simulant tant sols la càrrega induïda en el semiconductor quan a la banda del metall del condensador de porta hi ha una càrrega superficial Q_s acumulada.

Independentment de la tensió aplicada a la porta cal tenir en compte, a l'hora d'avaluar l'estat de l'estructura MOS, tres aspectes inherents als materials de que està formada:

- 1) la diferència de valor de la funció treball del metall i la del semiconductor, que normalment són diferents.

- 2) les càrregues fixes que habitualment l'òxid conté.
- 3) la càrrega que se sol implantar a la part superior del substrat, per ajustar el valor de la tensió llindar.

Atesos els anteriors punts, la interfície òxid-semiconductor pot estar carregada abans d'aplicar cap tensió. Tot això fa que es distingeixen dos tipus de transistor PMOS: de buidament i d'acumulació, en funció de si per tensió de porta nul·la hi ha o no canal, respectivament.



Pel PMOS d'acumulació la tensió llindar és negativa, i conseqüentment, per formar canal cal aplicar una tensió de porta superior, en valor absolut, a la tensió llindar. En un transistor PMOS d'acumulació on la funció treball del semiconductor és idèntica a la del metall, i on no hi ha ni càrrega a l'òxid ni càrrega implantada al substrat la seva estructura MOS, abans de formar el canal, passa pels següents tres estats:

Estat 1: banda plana. Aprop de l'òxid, tan per la banda del substrat com per la del metall, no hi ha cap acumulació de portadors. Les bandes del diagrama de bandes són horitzontals.

Estat 2: depleció. Aprop de l'òxid, per la banda de la porta hi ha una acumulació d'electrons i per la del substrat, hi ha una falta d'electrons, anomenada també depleció d'electrons, atesa la tensió negativa que s'aplica a la porta. Les bandes del diagrama de bandes es corben lleugerament.

Estat 3: inversió. Aprop de l'òxid, per la banda del substrat, s'acumulen portadors de càrrega positiva, anomenats forats, que són els que constitueixen el canal que uneix drenador i sortidor d'un transistor PMOS. Les bandes del diagrama de bandes es corben considerablement.

Aquest mateix PMOS d'acumulació pot estar en un quart estat: acumulació, estat on hi ha una acumulació d'electrons a prop de l'òxid, per la banda del substrat.

Aquests estats també poden donar-se malgrat que no s'apliqui cap tensió a la porta atès un diferent valor de la funció treball del metall i del semiconductor i/o una càrrega fixa de l'òxid i/o una càrrega implantada en el substrat. En aquests casos, i per aconseguir l'estat de banda plana caldrà aplicar una tensió de porta negativa que s'anomena tensió de banda plana V_{FB} .

$$V_{FB} = \psi_{MS} - \frac{Q'_{ox}}{C'_{ox}} - \frac{Q'_{im}}{C'_{ox}}$$

on ψ_{MS} és la diferència de funcions treball de metall i semiconductor, C'_{ox} és la capacitat de l'òxid per unitat de superfície, Q'_{ox} és la càrrega de l'òxid per unitat de superfície i Q'_{im} és la càrrega implantada per unitat de superfície

4.2.1 Simulacions guiades

L'objectiu de les següents simulacions guiades (S1, S2, S3, S4, S5) és aconseguir la familiarització necessària amb el programa de simulació per poder-lo utilitzar destrament en l'estudi d'una estructura MOS. És per això que en algunes d'aquestes simulacions es fa un estudi detallat de les magnituds que descriuen els estats de l'estructura MOS a simular. Suposarem que:

- 1) $\Psi_{MS}=0$
- 2) $Q'_{ox}=0$
- 3) $Q'_{im}=0$

Simulació S1 a l'estat d'equilibri amb un valor nul de la càrrega superficial Q_s : Estat de banda plana

Incorporació de l'arxiu que conté l'estructura a simular

S'incorpora l'arxiu MOS.PRM, i a continuació comprovem que aquests valors siguin els corresponents a la simulació a l'estat d'equilibri.

Verificació dels valors dels paràmetres de l'estructura

En primer lloc, a continuació del mot **DEVICE**, que apareix en vermell, s'hi han de veure en negreta les línies de text següents:

Device area: 1 cm²
Front surface charge: 0 cm⁻²
All contacts disabled

La resta de frases que s'hi llegeixen han d'estar en itàlica, el que vol dir que els paràmetres corresponents estan desactivats.

En segon lloc, a continuació del mot **REGION 1**, que apareix en vermell, s'hi ha de veure en negreta les línies de text següents:

Thickness: 1 μm
Material from si.mat
Carrier mobilities from internal model
Dielectric constant: 11.9
Band gap: 1.124 eV
Intrinsic conc. at 300K: $1 \times 10^{+010} \text{cm}^{-3}$
Refractive index from si.inr
Absorption coeff. From si300.abs
Free carrier absorption enabled
N-type background doping: $1 \times 10^{+015} \text{cm}^{-3}$
Bulk recombination: $\tau_n=1000\mu\text{s}$, $\tau_p=10\mu\text{s}$
Front-surface recom.: S model, $S_n=S_p=1 \text{cm/s}$
Rear-surface recom.: S model, $S_n=S_p=1 \times 10^{+006} \text{cm/s}$

La resta de frases que s'hi llegeixen han d'estar en itàlica, el que vol dir que estan desactivats els paràmetres corresponents.

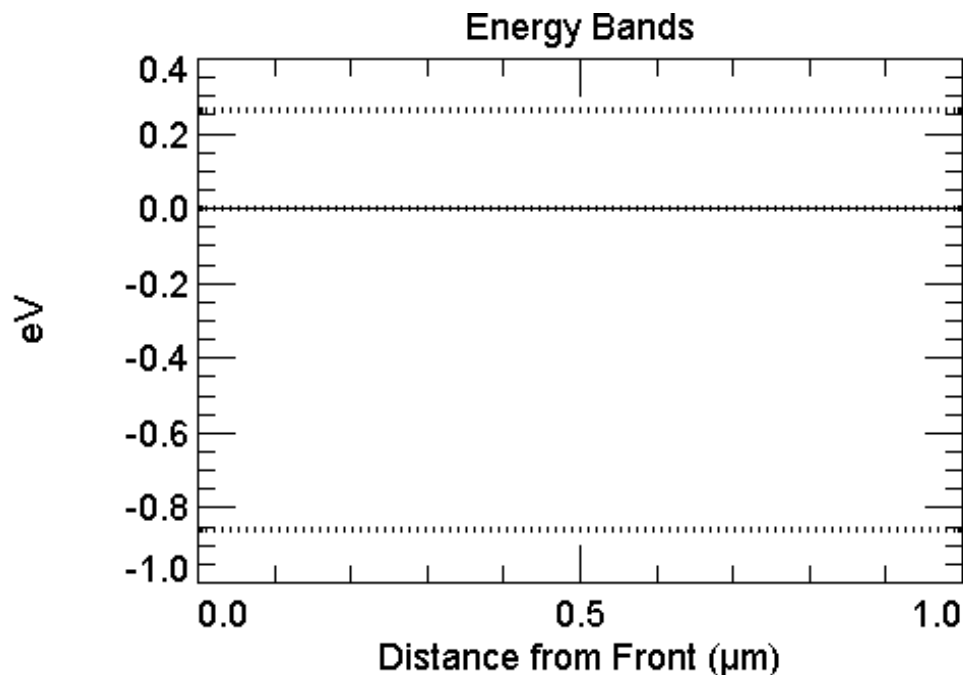
Verificació dels valors dels paràmetres de l'excitació a la qual se sotmet l'estructura

En tercer lloc, a continuació del mot **EXCITATION**, que apareix en vermell, s'hi ha de poder llegir el text següent:

Excitation mode: Equilibrium
Temperature: 300 K

En quart lloc, i en el menú principal del programa, es tria **Compute** i es verifica que els paràmetres que determinen el procés de convergència siguin els per defecte i que el mode **Batch** estigui inactiu. Fet això s'executa el programa triant l'opció **Run**.

Per visualitzar els resultats de la simulació, es tria, en el menú principal del programa, **View**, i a continuació **4 Graphs**, amb la qual cosa apareixen 4 gràfiques a la pantalla. Aquí fornim la del diagrama de bandes, corresponent a un semiconductor tipus N. La gràfica corresponent a la densitat de càrrega indica un valor d'aquesta molt més petit que la corresponent a la d'un electró en el volum considerat, la qual cosa es correspon, dintre dels límits del simulador, a una càrrega nul·la.



Simulacions S2, S3 i S4 a l'estat d'equilibri amb un escombrat del valor de la càrrega superficial Q_s : *proper de Banda Plana, Depleció i Inversió.*

Es manté el mateix arxiu que a la simulació anterior.

Verificació dels valors dels paràmetres que caracteritzen l'estructura a simular

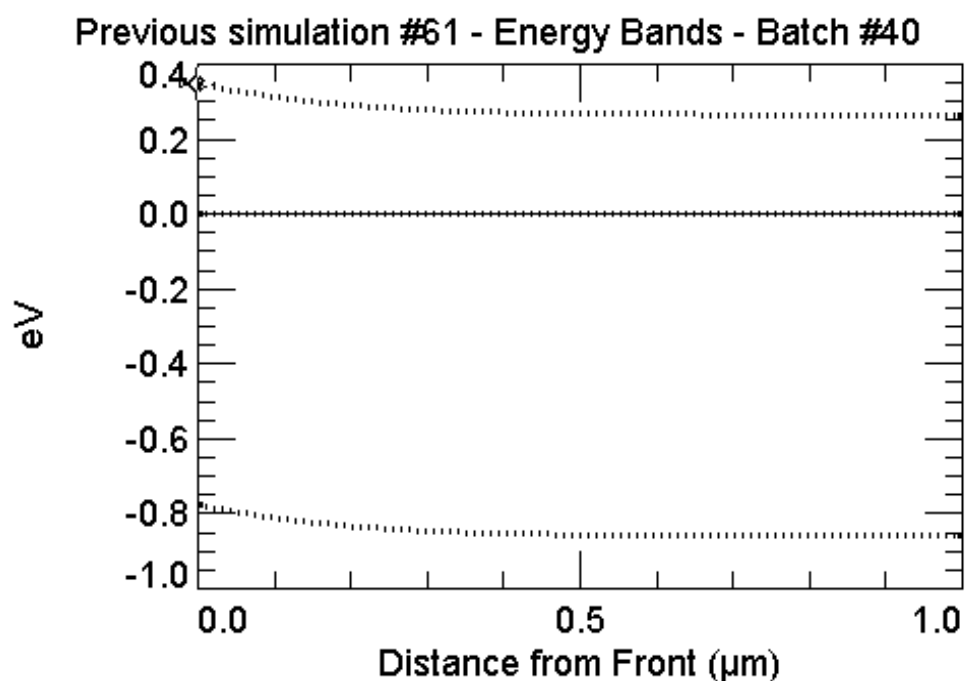
Es mantenen els mateixos valors que els de l'arxiu de la simulació anterior

Verificació dels valors dels paràmetres de l'excitació a la qual se sotmet l'estructura

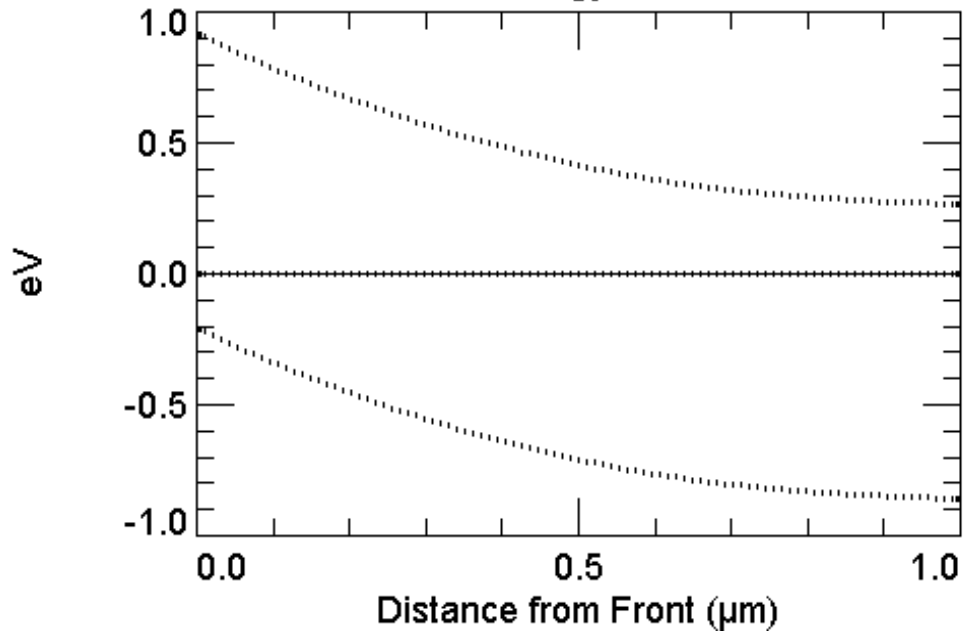
Es mantenen els mateixos valors que els de l'arxiu de la simulació anterior. A continuació, i en el menú principal del programa, es tria **Compute** i es verifica que els paràmetres que determinen el procés de convergència siguin els per defecte i que el mode **Batch** estigui actiu. S'empra el mode de càlcul anomenat **Quick Batch** i es fa un escombrat pels següents valors de la càrrega superficial frontal Q_s (FrCharge)

Simulació	Q_s inicial (cm^{-2})	Q_s final (cm^{-2})	Nombre d'etapes	Estat
S2	+1.e-10	-1.e-10	100	<i>Proper de Banda plana</i>
S3	-1.e-10	-7.e+10	100	Depleció
S4	-7.e+10	-2.e+11	100	Inversió

A continuació, i en el menú principal del programa, es tria **View** i **Interactive Graph**. Situat ja en aquesta opció es tria, en el menú principal, **Graph**, i dins del menú desplegable la magnitud que interressi estudiar, en aquest cas el diagrama de bandes, una magnitud espacial (**Spatial**) i cal seleccionar a continuació **Energy Band**. Fet això s'executa el programa triant l'opció **Run**, i a continuació s'observa l'evolució del diagrama de bandes recorrent les 100 etapes o estats intermitjos, pels quals ha passat el simulador, amb les tecles PgUp i PgDown. Aquí en fornim dues, corresponents a S3 (núm. 40) i S4 (núm. 30), respectivament.

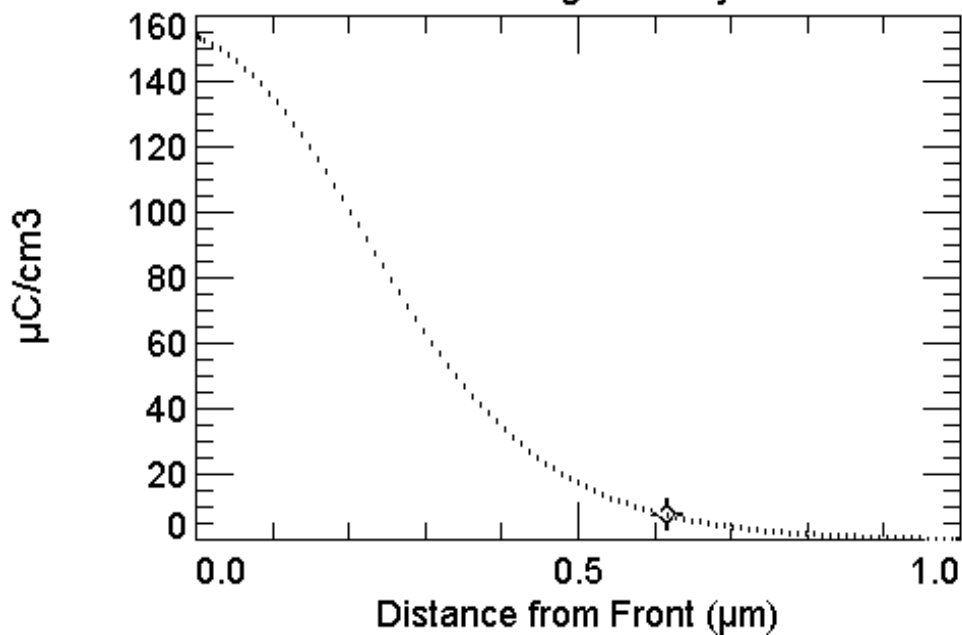


Previous simulation #71 - Energy Bands - Batch #30

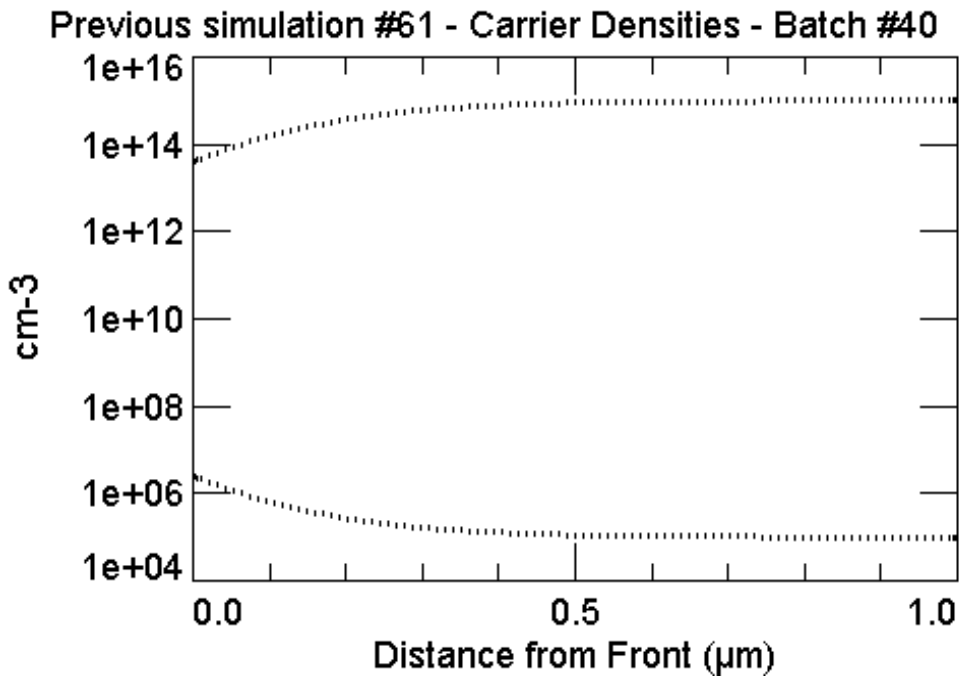


Procediríem de la mateixa manera per veure com varien la resta de magnituds, fent atenció a l'hora d'escollir l'escala i el nombre de magnituds representades en una mateixa figura. Per veure com varia, per exemple, la concentració de forats i la d'electrons per separat caldria que a l'hora d'escollir la gràfica, en el menú principal **Graph**, escollíssim **Defined** i a continuació la variable desitjada, en aquest cas **Electron Density** o **Hole Density**, amb escala linial o logarítmica. Aquí fornim a tall de comprovació la de la densitat de càrrega i la de la concentració de portadors, tan d'S3 (núm. 40) com d'S4 (núm.30).

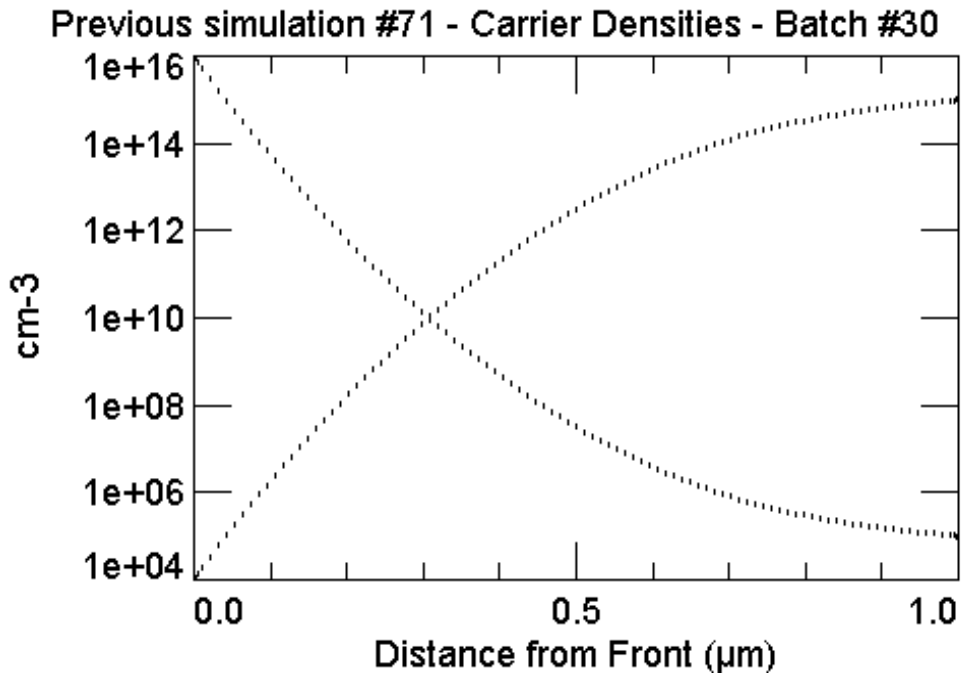
Previous simulation #61 - Charge Density - Batch #40



Observeu com la zona de càrrega d'espai que s'ha creat, zona on hi falten electrons, s'extén des de la interfície òxid-semiconductor cap a l'interior del substrat. Fixeu-vos també com la concentració de forats a la superfície és inferior a la del bulk.



Observeu a la gràfica de la concentració de portadors com es produeix una inversió de la població de portadors a la superfície.

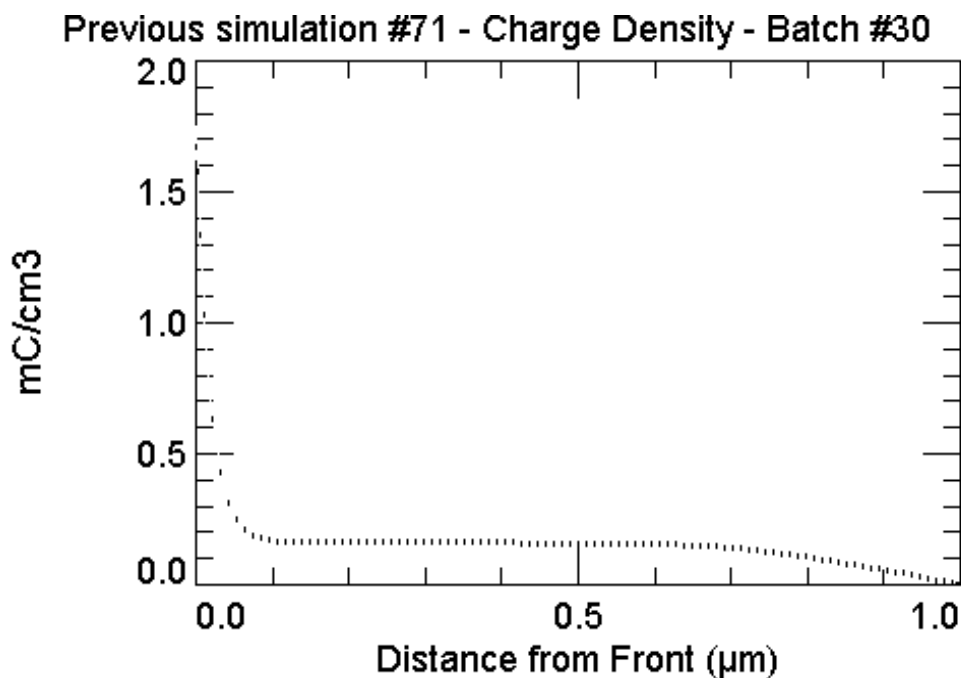


Fixeu-vos a la següent gràfica, la de la densitat de càrrega en forta inversió, com l'amplada de la zona de càrrega d'espai ha crescut considerablement i abasta més cap a

l'interior del substrat. Se sol distingir entre inversió feble i forta inversió. La inversió feble, just després de formar-se el canal, s'assoleix en aplicar a la tensió de porta la tensió llindar, que provoca una concentració de forats a la interfície igual a la concentració d'electrons del bulk (d'aquí el mot inversió). Durant la forta inversió, assolida per tensions de porta superiors en valor absolut a la tensió llindar, l'amplada de la zona de càrrega assolix el màxim valor. Mesurem l'amplada màxima de la zona de càrrega, i comprovem que el valor mesurat es correspon al valor teòric obtingut a partir de l'expressió següent.

$$x_d = \sqrt{\frac{4\epsilon k T \ln \frac{N_D}{n_i}}{q^2 N_D}}$$

on ϵ és la constant dielèctrica del substrat, k és la constant de Boltzmann, q la càrrega elèctrica de l'electró, T la temperatura, n_i la concentració intrínseca, i N_D la concentració d'impureses donadores del substrat



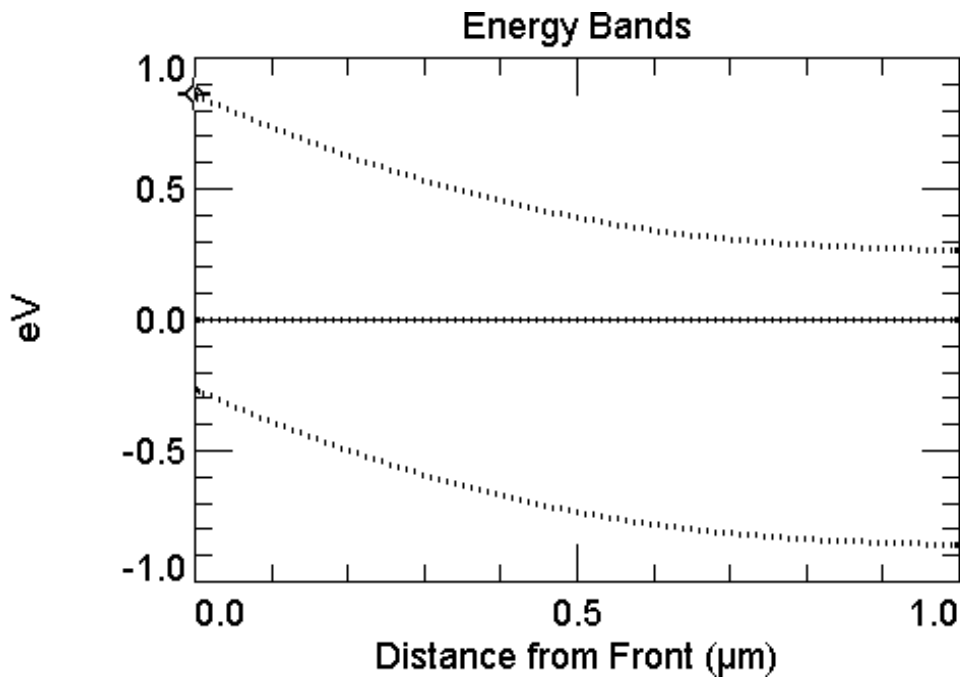
Per veure com varia el potencial electrostàtic o qualsevol altra magnitud, repetir les anteriors simulacions mantenint en pantalla la gràfica corresponent, per després resseguir cada etapa amb les tecles PgUp i PgDn.

S5. Simulacions a l'estat d'equilibri amb una Q_s fixa i un escombrat del dopat N_B del substrat

Es manté el mateix arxiu que a la simulació anterior.

Verificació dels valors dels paràmetres que caracteritzen l'estructura a simular

Es mantenen els mateixos valors que els de l'arxiu de la simulació anterior, amb una $Q_s = -8.8358 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$, corresponent al llindar d'inversió. Fixar-se amb l'esquema de la finestra View Parameters, on queda representada aquesta Q_s . Fornim aquí, a tall de comprovació, el diagrama de bandes pel llindar d'inversió. El valor de la concentració de forats a la superfície coincideix amb el de la concentració d'electrons al bulk.

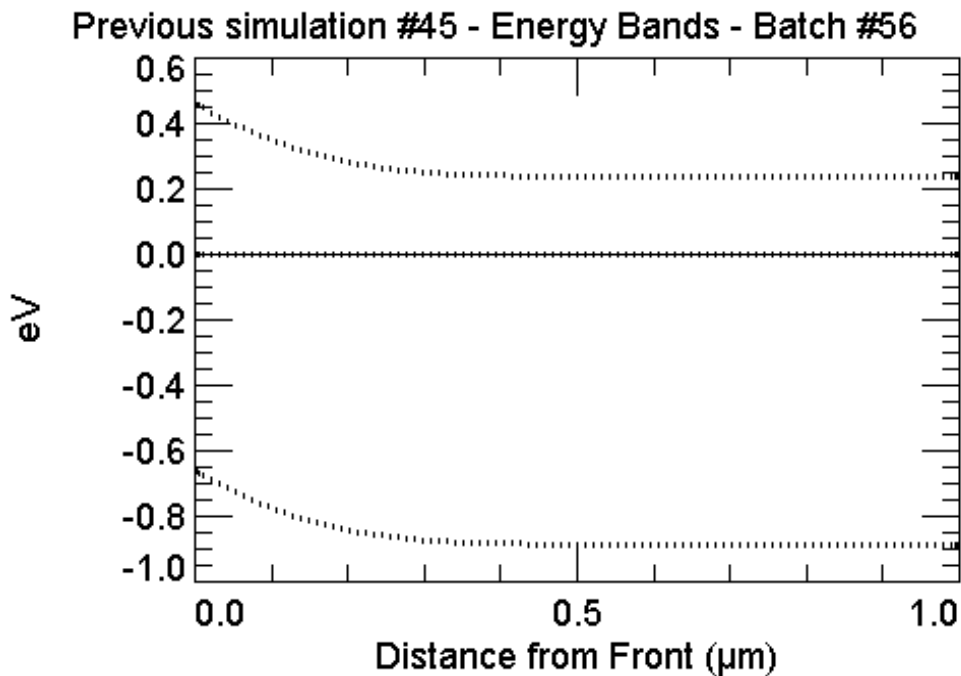


Verificació dels valors dels paràmetres de l'excitació a la qual se sotmet l'estructura

Es mantenen els mateixos valors que els de l'arxiu de la simulació anterior. A continuació, i en el menú principal del programa, es tria **Compute** i es verifica que els paràmetres que determinen el procés de convergència siguin els per defecte i que el mode **Batch** estigui actiu. S'empra el mode de càlcul anomenat **Quick Batch** i es fa un escombrat pels següents valors del dopat N_B del substrat (BkgndDop).

Simulació	N_B inicial (cm^{-3})	N_B final (cm^{-3})	Nombre d'etapes	Estat
S5	5×10^{14}	5×10^{15}	100	<i>Proper al Llindar d'inversió</i>

S'observa la dependència del llindar d'inversió amb el valor del dopat del substrat. Aquí fornim a tall de comprovació el diagrama de bandes corresponent a una concentració de $3 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$, on es comprova que no s'ha assolit encara el llindar d'inversió.



4.3 Qüestions pràctiques relatives a l'estructura MOS simulada

Es proposa a continuació que l'estudiant resolgui de la manera que cregui més convenient les qüestions següents fent ús del simulador. Es proposa també, que compari els resultats que obtingui amb els que prediu la teoria i indiqui l'origen de les diferències si s'escau.

TREBALL PRÀCTIC:

a) Resoldre les qüestions pràctiques de l'apartat 4.3

b) Presentar una memòria amb els resultats i la seva obtenció

Q1. Estudiar la conductivitat a 10nm de profunditat de la interfície. Per realitzar l'esmentat estudi es repeteix la simulació S4 corresponent a l'estat d'inversió en el mateix mode de càlcul (**Quick Batch**) però havent triat la gràfica corresponent a la conductivitat (**Graph**→ **Defined**). S'observa que el valor d'aquesta magnitud varia considerablement prop de la interfície. Per tal d'obtenir una representació més acurada d'aquesta variació es tria el mode de càlcul **Batch** normal i s'escolleix un arxiu semblant a l'arxiu anomenat batchmoscond.txt, que conté una columna on hi ha onze valors de la càrrega superficial. L'encapçalament de la segona columna correspon al resultat: la conductivitat a 10nm de profunditat. Es realitza la simulació i els resultats es copien sobre un full de càlcul, on es representen i s'estudien.

Q2. Passar d'una estructura PMOS a una NMOS, i.e. canviar el tipus de semiconductor de N a P. Repetir la simulació S4, amb valors de la FrCharge adequats, p.e. $7 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$ i $1.2 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ i comparar la conductivitat d'un canal N versus la d'un canal P.

Q3. Estudiar l'efecte de la tensió de substrat. Començar per habilitar el contacte de base i posar una tensió de 2 V al substrat, mitjançant aquest contacte. Per quin valor de la tensió de porta s'assolirà ara el llindar d'inversió? Es forneix l'arxiu subs.text en el que hi ha valors de tensió compresos entre -2V i 2V . Fer una simulació en mode Batch observant el diagrama de bandes i mantenint constant el valor de la càrrega superficial $Q_s = -8.8358 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$.

Q4. Estudiar l'efecte d'una càrrega implantada. Fer una difusió frontal uniforme de tipus N de valor 10^{16}cm^{-3} i profunditat $0.05 \mu\text{m}$. Repetir la simulació S2 i calcular el valor de la tensió de banda plana d'aquesta nova estructura MOS.

Q5. Estudi de l'estat d'acumulació. Representa el diagrama de bandes corresponent a l'estructura MOS simulada a l'apartat 4.2 en el cas que la càrrega Q_s fos de 10^{10}cm^{-2} . Quant val la concentració d'electrons a 5nm de la superfície del semiconductor?

Q6. Estudia com afecta el llindar d'inversió les variacions de temperatura a l'interval (200K,400K). Realitza una simulació en mode batch, per alguns valors de temperatura, i observa el diagrama de bandes, mantenint constant el valor de la càrrega superficial $Q_s = -8.8358 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$. A continuació calcula l'increment de càrrega Q_s necessari per aconseguir una conductivitat igual quan la temperatura baixa 25 graus, i passa de valer 300K a valer 275K. Realitza ara una simulació en mode batch, per alguns valors de Q_s mantenint $T=275\text{K}$.