

# Afectación de las cargas de la región cuasineutral en un semiconductor sobre el potencial y campo eléctrico

José Carlos León Ortega. Instituto Central de Investigación Digital (ICID)

## RESUMEN

---

En el presente trabajo se analiza la influencia de los portadores mayoritarios en la región cuasineutral en un semiconductor sobre el potencial y campo eléctrico, así como los efectos que se producen en la característica C-V de un dispositivo MOS y en su condición de Banda Plana.

Se obtienen ecuaciones útiles para el comportamiento del potencial y campo eléctrico con la coordenada para un perfil de impurezas gaussiano, que pueden ser usadas para el cálculo de otros parámetros.

Se muestran de forma gráfica los valores calculados del potencial y campo eléctrico mediante un programa de computación, empleando una computadora personal.

## ABSTRACT

---

The influence of majority carrier concentration in the cuasineutral region of a semiconductor on the potential and electric field, and the effect that they produce on the C-V characteristic of an MOS device and its Flat Band condition are analyzed.

Useful equations for the calculation of the potential and electric field for a gaussian impurity profile are obtained, which can be used to calculate other parameters.

Potential and electric field calculations carried out with a personal computer are presented graphically.

## INTRODUCCIÓN

---

Cuando se aplica un potencial a un capacitor MOS tal que se empobrezca el semiconductor de mayoritarios, si se tiene en cuenta la aproximación de empobrecimiento /1/, se pueden distinguir dos regiones en el volumen de éste, que están separadas por el borde de la zona de carga espacial. Si se dice que el borde de esta región de carga espacial se encuentra a una distancia  $w$  de la superficie del semiconductor, se pueden establecer las regiones antes mencionadas:

- Región correspondiente a la zona de carga espacial, donde no existen portadores mayoritarios ( $0 \leq x \leq w$ ).
- Región cuasineutral ( $w < x$ )

Es muy común encontrar trabajos donde se considera que en la región cuasineutral existe total neutralidad eléctrica, e incluso muchos autores la llaman región "neutral". Sin embargo, esta aproximación o suposición puede provocar errores de consideración en el cálculo de determinada magnitud física relacionados con la estructura, como son el potencial superficial, etcétera.

En el presente trabajo se hace un estudio de la distribución de cargas eléctricas en el semiconductor cuando se aplica un potencial externo, y se muestra el efecto de las cargas de la región cuasineutral sobre la distribución de potencial y potencial superficial, así como sobre el campo eléctrico en el semiconductor. Se interpretan cada uno de los términos de las expresiones obtenidas y se deducen expresiones explícitas para el caso particular de una distribución de impurezas del tipo gaussiana. Se muestra además el efecto de estas cargas en la característica C-V del dispositivo, especialmente de un capacitor MOS.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

---

Cuando se aplica un potencial externo a un semiconductor, el borde de la zona de carga espacial no queda bien definida, pues la distribución de portadores mayoritarios necesita de algunas longitudes de Debye para hacerse igual a la distribución de equilibrio en la vecindad de dicho borde /2,3/. Esto hace que en la región  $x > w$  exista una cierta carga eléctrica, incluso para distribuciones de impurezas homogéneas /4/. Ignorar esta situación es equivalente a suponer cero a la longitud de Debye /5/.

Si además, en el semiconductor existe una distribución de impurezas no homogénea, la distribución de portadores mayoritarios no coincide con esta /6-7/. Tal situación se muestra en la figura 1 para un perfil de impurezas

arbitrario. Al aplicar un potencial externo esta distribución cambia de forma muy similar a la mostrada en la figura 2.

Estos dos fenómenos contribuyen a la carga de la región para  $x > w$ . Sin embargo, en este trabajo se supondrá la aproximación de empobrecimiento para los portadores mayoritarios, por lo que se despreciará el aporte a la carga debido al primer fenómeno anteriormente señalado.

El problema planteado consiste en obtener las distribuciones de potencial y campo eléctrico en el semiconductor, teniendo en cuenta que en la región donde  $x > w$  no existe neutralidad eléctrica, y compararla con las distribuciones de estas magnitudes, considerando total neutralidad en dicha región a fin de poder comprobar si la diferencia es significativa.

## NOTACIÓN

$W$  -ancho de la zona de carga espacial

$p(x)$  -distribución de portadores mayoritarios

$p_0(x)$  -distribución de portadores mayoritarios en equilibrio

$N_a(x)$  -distribución de impurezas

$N_B$  -concentrac. de impurezas más pequeñas en el semiconductor

$N_O$  -concentrac. de impurezas más alta en el semiconductor

$\psi(x,w); E(x,w)$  -potencial y campo eléctrico respectivamente

$\psi_s(w); E_s(w)$  -potencial y campo eléct. superficial respect.

$\psi_{dif}(x); E_{dif}(x)$  -potencial y campo eléctrico de difusión

$x; \sigma$  -posición del máximo y desviación standart de una distribución gaussiana

$\epsilon_s; q$  -constante dieléctrica del semiconductor y carga del electrón

$V_T = KT/q$  -potencial térmico

$\rho(x)$  -densidad de carga espacial

## SOLUCIÓN DE EC. DE POISSON. INTERPRETACIÓN DE SUS TÉRMINOS

Si para un semiconductor tipo P se resuelve la ecuación de Poisson, teniendo en cuenta que:

$$p(x) = 0 \quad x < w$$

$$p(x) = p_0(x) \quad x > w$$

la solución es del tipo /8/:

$$\psi(x,w) = q/\epsilon_s \int_0^x \int_0^x N_a(x') dx' dx + x \frac{d}{dx} [\psi(x,w)]_{x=0} + \psi_s(w) \quad (1)$$

para  $0 \leq x \leq w$ .

Si se considera que la densidad de carga eléctrica en todo el semiconductor es:

$$\rho(x) = \begin{cases} q Na(x) & 0 \leq x \leq w \\ q[p(x) - Na(x)] & w < x \end{cases} \quad (2)$$

considerando que  $p_0(x) = Na(x)$  en  $x = w$ , y además si se toma la relación obtenida en /9/ para la diferencia  $N_a - p(x)$ , el valor del potencial  $\psi(x,w)$  calculado en (1) se puede expresar de la siguiente manera:

$$\psi(x,w) = q/\epsilon_s \left\{ \int_0^x \int_0^x Na(x) dx dx - x \int_0^w Na(x) dx + \int_0^w x Na(x) dx \right\} + KT/q \{ (w-x) [1/Na(x) d/dx [Na(x)]]_{x=w} + \ln[N_B/Na(x)]_{x=w} \} \quad (3)$$

donde para la región restante el potencial  $\psi(x,w)$  es precisamente el potencial de difusión del semiconductor:

$$\psi(x,w) = KT/q \ln[p_0(x)/N_B] \quad \text{para } x > w \quad (4)$$

El considerar la presencia del portador mayoritario en la región  $w < x$  introduce en la solución de la ecuación de Poisson (3) los dos últimos términos para la región  $0 \leq x \leq w$ , y la hace diferente de cero para la restante.

Como se observa, el potencial  $\psi(x,w)$  en (3) está representado por tres importantes contribuciones. La primera de ella, dada por los tres primeros términos, representa el aporte al potencial de la distribución de impurezas en el semiconductor  $Na(x)$ . Obsérvese que para el caso de una distribución de impurezas constante, este aporte es cuadrático con  $x$ , que se corresponde con un campo eléctrico lineal.

El segundo aporte está dado por el quinto término. Este, bajo la suposición tomada al inicio de que  $p_0(x) = Na(x)$  para  $x = w$ , representa la influencia del potencial de difusión en la región  $0 \leq x \leq w$ . El potencial de difusión es la caída de voltaje desde  $x = w$  hasta la coordenada donde el semiconductor alcanza la neutralidad, y es un término constante que se suma. Puesto que este potencial es constante, se puede evaluar en cualquier punto del intervalo, tal como en  $x = w$  y el campo eléctrico es siempre nulo.

Resulta evidente de (4) que para el caso de la distribución constante, este potencial es siempre cero.

Por último, el tercer aporte está dado por el cuarto término de la solución. Ahora bien, empleando la expresión para el potencial de difusión  $\psi_{dif}(x)$  análoga a (4) y considerando que  $p_0(x) = Na(x)$  para  $x = w$ , este término se puede transformar de la siguiente manera:

$$\psi_3(x,w) = (w-x) d/dx \{ \psi_{dif}(x) \}_{x=w} \quad (5)$$

quedando finalmente:

$$\psi_3(x,w) = - (w-x) E_{dif}(w) \quad (6)$$

Obsérvese que este potencial es lineal, por lo que representa un campo eléctrico constante. Este campo representa la contribución de las cargas en la zona cuasineutral al campo en la zona empobrecida. Es decir, este campo eléctrico es el de difusión, evaluado en  $x = w$ .

Si se hace un gráfico de los campos eléctricos asociados a cada uno de los términos de la solución de la ecuación de Poisson, con las condiciones vistas anteriormente, se vería fácilmente que este término  $\psi_3(x, w)$  dado en (6) es lo que permite la continuidad al campo eléctrico en la frontera  $x = w$ .

### CASO PARTICULAR DE UNA DISTRIBUCIÓN GAUSSIANA

Para comprender mejor el significado de estos términos anteriormente expuestos se analiza el caso de una distribución del tipo:

$$N_a(x) = N_B + N_0 \text{EXP}[-(x-\bar{x})^2 / (2\sigma^2)] \quad (7)$$

y luego de sustituirla en (3) haciendo  $K_0 = qN_0\sigma^2/\epsilon_s$ ,  $K_B = qN_B/(2\epsilon_s)$ ,  $A = (x-\bar{x})/(\sqrt{2}\sigma)$ ,  $B = (w-\bar{x})/(\sqrt{2}\sigma)$  y  $C = (w-x)/(\sqrt{2}\sigma)$  para simplificar, la solución del potencial será:

$$\begin{aligned} \psi(x, w) = & K_0 \{ \text{EXP}(-A^2) - \text{EXP}(-B^2) - \sqrt{\pi} A [\text{erf} B - \text{erf} A] \} + \\ & + 2K_B \sigma^2 C^2 - KT/q \{ 2CB/[1+2\sigma^2 K_B/K_0 \text{EXP}(B^2)] + \\ & + \ln [1+K_0/(2\sigma^2 K_B) \text{EXP}(-B^2)] \} \quad (8) \end{aligned}$$

para  $0 \leq x \leq w$

$$\psi(x, w) = -KT/q \ln [p_0(x)/N_B] \quad (9)$$

para  $w < x$

En la figura 3 se grafican los términos de (8) para una distribución con  $N_B = 1E15 \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_0 = 1E17 \text{ cm}^{-3}$ ,  $\bar{x} = 0.1 \mu\text{m}$ ,  $\sigma = 0.05 \mu\text{m}$  y  $w = 0.2 \mu\text{m}$ , definiéndose los potenciales  $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4, \psi_5$  con el orden en que aparecen en (8),  $\psi$  como la suma de los tres primeros y  $\psi_I$  como la suma de todos.

Nótese las afectaciones de  $\psi_I$  debido a  $\psi_4$  y  $\psi_5$ , sobre todo en la superficie, donde la influencia de  $\psi_4$  es fundamental, mientras que en  $x = w$  lo resulta la de  $\psi_5$ . Obsérvese que no se cumple que el potencial sea cero en  $x = w$ , como ocurre cuando se considera total neutralidad eléctrica en  $w < x$ .

La solución en la región restante del semiconductor, dada por (9) no resulta fácilmente obtenible, por la presencia de  $P_0(x)$ . Sin embargo, de la ecuación obtenida en /9/ se puede extraer alguna información de las características de esta solución. De esta relación se puede hallar que:

$$\ln P_0(x) = q^2 / (KT\epsilon_s) \int \int_{x'}^x [p(x') - N_a(x')] dx' dx \quad (10)$$

es decir, que la magnitud y signo de  $\ln P_0(x)$  están dados por la diferencia  $p_0(x) - N_a(x)$ , que incluso puede ser cero.

Una simple observación a las distribuciones de las impurezas y de los portadores mayoritarios para un perfil, tal como las mostradas en las figuras 1 y 2, revela que el signo y la magnitud de esta diferencia depende de la relación entre  $w$  y  $\bar{x}$ . Y de hecho, de (8) se puede comprobar que  $\psi_0$  es positivo para  $w > \bar{x}$ , cero para  $w = \bar{x}$  y negativo para  $w < \bar{x}$ . De esta forma queda garantizada la continuidad del campo eléctrico en  $x = w$ . Para  $x \rightarrow \infty$  este potencial tiende a cero.

Si se deriva (8) para hallar la distribución de campo eléctrico, esta queda:

$$E(x,w) = (\sigma K_0 \sqrt{\pi}/2) [\operatorname{erf} B - \operatorname{erf} A] + 2\sqrt{2}\sigma K_B C - (KT/q) (\sqrt{2}/\sigma) B / [1+2\sigma^2 K_B/K_0 \operatorname{EXP}(B^2)] \quad (11)$$

En la figura 4 se representan cada uno de los términos de esta ecuación, y un estimado de la forma que tendría el campo para la región restante, teniendo en cuenta el análisis anterior.

Obsérvese que debido a la presencia del tercer término de (11) que se establece la continuidad en  $x = w$ . Por otra parte, si se evalúa para  $x=0$ , y haciendo  $D=\bar{x}/(\sqrt{2}\sigma)$  y  $E=w/(\sqrt{2}\sigma)$  para simplificar, se obtiene la expresión del campo eléctrico superficial en función de  $w$ , es decir:

$$E_s(w) = (\sigma K_0 \sqrt{\pi}/2) [\operatorname{erf} B + \operatorname{erf} D] + 2\sqrt{2}\sigma K_B E - (KT/q) (\sqrt{2}/\sigma) B / [1+2\sigma^2 K_B/K_0 \operatorname{EXP}(B^2)] \quad (12)$$

En la figura 5 se muestran las formas funcionales de cada término, así como el campo total, considerando la neutralidad eléctrica en el volumen, e ignorando esta.

Un análisis semejante se puede hacer para la carga eléctrica en el semiconductor, a partir de (3) y (8) como caso particular, que por razones de espacio no se hará.

#### AFECCIÓN AL POTENCIAL SUPERFICIAL

Si en (3) y (8) se evalúa para  $x=0$ , se obtiene la expresión para el potencial superficial, que luego de hacer algunas transformaciones queda: /10/

$$\begin{aligned} \psi_s(w) = & -KT/q \{ \sigma^2 E^2 / L_D^2 - K_0 / (2K_B L_D^2) \} [\operatorname{EXP}(-B^2) - \operatorname{EXP}(-D^2)] + \\ & + K_0 D / (2K_B L_D^2) \sqrt{\pi} [\operatorname{erf} B + \operatorname{erf} D] - 2EB / [1+2\sigma^2 K_B / K_0 \operatorname{EXP}(B^2)] - \\ & - \ln [1 + K_0 / (2\sigma^2 K_B) \operatorname{EXP}(-B^2)] \end{aligned} \quad (13)$$

donde  $L_D = \left\{ \epsilon_s K T / (q^2 N_B) \right\}^{\frac{1}{2}}$

Para el caso en que  $\bar{x} = 0$ ; máximo en la superficie, se obtiene como caso particular la expresión obtenida en /11/, y si se desprecia el aporte a la carga de la región cuasineutral, o sea, los dos últimos términos, se obtiene la expresión encontrada en /12/.

Esta ecuación posee dos casos límites interesantes:

1)  $(w - \bar{x})^2 \gg 2 \sigma^2$

$$\psi_s = - \frac{KT}{q} \left\{ \frac{\sigma^2 E^2}{L_D^2} - \frac{K_0}{(2K_B L_D^2)} \text{EXP}(-D^2) + \frac{K_0 D}{(2K_B L_D^2)} \sqrt{\pi} [1 + \text{erf} D] \right\} \quad (14)$$

2)  $w = 0$

$$\psi_s = - \frac{KT}{q} \ln \left[ 1 + \frac{K_0}{(2\sigma^2 K_B)} \text{EXP}(-D^2) \right] \quad (15)$$

Más adelante se verá la importancia de estos casos.

De (13) se pueden definir análogamente los cinco términos vistos anteriormente:  $\psi_{s1}$ ,  $\psi_{s2}$ ,  $\psi_{s3}$ ,  $\psi_{s4}$  y  $\psi_{s5}$ . Sin embargo, cabe destacar que  $\psi_{s4}$  posee tres ceros:  $w = 0$ ,  $w = \bar{x}$  y  $w \rightarrow \infty$ .

En la figura 6 se han graficado los potenciales  $\psi_s$ , que es la suma de  $\psi_{s1}$ ,  $\psi_{s2}$ ,  $\psi_{s3}$  y  $\psi_{s1}$  que son estos tres más  $\psi_{s4}$  y  $\psi_{s5}$ . Obsérvese que incluso para  $w = 0$  existe una diferencia notable entre ambos potenciales. Además cuando  $w \sim 2-3 \bar{x}/L_D$ , ocurre un aumento de  $\psi_{s1}$ , debido al aumento que presenta  $\psi_{s4}$ .

El hecho de que cuando  $w = 0$ ,  $\psi_s \neq 0$ , está dado por el caso límite planteado en (15); sin embargo, cuando  $w$  es grande, se observa que la dependencia es lineal con  $w$  (caso límite en (14)), esto se debe a que prácticamente la distribución gaussiana no aporta al potencial, por estar el borde de la zona de carga espacial muy alejado del máximo de concentración, y el efecto que "siente" es únicamente el de la concentración de substrato  $N_B$ .

## AFECCIÓN AL VOLTAJE DE BANDA PLANA

De lo expresado anteriormente se puede resumir que no se puede establecer una correspondencia entre cero potencial superficial y ancho de la zona de carga espacial igual cero; pues ocurre que para obtener  $\psi_s = 0$ , tiene que existir una  $w \neq 0$ , o lo que es lo mismo,  $w = 0$  sólo se obtiene cuando  $\psi_s = 0$ .

Por el hecho de tratarse de un perfil de impurezas no uniforme, no tiene sentido hablar de la condición de Banda Plana. Pero si se fuera a tomar algún criterio para definir una condición equivalente a ésta, a partir de la definición para un substrato homogéneo, habría siempre que adicionarle al potencial de Banda Plana, el potencial encontrado aquí para cuando  $w = 0$ .

En la ecuación (15) se muestra la expresión de este potencial y en la figura 7 la dependencia de éste con la relación  $N_0/N_B$ , para una  $\bar{x} = 0.1 \mu\text{m}$  y  $\sigma = 0.05 \mu\text{m}$ . Como se observa, su magnitud depende fuertemente de dicha relación. Basta con que esta cantidad sea 10 para que  $\psi_s(0)$  sea el potencial térmico  $V_T$ . Esta magnitud depende además de la posición del máximo  $\bar{x}$  y de  $\sigma$ , para una relación  $N_0/N_B$  dada.

#### AFECCIÓN DE LA CARACTERÍSTICA C-V

---

Al tener en cuenta la no neutralidad de la región  $w < x$  se produce afectación del potencial superficial, como ya se vio. Esto hace que la característica C-V teórica obtenida para el capacitor MOS tomando este potencial superficial como real, difiere de la que se obtiene si se ignoran las cargas en dicha región.

Para comprobar lo anterior se computó dicha característica para un MOS en un semiconductor tipo P, con un perfil de impurezas del tipo (7), y con los mismos valores de  $\bar{x}$ ,  $N_0$ ,  $N_B$  y  $\sigma$  usados anteriormente.

En la figura 8 se han graficado estas curvas cuando se tiene en cuenta la no coincidencia de la distribución de los portadores mayoritarios con la de impurezas y cuando esto es ignorado. Obsérvese que en el primer caso la condición de Banda Plana ( $C/C_0=1$ ) se alcanza para un potencial aplicado negativo, mientras que en el segundo ocurre para cero.

En la medida en que la relación  $N_0/N_B$  sea mayor, la diferencia entre ambas curvas es más notable.

Todos los cálculos se realizaron mediante programas confeccionados al efecto de una computadora personal modelo NEC PC 8801.

#### CONCLUSIONES

---

En el trabajo se interpretan cada uno de los términos de las expresiones del potencial  $\psi(s,w)$  en un semiconductor, para una distribución de impurezas no uniforme y considerando la no neutralidad en el volumen de este.

Se obtuvieron expresiones del potencial y campo eléctrico para el caso de perfiles de impurezas del tipo gaussiano, que son los que más abundan en la práctica, por lo que dichas ecuaciones resultan útiles para realizar otros cálculos.

La afectación del potencial y el campo eléctrico debido a la consideración de las cargas de la región cuasineutral son significativas, sobre todo si se usan en la práctica estas magnitudes para encontrar otras, como es la condición de Banda Plana.



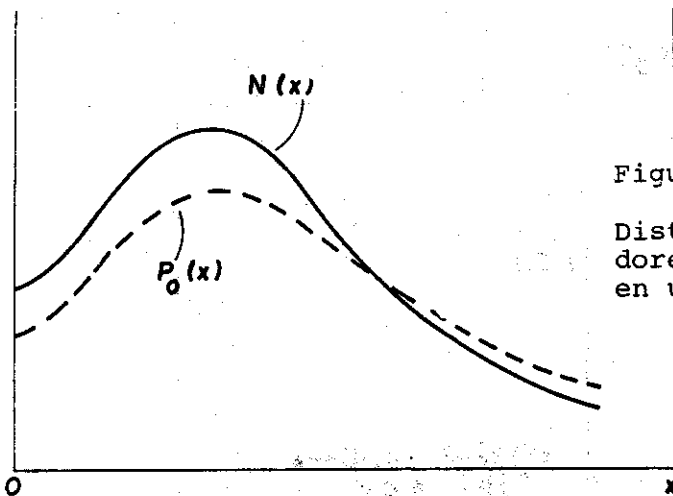


Figura 1.

Distribuciones de impurezas  $N(x)$  y portadores mayoritarios en equilibrio  $p_0(x)$  en un semiconductor.

Figura 2.

Distribución real de portadores mayoritarios  $p(x)$  al aplicar un potencial a la estructura tal que empobrezca al semiconductor.

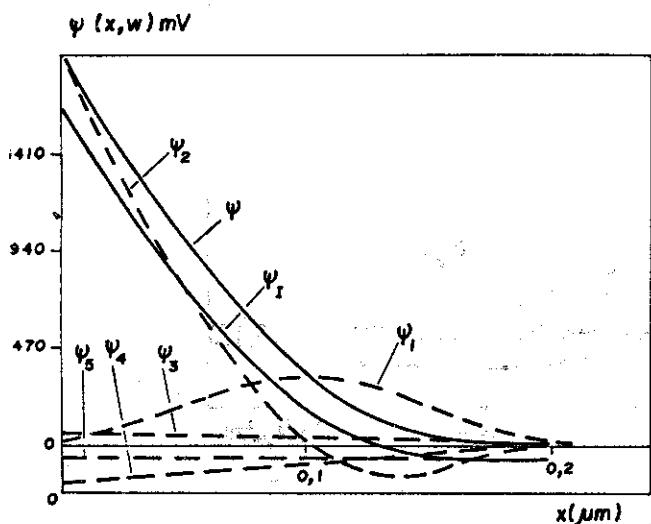
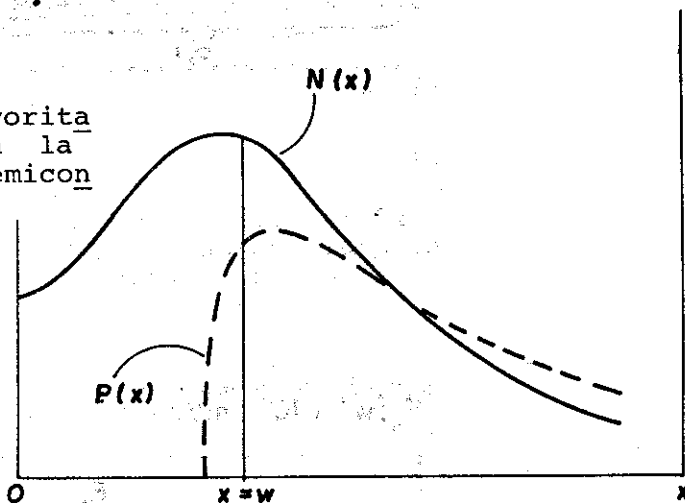


Figura 3.

Distribución de potencial eléctrico considerando total neutralidad en el volumen del semiconductor;  $\psi$  y considerando las cargas en dicha región,  $\psi_I$

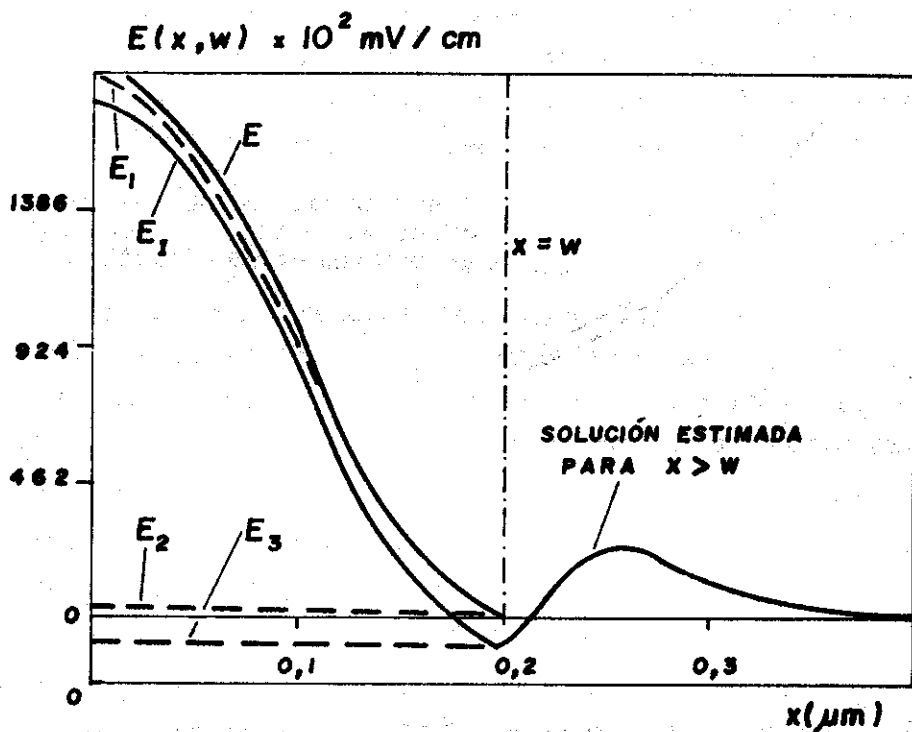


Figura 4.

Distribución del potencial eléctrico para ambas situaciones en la región  $0 \leq x \leq w$  y el estimado para la región restante según la ecuación (10).

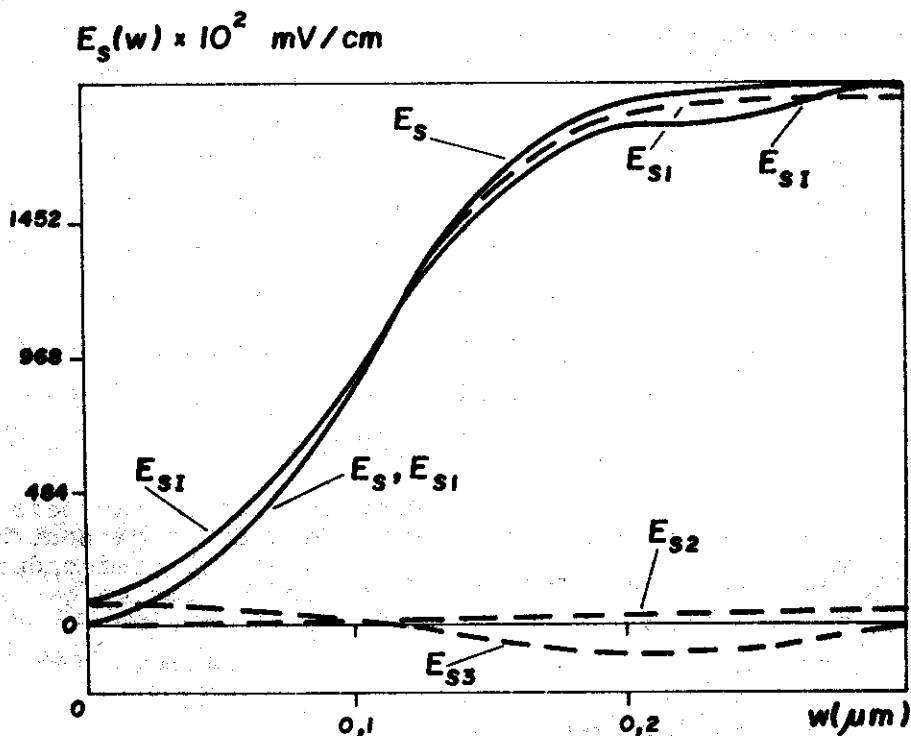


Figura 5.

Campo eléctrico superficial. Nótese la diferencia entre  $E_s$  (total neutralidad en el volumen) y  $E_{s1}$  (considerando las cargas en la región  $x > w$ ).

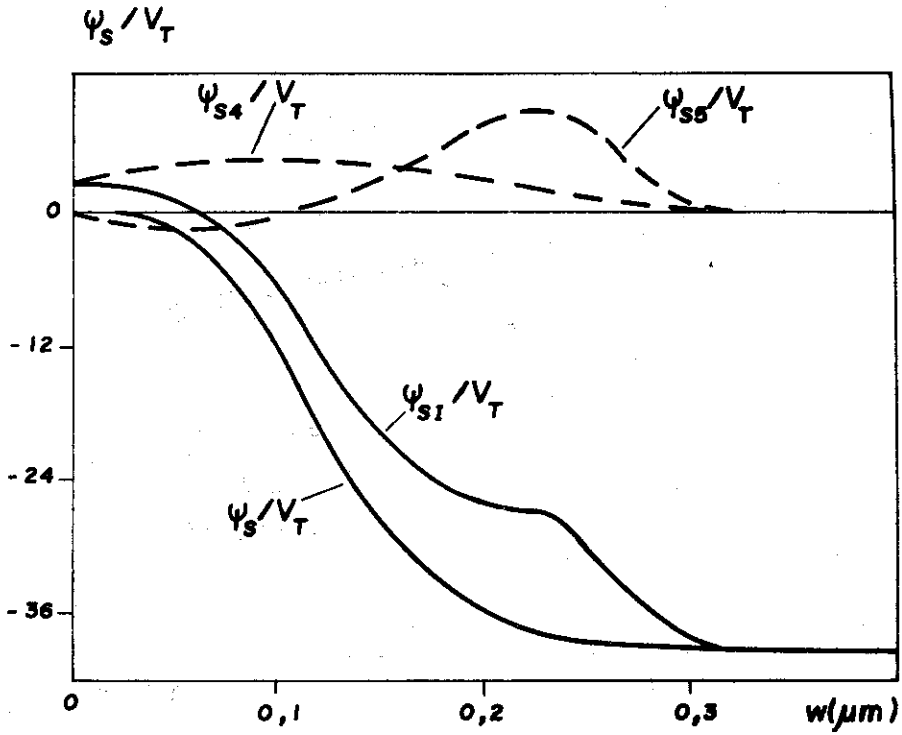


Figura 6.

Potencial eléctrico superficial para las dos situaciones. Nótese la afectación de los términos  $\psi_{s4}/V_T$  y  $\psi_{s5}/V_T$  sobre  $\psi_s/V_T$  para dar  $\psi_{sI}/V_T$ .

$$\psi_s/V_T \text{ ec(15)}$$

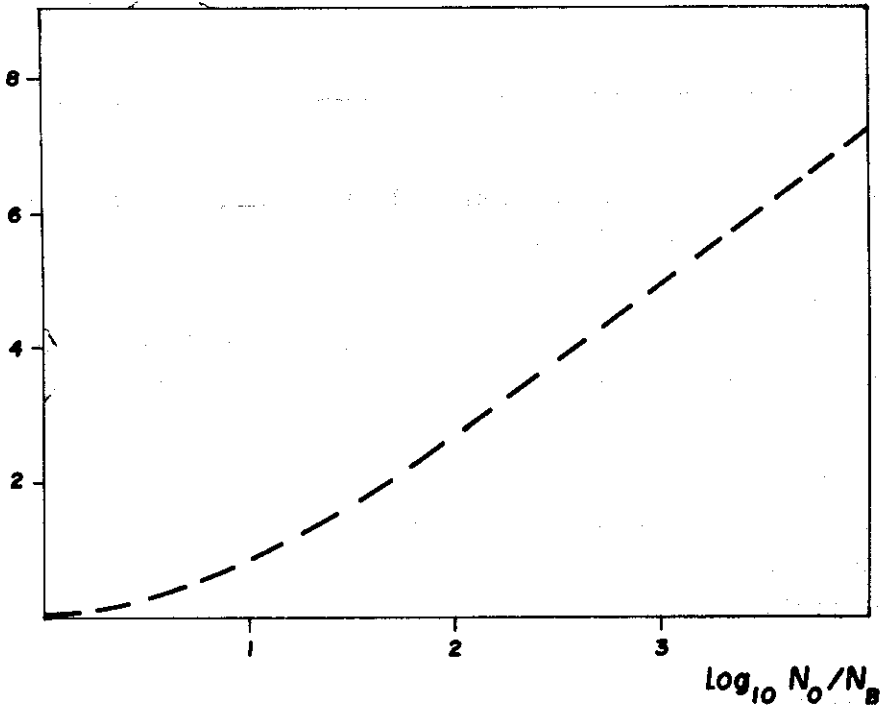


Figura 7.

Dependencia del potencial superficial para el caso de  $\omega = \emptyset$  en función de la relación  $N_0/N_B$ .

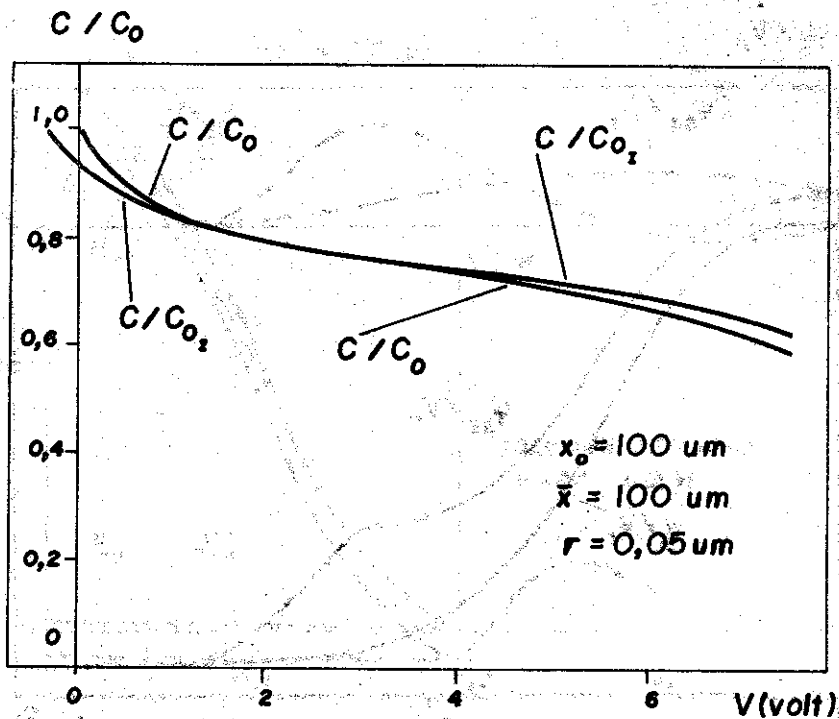


Figura 8.

Comparación entre las curvas C-V teóricas de un MOS con espesor de óxido  $x_0$  de 100 nm considerando las cargas en el volumen del semiconductor  $(C/C_0)_I$  e ignorando estas  $(C/C_0)$ .

#### BIBLIOGRAFÍA

/1/ Grove, A.S.

"Physic and technology of semiconductor devices" John Wiley & Sons, Inc. 1967, New York.

/2/ Ziegler, K.; E. Klausmman and S.Kar

"Determination of the semiconductor doping profile right up to its surface using the MIS capacitor" Solid St. Elect. Vol. 18, p. 189 (1975).

/3/ Walter, C.J. and P.T.Panousis

"The influence of Debye Length on the C-V measurement of doping profiler" IEEE Trans. on Elect. Devices. ED-18, No.10, p. 965, octubre (1971).

/4/ Nishida, M.

"Depletion approximation analysis of the differential C-V characteristic of an MOS structure with non uniformly doped semiconductor" IEEE Trans. on Elect. Devices. ED-26, No.7, p. 1081, julio (1979).

- /5/ Baccarani, G. and M.Rudan  
"Interpretation of C-V measurements for determining the doping profile in semiconductor" Solid St. Elect. vol.23, p. 65 (1980).
- /6/ Kennedy, D.P., P.C.Murley and W.Kleinfelder  
"On the measurement of impurity atom distributions in silicon by differential capacitance technique" IBM J. Res. Develop 12, p. 399 (1968).
- /7/ Shi-Tron, L. and J.Reuter  
"The complete doping profile using MOS C-V technique" Solid St. Elect., Vol. 26, No.4, p. 343 (1983) Apéndice B.
- /8/ Comunicación privada.
- /9/ Kennedy, D.P. and R.R.O'Brien  
"On the measurement of impurity atom distributions by the differential capacitance technique" IBM J. Res. Develop. 13, p. 212 (1969).
- /10/ Ortega, J.C.L.  
"Programa para la determinación de perfiles de impurezas en un semiconductor" Tesis de especialidad, ISPJAE, febrero (1985).
- /11/ Calviño. M.H.  
"Cime-51 y la simulación de circuitos digitales con transistores MOS implantados" Ingeniería-Autom. y Telec.
- /12/ Cerdeira, A.A. y M.H.Calviño  
"Sobre la determinación del  $V_T$  de transistores MOS implantados" II Simposio de la Sociedad Cubana de Física. C. Habana (1983).

Recibido: 10 de septiembre de 1985.