REVISTA CUBANA DE FÍSICA Vol. VIII, No. 2, 1988

# Efecto de la no neutralidad del volumen en el $V_T$ de los transistores Mos implantados

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

RESUMEN

En el presente trabajo se analiza la influencia de la no neutralidad del volumen de un semiconductor, en el voltaje umbral $V_T$ de los transistores MOS implantados. Considerando este efecto se proponen expresiones analíticas para el cálculo de la dosis necesaria a implantar para obtener un $V_T$ dado.

Se comparan los resultados obtenidos en el cálculo del $V_T$ empleando las expresiones propuestas con los de otro modelo que considera neutralidad del volumen del semiconductor.

ABSTRACT

In the present work the influence of the non-neutrality condition in the semiconductor bulk, on the threshold voltaje ($V_T$) in MOS implant transistors is analyzed. Considering the effect analytical expressions for calculating the implant dosis in order to obtain a given value of $V_T$, are proposed.

The results of the $V_T$ calculations employing these expression are compared

with those obtained with other model, which considers the total neutrality in the semiconductors bulk.

NOTACIÓN

W - anchura de la zona de carga espacial.
Ws - anchura de la aproximación rectangular.
No - concentración de impurezas más alta en el semiconductor.
$N_B$ - concentración de impurezas más baja en el semiconductor.
$N_A$ - concentración de impurezas de la aproximación rectangular.
Po(x) - distribución de portadores mayoritarios en equilibrio.
P(x) - distribución de portadores mayoritarios para un potencial superficial diferente de cero.
$\psi(x)$ - potencial eléctrico.
$\psi s$ - potencial eléctrico superficial.
$\bar{x}, \sigma$ - posición del máximo y desviación standart de una distribución gaussiana.
$\varepsilon s$, q - constante dieléctrica del semiconductor y carga del electrón.
$\psi so$ - potencial eléctrico superficial de inversión.
$V_{BS}$ - potencial eléctrico entre source y substrato.
$V_{FB}$ - potencial eléctrico de banda plana.
Co - capacidad del óxido de compuerta por unidad de área.
K,T - constante de Boltzman y temperatura.
ni - concentración intrínseca del semiconductor.
Di,Do - dosis inicial y total.
Xj - profundidad de juntura.

## I N T R O D U C C I Ó N

El ajuste del voltaje umbral $V_T$ en transistores MOS mediante la implantación iónica es una técnica muy empleada hoy en día.

El problema consiste en calcular qué dosis es necesaria implantar para obtener un $V_T$ dado.

Obtener ecuaciones para este fin, exige la solución de la ecuación de Poisson, la cual es resuelta bajo ciertas aproximaciones para simplificar el problema. Una de estas aproximaciones, que usualmente se toma, es considerar total neutralidad eléctrica en el volumen del semiconductor, y suponer la aproximación de empobrecimiento para los portadores mayoritarios.

En este trabajo se investiga qué diferencia existe entre los parámetros de la implantación para el reajuste de un $V_T$, obtenido suponiendo total neutralidad eléctrica en el volumen, con aproximación de empobrecimiento para los portadores mayoritarios, y obtenido teniendo en cuenta las cargas en el volumen más el efecto de la difusión de los portadores en la zona cercana al borde de la zona de carga espacial.

## SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DE POISSON

Resolviendo la ecuación de Poisson para un semiconductor tipo P, considerando las cargas en la región "cuasineutral" (x > w) y teniendo en cuenta la difusión de los portadores mayoritarios desde esta región hacia la zona empobrecida, la solución es del tipo:

$$\psi(x) = \frac{q}{\varepsilon s} \left\{ \int_0^x \int_0^v N(t)\,dt\,dv - x \int_0^w N(t)\,dt + \int_0^w t\,N(t)\,dt \right\}$$

$$+ \frac{KT}{q} (w-x) \frac{1}{Po(w)} \left.\frac{dPo(x)}{dx}\right|_w + \frac{KT}{q} (w-x) \frac{1}{P(w)} \left.\frac{dP(x)}{dx}\right|_w$$

$$+ \frac{KT}{q} \ln \frac{N_B}{Po(w)} \qquad (1)$$

donde $N_B = Po(x)$ para $x \to \infty$.

En la figura 1 se muestran las distribuciones de P(x) y Po(x) para una situación dada y una N(x) determinada.

Las condiciones de frontera para la obtención de (1) están dadas en /1/, así como la interpretación física de cada uno de sus términos.

Si se hubiesen ignorado las cargas en el volumen del semiconductor, tomando aproximación de empobrecimiento para los mayoritarios, la solución hubiera sido las tres integrales de la ecuación (1).

La dependencia de Po(x) con N(x) es:

$$Po(x) = N(x) \left\{ 1 + \left(\frac{L(x)}{N(x)}\right)^2 \left[ N(x) \frac{d^2N(x)}{dx^2} - \left(\frac{dN(x)}{dx}\right)^2 \right] \right\} \qquad (2)$$

donde

$$L(x) = \left(\frac{\varepsilon s\ KT}{q^2\ N(x)}\right)^{\frac{1}{2}}$$

La solución encontrada en (1) presenta la dificultad del término:

$$\frac{KT}{q} (w-x) \frac{1}{P(w)} \left.\frac{dP(x)}{dx}\right|_w$$

ya que P(x) depende del potencial $\psi(x)$ de la forma:

$$P(x) = Po(x) \exp\left(-\frac{q}{KT}\psi(x)\right)$$

por lo que no es posible, por un proceso iterativo hallar la derivada

$\frac{d\psi(x)}{dx}$. Sin embargo, se ha reportado /2/ que este término aporta al potencial una cantidad del orden de KT/q para distribuciones de impurezas del tipo gaussiano. Para este caso la solución queda:

$$\psi(x) = \frac{q\,No\,\sigma^2}{\varepsilon s}\left\{\exp\left[-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}\right] - \exp\left[-\frac{(w-\bar{x})^2}{2\sigma^2}\right]\right.$$

$$\left.-\frac{x-\bar{x}}{\sqrt{2}\,\sigma}\sqrt{\pi}\left[\operatorname{erf}\left(\frac{w-\bar{x}}{\sqrt{2}\,\sigma}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{x-\bar{x}}{\sqrt{2}\,\sigma}\right)\right]\right\}$$

$$+\frac{q\,N_B}{2\,\varepsilon s}(w-x)^2 + \frac{KT}{q} + \frac{KT}{q}(w-x)\frac{1}{Po(w)}\left.\frac{dPo}{dx}\right|_w$$

$$+\frac{KT}{q}\ln\frac{N_B}{Po(w)} \tag{3}$$

Para evaluar esta ecuación se podría emplear (2), sin embargo, la presencia de la derivada $\frac{dPo(x)}{dx}$ complica la expresión, haciéndola demasiado engorrosa para su utilización.

Si se toma la siguiente aproximación:

$$Po(x) = N(x)\Big|_{x=w}$$

no se comete mucho error en el cálculo y se puede obtener una ecuación manipulable analíticamente.

Con esta aproximación y haciendo:

$$y = \frac{w-\bar{x}}{\sqrt{2}\,\sigma} \qquad y \qquad \alpha = \frac{\bar{x}}{\sqrt{2}\,\sigma}$$

la expresión para el potencial superficial será:

$$\psi s = \frac{qNo\,\sigma^2}{\varepsilon s}\left\{\exp(-\alpha^2) - \exp(-y^2) + \right.$$

$$\left.\alpha\sqrt{\pi}(\operatorname{erf} y + \operatorname{erf}\alpha)\right\} + \frac{qN_B\sigma^2}{\varepsilon s}(y+\alpha)^2 -$$

$$\frac{2KT}{q}\left\{\frac{y(y+\alpha)}{1+\frac{NB}{NO}\exp(y^2)} + \frac{1}{2}\ln\left[1+\frac{No}{N_B}\exp(-y^2)\right]\right\} + \frac{KT}{q} \tag{4}$$

que coincide con la ecuación encontrada en /3/ con la diferencia de los últimos tres términos.

Definiendo las mismas constantes que en /3/:

$$K = \frac{\varphi_{so} + |V_{BS}|}{2\,\frac{No\sigma^2}{\varepsilon s}} - \exp(-\alpha^2) - \alpha\sqrt{\pi}\operatorname{erf}\alpha \tag{5}$$

y

$$Ko = \frac{2\ KT\ \varepsilon s}{q^2 \sigma^2 No} \qquad (6)$$

la ecuación (4) queda:

$$\frac{N_B}{No}(y+\alpha)^2 = K + \exp(-y^2) - \alpha\sqrt{\pi}\ \mathrm{erf}\ y$$

$$+ Ko\left\{\frac{y(y+\alpha)}{1+\frac{N_B}{No}\exp(y^2)} + \frac{1}{2}\ln\left[1+\frac{No}{N_B}\exp(-y^2)\right] - \frac{1}{2}\right\} \qquad (7)$$

Esta es la ecuación de trabajo, pues permite calcular el valor de W para un $\psi so$ dado.

## POTENCIAL SUPERFICIAL DE INVERSIÓN

Si en (4) se evalúa para W=0, es decir, $y=-\alpha$ se obtiene:

$$\psi s = -\frac{KT}{q}\ln\left[1+\frac{No}{N_B}\exp(-\alpha^2)\right] \qquad (8)$$

ignorando el término KT/q aislado.

Este valor del potencial superficial coincide con el término $\psi o$ definido en /3/, y que se muestra en el diagrama de bandas en la figura ? De la figura se ve que:

$$\psi so = 2\psi FS - \psi o \qquad (9)$$

donde

$$\psi FS = \frac{KT}{q}\ln\frac{N_B+No\ \exp(-\alpha^2)}{n_i} \qquad (10)$$

y

$$\psi o = -\psi_s \qquad (11)$$

sustituyendo (8) en (11) y esta y (10) en (9):

$$\psi so = \frac{KT}{q}\ln\frac{NB(N_B - No\ \exp(-\alpha^2))}{ni^2} \qquad (12)$$

Con esta expresión se calcula el potencial de inversión superficial, que sirve como parámetro en (4) para calcular la W correspondiente.

Para tener en cuenta el efecto del acortamiento del canal se utiliza el modelo simplificado de L. D. Yau /2/. Sin embargo, al considerar las cargas en el volumen, las expresiones para el perfil rectangular se modifican en el término Y:

$$Ws = \sigma\sqrt{8}\left\{\alpha + \frac{\exp(-\alpha^2)-\exp(-y^2)}{\sqrt{\pi}(\mathrm{erf}\ \alpha + \mathrm{erf}\ y)} - Y\right\} \qquad (13)$$

$$N_A = No\frac{\sqrt{\pi}}{4}\frac{\mathrm{erf}\ \alpha+\mathrm{erf}\ y}{\alpha + \frac{\exp(-\alpha^2)-\exp(-y^2)}{\sqrt{\alpha}(\mathrm{erf}\ \alpha+\ \mathrm{erf}\ y)} - Y} \tag{14}$$

donde

$$Y = Ko\left\{\frac{\frac{y(y+\alpha)}{1+\frac{N_B}{No}\exp(y^2)} + \frac{1}{2}\ln\left[1+\frac{No}{N_B}\exp(-y^2)\right]}{\sqrt{\pi}(\mathrm{erf}\ \alpha+\ \mathrm{erf}\ y)}\right\} \tag{15}$$

Analicemos ahora el comportamiento del término Y de (13) y (14). Este se anula si:

$$\frac{y(y+\alpha)}{1+\frac{N_B}{No}\exp(y^2)} = -\frac{1}{2}\ln\left[1+\frac{No}{N_B}\exp(-y^2)\right]$$

En la figura 3 se han representado las características del miembro derecho (MD) e izquierdo (MI) de esta igualdad; donde para $y < -\alpha$ no tiene sentido físico graficar la función.

Obsérvese que existen dos puntos donde se cumple la igualdad. De hecho ambas curvas se pueden cortar por el cambio de signo que sufre el tercer término de (4), lo que hace que el potencial de difusión, miembro derecho de la igualdad, se pueda cancelar con el potencial que generan las cargas de la región cuasineutral en la zona de empobrecimiento (miembro derecho). /1/.

De manera que si una vez calculado el $V_T$ necesario, la anchura de la zona de carga espacial W es tal que coincide con el punto de intersección de ambas curvas, el término Y se anula y las modificaciones hechas a las ecuaciones anteriores no tienen sentido. Por supuesto, esto ocurre para un juego de parámetros de la gaussiana de la implantación, es decir, No, $N_B$, $\sigma$ y $\bar{X}$ dados. Incluso puede darse el caso en que estos parámetros son tales que la igualdad anterior nunca se cumple.

En las figuras 4, 5 y 6 se muestran ejemplos concretos de la posible intercepción de ambas curvas según los parámetros de la gaussiana que describe el perfil de impurezas.

## MÉTODO DE CÁLCULO

Con los parámetros de la implantación se calcula $\psi so$ de (12) y K de (5). De (7) mediante un método iterativo se calcula W y con esta el $V_T$ de:

$$V_T = V_{FB} + \psi so + \frac{q}{Co}(N_A Ws)FA + \frac{q}{Co}(N_B W)F_B \tag{16}$$

donde

$$FA = 1 - \frac{X_j}{L}\left[\sqrt{1+\frac{2ws}{Xj}} - 1\right] \tag{17}$$

y

$$F_B = 1 - \frac{X_j}{L}\left[\sqrt{1 + \frac{2w}{Xj}} - 1\right] \qquad (18)$$

que son los coeficientes del modelo de Yau.

El valor obtenido de $V_T$ se compara con el deseado y se varía la No para un nuevo proceso iterativo hasta lograr convergencia en $V_T$.

Todos los cálculos fueron realizados mediante un programa confeccionado a este efecto, en lenguaje BASIC N88 e instrumentado en una microcomputadora personal NEC 8801.

## RESULTADOS

En las figuras 7, 8, 9, 10, 11 y 12 se muestran diferentes gráficos de $V_T$ vs Dosis para un transistor MOS para distintas concentraciones de substrato y para valores del $V_T$ en los intervalos desde 0.3 a 1.5 V y de 5 a 15 V, teniendo en cuenta la no neutralidad del volumen del semiconductor y el efecto de la difusión de portadores en el borde de la zona de carga espacial (curvas 1), e ignorando estos dos efectos (curvas 2).

Obsérvese en primer lugar que las curvas 2 siempre dan dosis más altas que las curvas 1. Es decir, el despreciar los efectos antes mencionados proporciona una dosis mayor que la necesaria. De estas curvas se puede ver que el corrimiento en el valor $V_T$ que se produce por la diferencia entre estos valores de dosis puede llegar a ser de hasta 1.5 volts para $V_T$ mayores de 10 volts.

Para un valor dado de la concentración de substrato la diferencia entre las curvas se hace más pronunciada en la medida en que el $V_T$ aumenta, y es casi despreciable para valores de pequeño de este. Sin embargo, si se comparan gráficos de distintos valores de concentración de substrato se observa que en la medida en que $N_B$ sea menor, la diferencia entre las curvas 1 y 2 es mayor.

Lo anterior está dado por el hecho de que en la medida en que se necesite un $V_T$ mayor para un substrato dado, la distribución de impurezas implantadas tendrá que ser más abrupta, lo que hace que haya menos coincidencia entre la distribución de portadores mayoritarios y el perfil de impurezas ionizadas y se sienta más la no neutralidad del volumen del semiconductor.

Los mismo ocurre si para un valor de $V_T$ dado se cambia la concentración del substrato. En la medida en que esta se haga menor habrá mayor gradiente de concentración entre la distribución gaussiana implantada y el substrato, lo que también agudiza la no neutralidad del volumen.

En todos los casos se tomó un transistor MOS con las siguientes características: $V_{FB}$ = - 1,255 V, $\sigma$ = 1,44 . $10^{-5}$ cm, $\bar{X}$ = 2 · $10^{-6}$ cm, $V_{BS}$ = 0, Xj = 1,5 · $10^{-4}$ cm, L = 2,6 · $10^{-4}$ cm y Co = 3,14 . $10^{-8}$ F/cm².

## CONCLUSIONES

En el trabajo se muestran las expresiones necesarias para el cálculo de la dosis considerando el efecto de la no neutralidad del volumen del semiconductor y la difusión de portadores mayoritarios en el borde de la zona de carga espacial.

La influencia de los efectos antes mencionados en el cálculo de la dosis es significativo sobre todo para valores de $V_T$ mayores de 5 volts, por lo que se recomienda el uso del modelo y ecuaciones aquí propuestas cuando se va a calcular una dosis para un $V_T$ mayor que este valor; como puede ser, por ejemplo, para el caso de transistores parásitos en la tecnología NMOS.

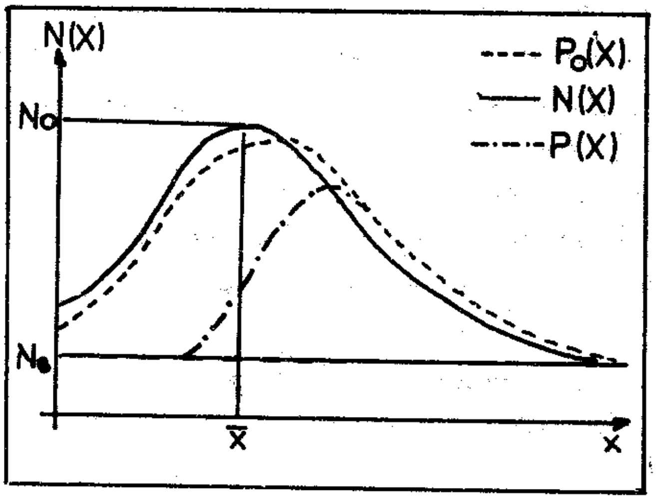



Figura 1. Distribución de impurezas N(x), portadores mayoritarios en equilibrio Po(x)y en no equilibrio P(x) para un potencial superficial dado ($\psi s$ = 0), para un perfil gaussiano.

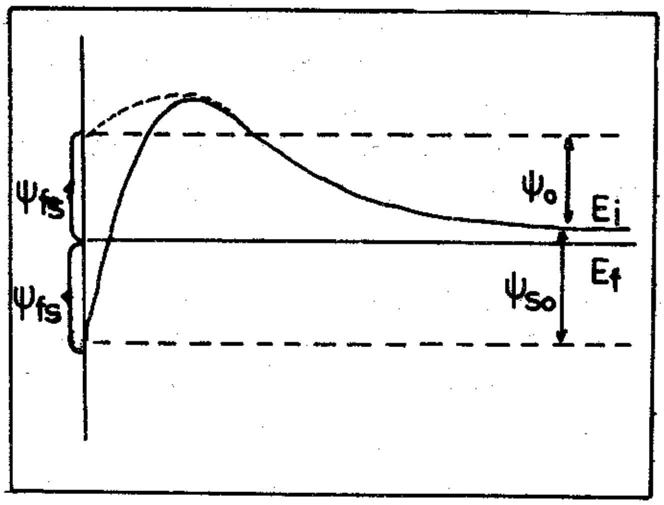



Figura 2. Diagrama de bandas (solamente el nivel intrínseco) de un semiconductor con una distribución de impurezas no homogénea. Nótese que $\psi so=2\psi fs-\psi 0$.

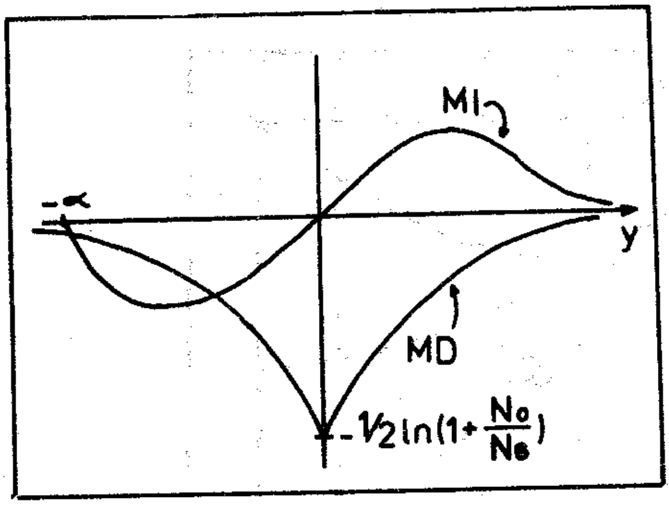
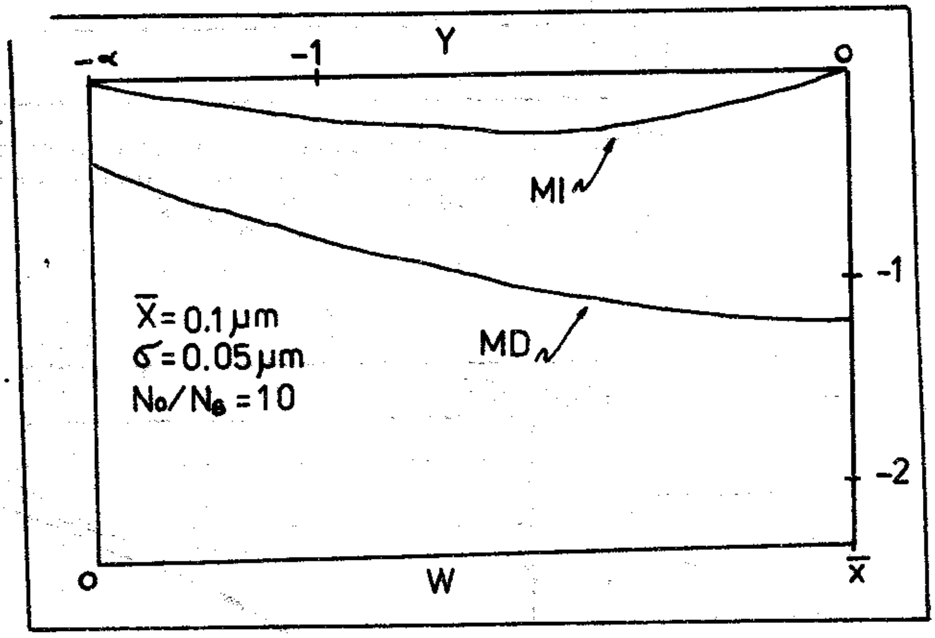



Figura 3. Comportamiento de los miembros de la igualdad. (MI: miembro izquierdo, MD: miembro derecho)

Figura 4. Comportamiento de los miembros de la igualdad entre y=-α y y=0 (W=0 y W=$\bar{X}$) para $\bar{X}$=0.1 µm, σ=0.05 µm y $No/N_B$=10.



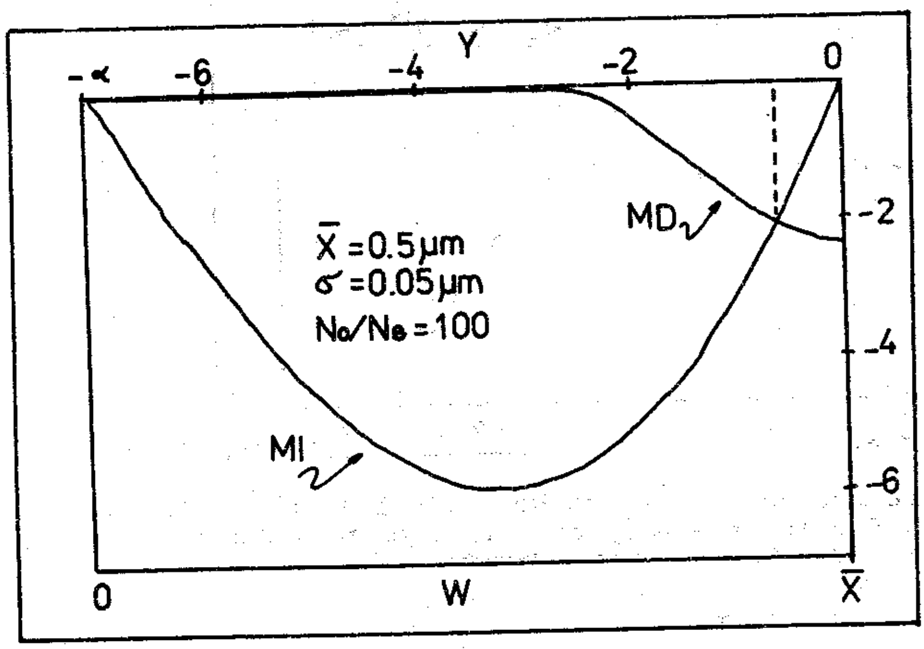




Figura 5. Comportamiento de los miembros de la igualdad entre y=-α y y=0 (W=0 y W=$\bar{X}$) para $\bar{X}$=0.5 µm, σ=0.05 µm y $No/N_B$=100.

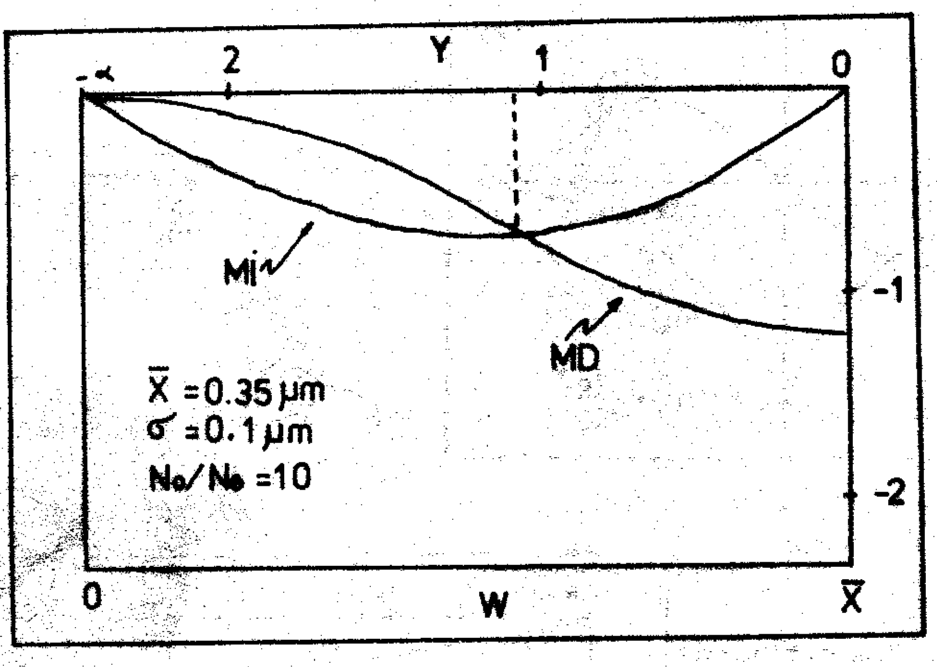



Figura 6. Comportamiento de los miembros de la igualdad entre y=-α y y=0 (W=0 y W=$\bar{X}$) para $\bar{X}$=0,35 μm, σ=0.1 μm y No/$N_B$=10.

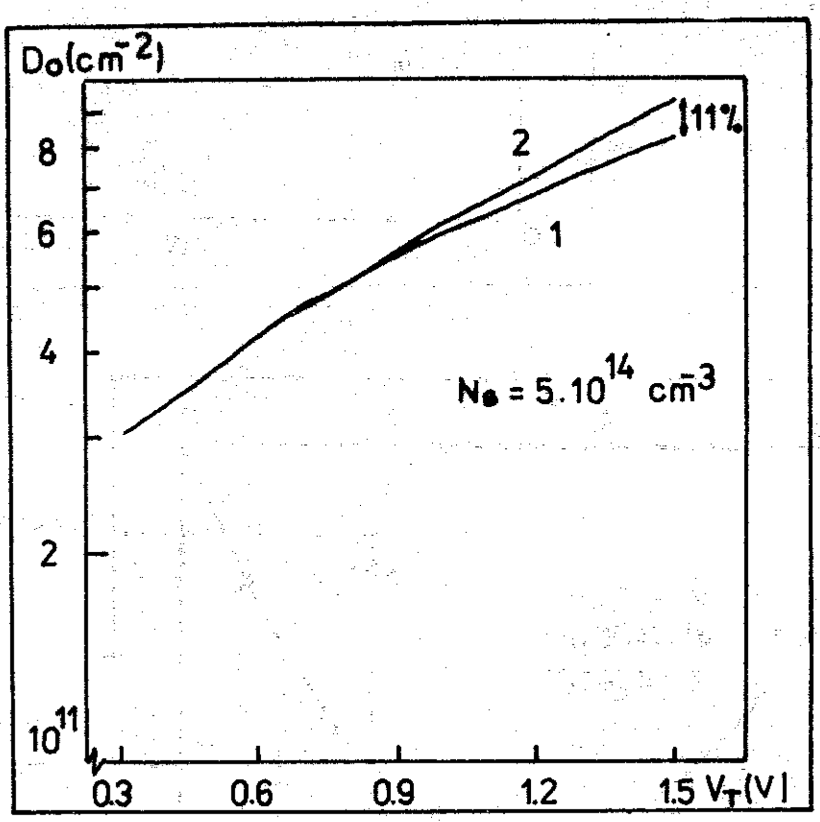



Figura 7. Dependencia de $V_T$ vs Dosis (Do) entre 0.3 y 1.5 volt para una concentración de substrato de $5.10^{14}$ $cm^{-3}$.

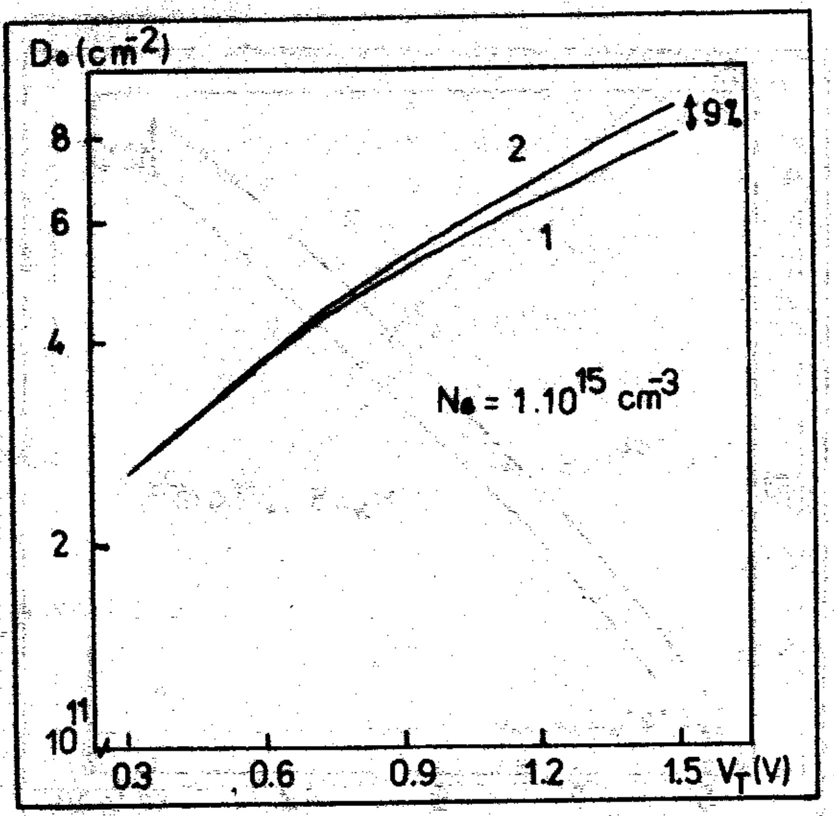



Figura 8. Dependencia de $V_T$ vs Dosis (Do) entre 0.3 y 1.5 volt para una concentración de substrato de $1.10^{15} cm^{-3}$.

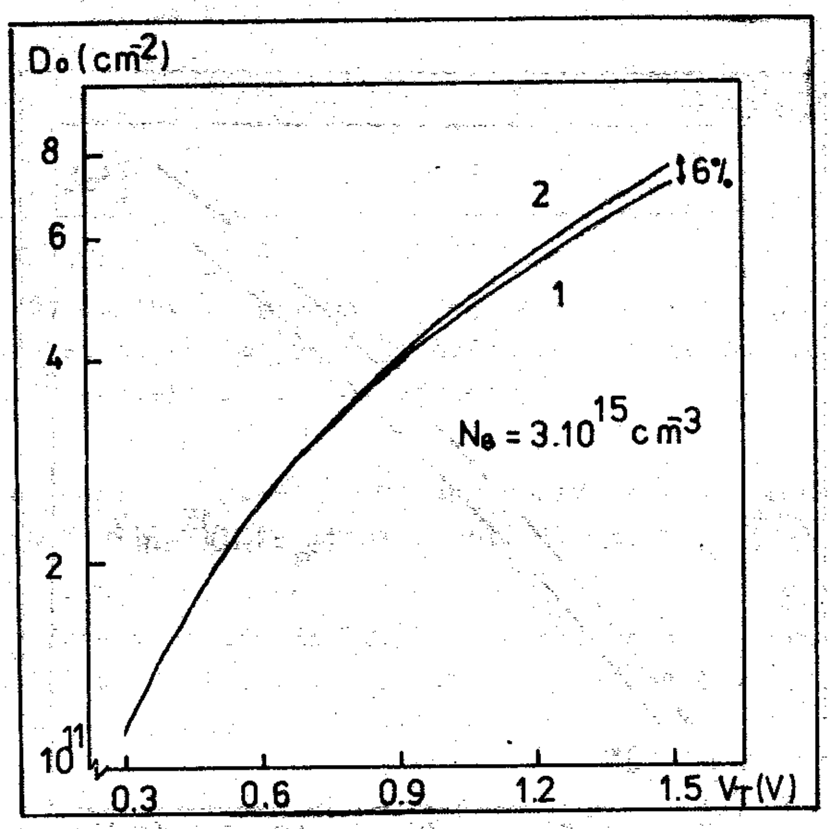



Figura 9. Dependencia de $V_T$ vs Dosis (Do) entre 0.3 y 1.5 volt para una concentración de substrato de $3.10^{15} cm^{-3}$.

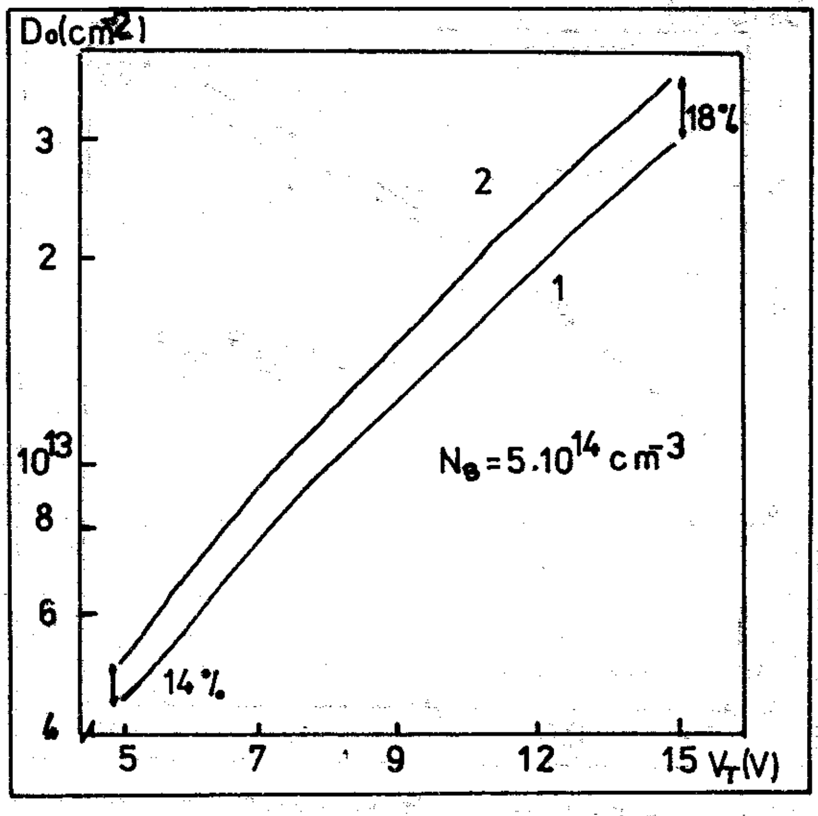



Figura 10. Dependencia de $V_T$ vs Dosis (Do) entre 5 y 15 volt para una concentración de substrato de $5.10^{14} cm^{-3}$.

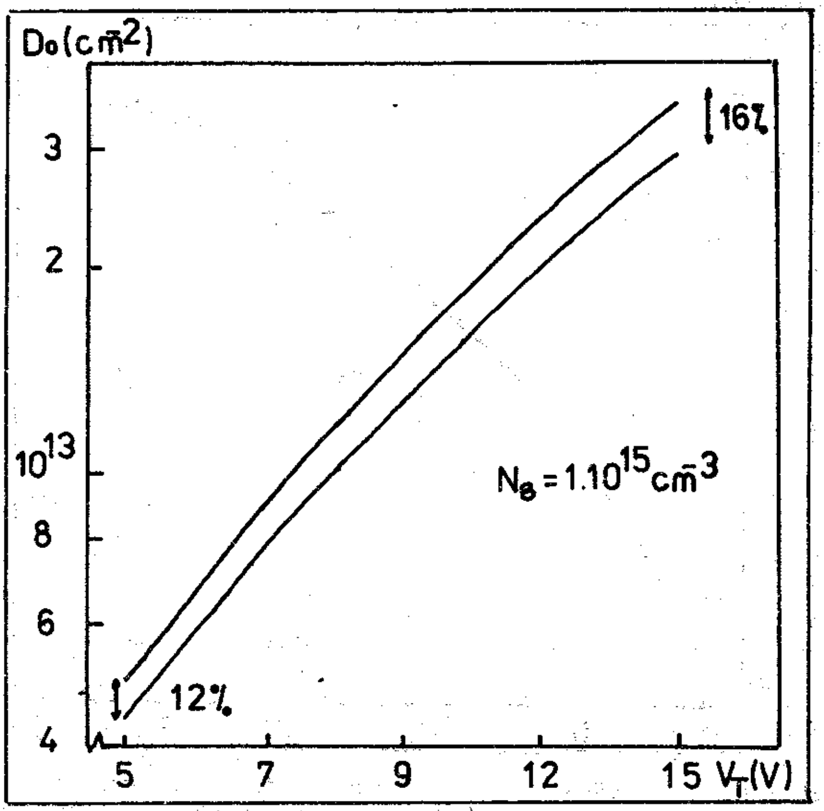



Figura 11. Dependencia de $V_T$ vs Dosis (Do) entre 5 y 15 volt para una concentración de substrato de $1.10^{15} cm^{-3}$.

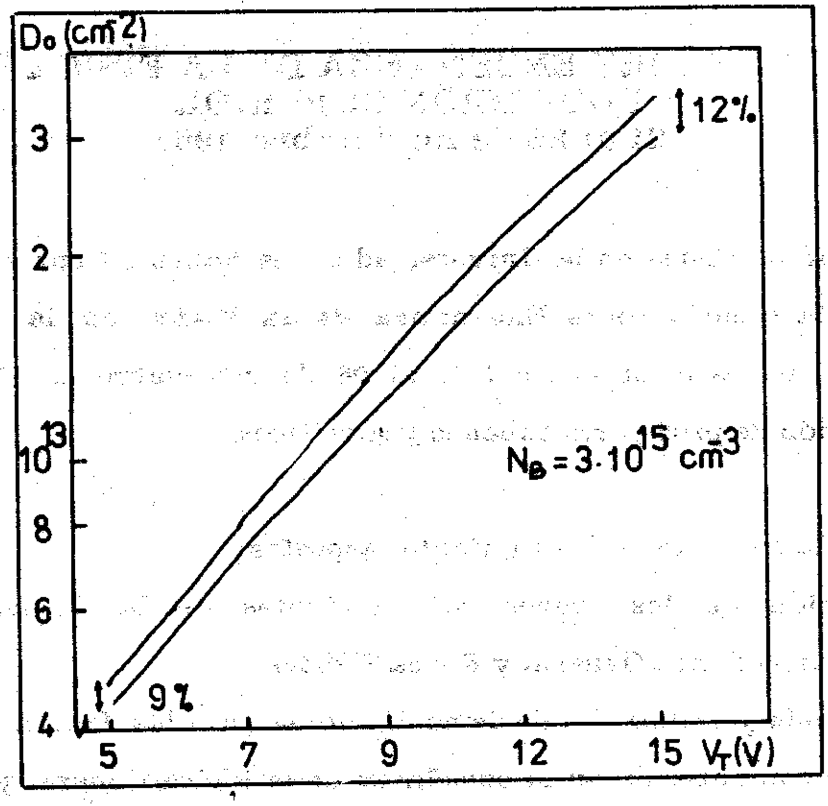



Figura 12. Dependencia de $V_T$ vs Dosis (Do) entre 5 y 15 volt para una concentración de substrato de $3.10^{15}cm^{-3}$.

## BIBLIOGRAFÍA


/1/ León Ortega, J.C.
Afectación de las cargas de la región cuasineutral en un semiconductor sobre el potencial y campo eléctrico. Presentado para ser publicado en la Revista Cubana de Física.

/2/ Yau L. D.
A simple theory to predict the threshold voltage of short-channel IGFETs. Solid State Electronic. vol. 17, p. 1059 (1974).

/3/ Cerdeira, A. y M.H. Calviño
Sobre la determinación del $V_T$ en transistores MOS implantados. Revista Cubana de Física, vol. IV, No. 1, (1984).


Recibido: 10 de febrero de 1987.