

Condición de banda plana en substratos no-homogeneos

JOSÉ CARLOS LEÓN ORTEGA
Instituto Central de Investigación Digital
Calle 202 No. 1700, entre 17 y 19
Siboney, Ciudad Habana, Cuba
e:mail joseme.icid.edu.cu

Recibido el 8 de noviembre de 1995; aceptado el 3 de julio de 1996

RESUMEN. En el presente trabajo se analiza la influencia de la concentración de portadores mayoritarios en la región cuasineutral en un semiconductor con substrato no-homogéneo sobre el potencial de banda plana. Se obtiene una ecuación para dicho potencial, teniendo un nuevo término que representa el aporte del potencial de difusión.

ABSTRACT. The influence of majority carriers concentration in the cuasineutral region of a semiconductor with non-homogeneous substrate on the flat band potential is analyzed. A useful equation for this potential, taking into account the potential diffusion, is obtained.

PACS: 00.38; 10.81; 11.01

1. 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, W :

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

Considerar a la región cuasineutral con total neutralidad eléctrica puede conllevar a errores de consideración en el cálculo de determinada magnitud física, al no tener en cuenta el aporte del potencial producido por la difusión de portadores en dicha región.

El presente trabajo tiene como objetivo investigar la afectación del potencial de difusión procedente de la región cuasineutral sobre el potencial de banda plana, así como encontrar una expresión para dicha magnitud que tenga en cuenta este aporte.

2. DESARROLLO

Al aplicar un potencial a una estructura MOS, con substrato no-homogéneo, aun considerando aproximación de empobrecimiento, la distribución de portadores mayoritarios,

no coincide con la distribución de impurezas en la región cuasineutral [2, 3]. El flujo de difusión de portadores desde la región de mayor concentración hacia la de menor, crea el conocido potencial de difusión que frena dicho flujo, alcanzándose un equilibrio, de manera que la distribución de carga eléctrica $\rho(x)$ en un semiconductor tipo p es

$$p(x) = \begin{cases} qN_a(x) & 0 \leq x \leq W \text{ (aprox. de empob.)} \\ q[p(x) - N_a(x)] & W < x \text{ (potencial de difus.),} \end{cases} \quad (1)$$

donde q es la carga del electrón, N_a es la distribución de impurezas y $p(x)$ es la distribución de portadores mayoritarios.

En la Ref. [4] se resuelve la ecuación de Poisson con las condiciones dadas en la Ec. (1) y se llega a una ecuación del tipo:

$$\psi(x, W) = \psi_{N_a}(x, W) + \frac{KT}{q} \left[\frac{W - x}{N_a(x)} \frac{dN_a(x)}{dx} \Big|_{x=W} + \ln \left(\frac{N_B}{N_a(x)} \right) \Big|_{x=W} \right], \quad (2)$$

para $0 \leq x \leq W$ y

$$\psi(x, w) = \frac{KT}{q} \ln \left[\frac{P_0(x)}{N_B} \right], \quad (3)$$

para $x > W$ donde $\psi(x, W)$ es el potencial eléctrico, $\psi_{N_a}(x, W)$ es el aporte del potencial de la distribución de impurezas $N_a(x)$, K es la constante de Boltzman, T es la temperatura, N_B es la concentración de sustrato [$N_B = N_a$ ($x \gg W$)] y $P_0(x)$ es la distribución de portadores mayoritarios en equilibrio.

En dicho trabajo se interpretan los términos de la Ec. (2), recalándose que el segundo es el que representa la distribución de las cargas en la zona cuasineutral y permite la continuidad del campo eléctrico en $x = W$. Por otra parte, el tercero es un término constante y representa la caída de potencial donde $x = W$ hasta la coordenada en que el semiconductor alcanza su neutralidad. Por ser constante, se puede evaluar en cualquier punto, por eso se escoge $x = W$.

Si se toma para $N_a(x)$ una distribución del tipo gaussiana, que es la que más abunda en la práctica:

$$N_a(x) = N_B + N_0 \exp \left[-\frac{(x - \bar{x})^2}{2\sigma^2} \right], \quad (4)$$

donde N_0 es la concentración máxima, \bar{x} es la porción donde ocurre N_0 y σ es el ancho de la distribución, se sustituye en la Ec. (2) y se evalúa para $x = 0$, se obtiene la expresión del potencial superficial $\psi_S(W)$:

$$\psi_S(w) = \psi_{S N_a(x)} + \frac{KT}{q} \frac{[w(w - \bar{x})]/\sigma^2}{1 + \frac{N_B}{N_0} \exp \left[\frac{(w - \bar{x})^2}{2\sigma^2} \right]} + \frac{KT}{q} \ln \left[1 + \frac{N_0}{N_B} \exp \left(-\frac{(w - \bar{x})^2}{2\sigma^2} \right) \right]. \quad (5)$$

Obsérvese que $\psi_S(W)$ posee el aporte de la distribución de impurezas en la zona de carga espacial $\psi_{S N_a(x)}$ y los dos términos correspondientes adicionales analizados de la Ec. (2).

Analícemos los dos últimos términos de la Ec. (5). Se pueden establecer tres casos interesantes:

a) $W = 0$. El término $\psi_{SN_a(x)}$ se hace cero, al igual que el segundo, quedando

$$\psi_S = \frac{KT}{q} \ln \left[1 + \frac{N_0}{N_B} \exp \left(-\frac{\bar{x}^2}{2\sigma^2} \right) \right]. \quad (6)$$

b) $W \rightarrow \infty$. Se hacen cero los dos últimos términos, quedando

$$\psi_S = \psi_{SN_a(x)} \quad (7)$$

c) $W = \bar{x}$. En este caso, se hace cero el segundo y se modifica el tercero:

$$\psi_S = \psi_{SN_a(x)} \Big|_{w=\bar{x}} + \frac{KT}{q} \ln \left(1 + \frac{N_0}{N_B} \right). \quad (8)$$

En el caso a) se ve que la condición $W = 0$ no implica $\psi_S = 0$. O sea, que existe en la estructura un valor del potencial superficial, aunque no haya zona de carga espacial en el semiconductor. En el caso b), por otro lado, toda la influencia de la distribución de impurezas está dentro de la región de carga espacial y por lo tanto no existe región cuasineutral, donde se generan los términos segundo y tercero de la Ec. (5). En c) se representa que el borde de la zona de carga espacial se encuentra exactamente en la porción del máximo de concentración.

3. CONDICIÓN DE BANDA PLANA PARA SUBSTRATOS IMPLANTADOS

Por el hecho de tratarse de un perfil de impurezas no uniforme, no tiene sentido hablar de la condición de banda plana, puesto que, por principio, en tal sustrato las bandas de energías no estarán planas nunca. Pero si se fuera a tomar algún criterio para definir una condición equivalente a ésta, a partir de la definición para un sustrato homogéneo, habría siempre que adicionarle al potencial de banda plana el potencial que hay que aplicar al dispositivo para que el potencial superficial sea cero ($\psi_s = 0$); entonces, sería

$$\psi_{BP} = \psi_{BP}^o + \psi_{BP}^{dif}, \quad (9)$$

donde ψ_{BP} es el potencial superficial de banda plana, ψ_{BP}^o es el potencial superficial de banda plana debido a factores internos de la estructura, ψ_{BP}^{dif} es el potencial de banda plana debido al efecto del potencial de difusión.

El término ψ_{BP}^o es el que contiene el aporte de la diferencia de trabajo de extracción ϕ_{MS} y las cargas en el óxido en la estructura MOS, mientras que ψ_{BP}^{dif} es el que contrarresta el término del potencial superficial dado por la Ec. (6). De manera que la expresión para el cálculo de la banda plana será

$$\psi_{BP} = \psi_{BP}^o + \frac{KT}{q} \ln \left[1 + \frac{N_0}{N_B} \exp \left(-\frac{\bar{x}^2}{2\sigma^2} \right) \right]. \quad (10)$$

En la Tabla I se muestran los valores de ψ_{BP}^{dif} , en función de la relación N_0/N_B , para un \bar{x} y σ dado. Obsérvese que basta con que exista un orden entre N_0 y N_B (algo muy

TABLA I. Valores de ψ_{BP}^{dif} debido al término dado en la Ec. (6) en función de la relación N_0/N_B , para un \bar{x} y σ dado.

ψ_{BP}^{dif} (mV)	N_0/N_B	
22.2	10	(un orden)
33.9	20	
42.0	30	
48.1	40	
69.3	100	(dos órdenes)
$\bar{x} = 0.1$ nm	$\sigma = 0.05$ nm	

TABLA II. Cambio de ψ_{BP}^{dif} con respecto al ancho de la distribución gaussiana, para una relación N_0/N_B dada y un \bar{x} determinado.

σ	ψ_{BP}^{dif} ($N_0/N_B = 10$)	ψ_{BP}^{dif} ($N_0/N_B = 100$)
$x/4$	0.087 mV	0.85
$x/2$	22.16	69.32
x	50.64	106.75
$2x$	59.18	116.33
$4x$	61.37	118.73
$x = 0.1$ nm		

usual es el ajuste de parámetros eléctricos en dispositivos) para que este término sea aproximadamente igual a KT/q .

En la Tabla II se muestra cómo cambia este término con respecto al ancho de la distribución gaussiana, para una relación N_0/N_B dada y un \bar{x} determinado.

Obsérvese que a medida que la distribución sea más ancha (mayor σ), mayor es la afectación al término, y en la medida en que la relación N_0/N_B se haga mayor, para una σ dada, se duplica el aporte al potencial. Obsérvese además [de la Ec. (10)] que para distribuciones con máximo en la superficie ($\bar{x} = 0$), este aporte a ψ_{BP}^{dif} , se hace independiente de σ , siendo un valor que sólo depende de N_0/N_B :

$$\psi_{BP}^{dif} = \frac{KT}{q} \ln \left[\frac{N_B + N_0}{N_B} \right]. \quad (11)$$

Sin embargo, si ahora se repite la Tabla I pero usando la Ec. (11), los valores obtenidos son algo diferentes. Esto se muestra en la Tabla III.

Obsérvese, en primer lugar, que ahora, comparando ambas tablas, los valores del término ψ_{BP}^{dif} son mayores, siendo en algunos casos el doble y el triple, y en segundo lugar, que como la cantidad N_0/N_B está modulada por el término exponencial [Ec. (10)], los valores de la Tabla III son los valores máximos que se pueden alcanzar.

TABLA III. Los mismos parámetros de la Tabla I pero con la variación introducida por los nuevos términos.

ψ_{BP}^{dif} (mV)	N_0/N_B
62.10	10
78.85	20
88.94	30
96.18	40
119.53	100

La Ec. (11) permite concluir que el potencial superficial, debido al efecto de difusión y por tanto el término ψ_{BP}^{dif} sólo depende de la diferencia de concentración: ($N_0 + N_B$) en la superficie y N_B en el sustrato. Cualquier otro parámetro de la estructura MOS que dependa de la distribución del potencial, o del potencial superficial, estará afectado por los términos ya vistos que se introducen al tener en cuenta la no neutralidad del volumen del semiconductor. Tal es el caso del potencial de umbral V_T necesario para invertir la superficie del semiconductor.

De manera general

$$V_T = V_{BP} + \frac{Q_D}{C_o} + \psi_{so}, \quad (12)$$

donde V_{BP} es el potencial de banda plana aplicado a la estructura, Q_D es la carga eléctrica en el semiconductor, C_o es la capacitancia del óxido del MOS y ψ_{so} es el potencial superficial en la condición de inversión.

La Ec. (12) supone que se ha alcanzado un valor máximo de W . Si ahora se tienen en cuenta las cargas en la región cuasineutral, resultará evidente que el valor de V_T estará afectado por dicho aporte.

La afectación más importante resulta por la presencia de Q_D que ahora posee un nuevo término:

$$Q_D = Q_{D_{Na}} + \epsilon_s \frac{KT}{q} \frac{(W - \bar{x})/\sigma^2}{1 + \frac{N_B}{N_0} \exp\left[\frac{(W - \bar{x})^2}{2\sigma^2}\right]}, \quad (13)$$

siendo $Q_{D_{Na}}$ la carga correspondiente a la zona empobrecida, y el segundo término es el que ya se había analizado y que es el que representa la distribución de cargas en la zona cuasineutral.

Se puede demostrar, haciendo un análisis en el diagrama de bandas, que el término ψ_{so} no se afecta, pues depende solamente de la diferencia entre los niveles de energía de Fermi y el intrínseco del semiconductor, siendo

$$\psi_{so} = \frac{KT}{q} \ln \left\{ \frac{N_B [N_B - N_0 \exp(-\bar{x}^2/2\sigma^2)]}{ni^2} \right\}. \quad (14)$$

De manera que si se desea implantar una estructura MOS para un reajuste del valor del V_T y en el cálculo de la dosis no se tienen en cuenta estos aportes de la región cuasineutral del semiconductor, se obtiene un valor mayor que el necesario.

Se realizaron cálculos de dosis necesarias para reajustes de este parámetro en intervalos de 10 a 15 V, empleando ecuaciones que no contenían los aportes de la región cuasineutral, y se compararon con los obtenidos empleando ecuaciones que sí lo contemplaban y se obtuvieron valores de dosis superiores en un 15% de error como resultado de no tener en cuenta la no neutralidad del volumen, lo que puede correr el V_T en 1.5 V en el rango analizado con respecto al valor deseado, de usar las dosis erróneas calculadas. Se utilizaron concentraciones de sustratos entre 5×10^{14} y $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

4. CONCLUSIONES

Se demuestra que el aporte de las cargas en la región cuasineutral afecta en una cantidad apreciable a la distribución de potencial en el semiconductor, así como al potencial superficial, que puede ser varias veces la cantidad KT/q .

Los potenciales de banda plana y umbral en estructuras MOS, presentan nuevos términos en sus ecuaciones que pueden desplazarlo de los valores calculados, sin tener en cuenta el aporte del potencial de difusión del volumen, en cantidades mayores de 100 mV.

En el cálculo de la dosis para el reajuste del V_T es indispensable el uso de las ecuaciones con estos nuevos términos, pues el error que se puede cometer con ecuaciones más simplificadas que no los contengan, puede errar el valor de dicha magnitud en algunos voltios.

REFERENCIAS

1. A.S. Grove, *Physics and Technology of Semiconductor Devices*, John Wiley & Sons, New York, (1967) Cap. 6.
2. D.P. Kennedy and R.R. O'Brien, *IBM Res. Develop.* **13** (1969) 212.
3. W. van Gelder and E.H. Nicollian, *J. Electrochem. Soc.*, enero (1971) 138.
4. J.C. León, *Revista Cubana de Física*, **VI** No. 3 (1986) 15.