

EXPRESIONES SIMPLIFICADAS PARA EVALUAR EL COMPORTAMIENTO EN RÉGIMEN TRANSITORIO DE INVERSORES CON CARGA DE EMPOBRECIMIENTO

Magali Estrada del Cueto

José Folgueras Méndez

Instituto Central de Investigación Digital

RESUMEN

Durante el diseño de los circuitos integrados resulta fundamental evaluar el comportamiento en régimen transitorio de los inversores que se utilizan en los mismos. Para ésto pueden usarse programas de simulación, donde se utilizan modelos con diferente grado de aproximación. Sin embargo en una primera etapa, resulta conveniente contar con expresiones analíticas que permitan calcular los tiempos de subida y de descarga de los inversores y que sirvan de partida para análisis posteriores más rigurosos, que utilicen la simulación por computadora.

En este trabajo se presenta un método de análisis utilizando expresiones simplificadas que resulta de utilidad en esta primera etapa del diseño. Los resultados que se obtienen se comparan con los correspondientes a un programa de simulación que utiliza un modelo

específico para los transistores de empobrecimiento.

ABSTRACT

During the design of integrated circuits, it is fundamental to evaluate the transient behaviour of the inverters used in them. The use of computer simulation programs employing different models is generalized. However, for a first stage of analysis it is convenient to have analytical expressions which permit the calculation of the turn on and turn off times for the inverters, an which serve as a departure point for more detailed analysis employing computer simulation.

This article presents a method of analysis using simplified expression, very useful for this first stage and the results obtained with them are compared with those from a simulation program.

Durante el diseño de los circuitos integrados resulta fundamental evaluar el comportamiento transitorio de los inversores que se utilizan en los circuitos. Para la primera etapa de diseño resulta importante contar con expresiones analíticas sencillas que permitan calcular los tiempos de subida o de caída y que sirven de partida para análisis posteriores mas rigurosos que utilicen la simulación por computadora. Las expresiones que se presentan son aplicables a los inversores con carga de empobrecimiento, que son ampliamente utilizados en la actualidad.

Parámetros del modelo de Merckel

Las expresiones para la corriente de drenaje según el modelo de Merckel [1], pueden definirse en tres zonas:

Para $V_{GS} < V_{FB}$

$$I_D = K \left[2(V_{GS} - V_T) \cdot V_D - (1+\delta) \cdot V_D^2 \right] \quad (1)$$

donde

$$K = \frac{\mu_B C_{OX}}{2(1+\alpha)} \cdot \frac{Z}{L} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{C_{OX}}{C_I} \left(\frac{C_{OX}}{2C_I} + 1 \right) \quad (3)$$

$$C_I = \epsilon_0 \epsilon_S / d \quad (4)$$

d - profundidad de la capa implantada del canal construido

V_{FB} - voltaje de banda plana

V_P - voltaje de umbral para los transistores de empobrecimiento

μ_B - movilidad en el volumen

Z - ancho del canal

L - longitud del canal

C_{OX} - capacidad de la compuerta

$$\delta = 0,258 (1+\alpha) / \sqrt{\varphi_0} \quad (5)$$

$$v = \sqrt{2qN_a \epsilon_0 \epsilon_S} / C_{OX} \quad (6)$$

$$\varphi_0 = \frac{2kT}{q} \ln \frac{N_0 N_a}{n_i} \quad (7)$$

- k - constante de Boltzman
 N_A - concentración de aceptores del sustrato
 N_D - concentración de donores en el canal
 n_i - concentración intrínseca de portadores

Para la segunda zona:

$$V_{GS} > V_{FB}$$

$$V_{DS} \leq V_{FB}$$

y la corriente será:

$$I_D = \left[K \left\{ 2 V_D (V_{GS} - V_P) + (R-1) (V_{GS} - V_{FB}) - (R+\delta) \cdot V_D^2 \right\} \right] \quad (8)$$

donde

$$R = R_0 / 1 + \theta (V_{GS} - V_{FB}) \quad (9)$$

$$R_0 = \frac{\mu_S}{\mu_B} (1+\alpha) \quad (10)$$

θ - es el factor empírico de la movilidad

μ_S - movilidad superficial

En la tercera zona:

$$V_{GS} > V_{FB}$$

$$V_D > V_{FB}$$

la corriente será:

$$I_D = K \left[2 V_D (V_{GS} - V_P) - (1+\delta) V_D^2 + (R-1) (V_{GS} - V_{FB})^2 \right] \quad (11)$$

Para el caso en que $V_{GS} = 0$, caso frecuentemente utilizado en los inversores con carga empobrecida, la

expresión para la corriente (8) puede ser transformada [2] para obtener una expresión de forma similar a la del modelo de Shichman y Hodges.

La expresión queda de la forma:

$$I_D = K_{ef} \left[2 \left| V_{Pef} \right| V_D - V_D^2 \right] \quad (12)$$

donde

$$K_{ef} = K \cdot (R+\delta) \quad (13)$$

$$V_{Pef} = \frac{V_{Po} + V_{FB} (R-1)}{R + \delta} \quad (14)$$

$$v_{ef} = v (1 + C_{ox}/C_I) / (R+\delta) \quad (15)$$

$$V_{Pef} = V_{Poeff} + v_{ef} \left(\sqrt{V_{BB} + \phi_0} - \sqrt{\phi_0} \right) \quad (16)$$

Cuando $V_D = V_{Pef}$ el transistor se encuentra saturado y la corriente se expresa como:

$$I_D = K \left| V_{Pef} \right|^2 \quad (17)$$

Esta transformación y los nuevos parámetros introducidos, nos permiten utilizar para los transistores de empobrecimiento el mismo modelo de primer orden que se utiliza para los transistores de enriquecimiento. Debe señalarse que en este caso [2], se realiza una aproximación al modelo de Merckel, al no usar la expresión (11) y considerarse válida la expresión (8) para todo el rango de valores de V_D . Esto representa un valor de corriente inferior al que se obtendría aplicando el modelo Merckel.

El método de análisis clásico, que consiste en integrar la expresión de la corriente, da lugar a expresiones complejas de evaluar; por cuanto V_{Pef} es función del voltaje de salida. Para el cálculo del tiempo de subida en régimen no saturado, la integral de la expresión se complica grandemente.

Por otro lado, considerar V_{Pef} constante, introduce errores por exceso en el valor de la corriente que pueden ser considerables. En este trabajo se propone considerar un valor promedio de V_{Pef} constante, que resulta de calcular gráficamente el valor promedio de V_{Pef} con respecto al voltaje de salida V_{sal} (Fig. 1), que se evalúa en las dos zonas de trabajo del transistor de carga, o sea, en la zona saturada y en la no saturada.

El tiempo de carga del capacitor de salida del inversor, se evalúa también en estas dos zonas y se denomina τ_1 al tiempo que el transistor está saturado y τ_2 al tiempo en que el transistor está no saturado.

$$V_{sal} > (V_{CC} - V_{PS}) \quad (18)$$

donde V_{PS} es el valor del voltaje de umbral correspondiente

al V_{sal} para el cual ocurre la transición de saturado a no saturado, e:

$$I_D(t) = K_{ef} \left[2 |V_{Pef}| V_D - V_D^2 \right] \quad (19)$$

donde

$$V_D = V_{CC} - V_{sal}(t)$$

Podemos calcular un valor promedio de corriente durante el período de tiempo en que el transistor está no saturado según la expresión:

$$\bar{I}_2 = \frac{1}{(V_{PS} - V_0)} \cdot K_{ef} \int_{V_D}^{V_{PS}} (2 |V_{Pef 2}| V_D - V_D^2) dV_D$$

Integrando la expresión se llega al siguiente resultado:

$$\bar{I}_2 = \frac{K_{ef}}{(V_{PS} - V_0)} \left[|V_{Pef 2}| \left(V_{PS}^2 - V_0^2 - \frac{(V_{PS}^3 - V_0^3)}{3} \right) \right]$$

el cual a su vez, cuando V_0 es pequeño se reduce a:

$$I_2 = K_{ef} |V_{Pef 2}| (V_{PS} + V_0) \left[\frac{V_{PS}}{3 |V_{Pef 2}|} \right] \quad (20)$$

donde V_0 es el valor de voltaje a partir del cual se desea calcular el tiempo de subida o por ejemplo, V_0 puede tomarse igual al 10 % del voltaje máximo.

De igual forma, cuando el transistor está saturado:

$$V_D \geq V_{Pef}$$

En este caso:

$$I_1 = K_{ef} |V_{Pef 1}|^2 \quad (21)$$

y se puede definir una corriente promedio durante el tiempo en que el transistor está saturado dada por:

$$\bar{I}_1 = K_{ef} |\overline{V_{Pef 1}}|^2 \quad (22)$$

Los tiempos de carga en cada régimen analizado serán:

$$\tau_1 = \frac{C \Delta V_{sal}}{\bar{I}_1} \frac{(|V_{PS}| - V_0) C}{\bar{I}_1} \quad (23)$$

$$\tau_2 = \frac{C \Delta V_{sal}}{\bar{I}_2} \frac{(V_1 - |V_{PS}|) C}{\bar{I}_2} \quad (24)$$

donde V_1 es el voltaje hasta el cual se desea calcular el tiempo de carga. Puede ser igual, por ejemplo, al 90 % del valor máximo del voltaje de salida.

El tiempo total de carga será:

$$\tau_T = \tau_1 + \tau_2 \quad (25)$$

Cálculo de $\overline{V_{Pef 1}}$ y $\overline{V_{Pef 2}}$

Como se señaló, hace falta determinar dos valores promedios, $\overline{V_{Pef 1}}$ y $\overline{V_{Pef 2}}$ correspondientes a la región en que el transistor de carga se encuentra en régimen saturado y no saturado respectivamente. Para esto hay que determinar primeramente el valor $V_{Pef} = V_{PS}$ para el cual, el transistor pasa de régimen saturado a no saturado.

En la figura 1 se encuentran dibujadas las curvas:

$$V_{Pef} \text{ vs. } V_{sal} \quad \text{y} \quad (V_{CC} - V_{Pef}) \text{ vs. } V_{sal}$$

para diferentes parámetros tecnológicos, (curvas 1, 2, 3 y 4; 5, 6, 7 y 8) respectivamente que se relacionan en la Tabla 1, así como:

$$(V_{CC} - V_{sal}) = V_{sal} \quad (\text{curva 9})$$

La intersección de cualquiera de las curvas 5, 6, 7 y 8 con la curva 9 determina el valor de $V_{CC} - V_{PS}$ según (18). Los valores correspondientes a V_{PS} para cada juego de parámetros se han señalado a su vez en las curvas 1 a 4.

El valor de $\overline{V_{Pef 1}}$ y $\overline{V_{Pef 2}}$ se determina en cada una de las zonas analizadas igualando el área bajo la curva V_{Pef} vs V_{sal} respectivamente, en el área del rectángulo que se define por el valor promedio de $\overline{V_{Pef}}$ Fig. 2. De esta forma se pueden determinar los valores de $\overline{V_{Pef 1}}$ y $\overline{V_{Pef 2}}$ como se muestran en la Tabla 1 para diferentes juegos de parámetros tecnológicos.

Para comparar el grado de aproximación de las expresiones propuestas, se simuló inversores para diferentes valores de N_A, N_D, d y V_{Pef} , con el modelo de Merckel transformado y se compararon los cálculos realizados a través de las expresiones (23) y (24) métodos, donde, se observa la buena concordancia.

Para calcular el tiempo de descarga el transistor de carga no juega el papel fundamental, predominando el efecto de la corriente que pasa por el transistor de enriquecimiento, que actúa como "driver". En este caso se utilizan las expresiones para I_D vs V_{DS} para un transistor de enriquecimiento en las zonas de saturación y no saturación sin efecto de substrato, pues éste está unido a la fuente.

Conclusiones

En el trabajo se presentan expresiones sencillas para calcular el tiempo de subida de un inversor con carga de empobrecimiento, con una aproximación del orden a la que se obtiene con el modelo de Merckel transformado. Los parámetros que se usan en las expresiones se determinan gráficamente y se definen para cada juego de parámetros tecnológicos.

Reconocimientos

Agradecemos al Lic. Luis Diego Méndez por la simulación del comportamiento de los inversores, así como al C. Dr. Manuel Hernández Calviño por las discusiones sobre el modelo de Merckel transformado.

TABLA I

Datos tecnológicos	$\overline{V_{Pef\ 1}}$	$\overline{V_{Pef\ 2}}$	V_{PS}
1	1,5V	1,05V	1,1V
2	2,2V	1,7V	1,85V
3	--	4,5V	4,5V
4	2,9V	2,25V	2,5V

DATOS TECNOLÓGICOS

	1	2	3	4
N_A [cm^{-3}]	1×10^{15}	8×10^{14}	$1,5 \times 10^{15}$	1×10^{15}
X_0 [n-m]	125	125	120	125
N_D [cm^{-3}]	2×10^{16}	2×10^{16}	7×10^{16}	2×10^{16}
d [nm]	200	200	300	250
V_{Poef} [V]	-2,7	-2,7	-5,5	-3,5
γ_{ef}	0,8	0,72	1,2	1
$K_{ef} / \frac{w}{L}$ [A/V]	$7,2 \times 10^{-6}$	$7,2 \times 10^{-6}$	$5,1 \times 10^{-6}$	$7,2 \times 10^{-6}$

TABLA II

Datos Tecnologicos	C [pF]	w/L	τ_1 [ns]	τ_2 [ns]	t^*_{anal} [ns]	t^*_{sim} [ns]
1	0,1	1	3,12	6,5	9,6	10,9
	0,5	1	15,6	32,5	48	52,7
	1	5	6,2	13	19,5	23
2	0,1	1	7,6	7,35	14,95	15,3
	0,5	1	38	36,75	74,75	76,5
	1	5	15,2	14,7	29,9	30,5
3	0,1	1	6,3	-	6,3	7
	0,5	1	31,5	-	31,5	34
	1	5	12,7	-	12,7	15
4	0,1	1	3,36	7	10,3	10
	0,5	1	16,5	35	51,5	52
	1	5	6,72	14	20,7	22

(*) El tiempo de subida está calculado entre 0,5V y 4,5V.

BIBLIOGRAFÍA

1. Merckel, C.

Ion implanted mode transistor- depletion mode device, Process and device modeling for integrated circuit design, Ed. Von de Wille, Engel y Gespert, Noordhoff-Leyden, 1977, pag. 677.

2. Hernández Calviño, M.

Comunicación privada.

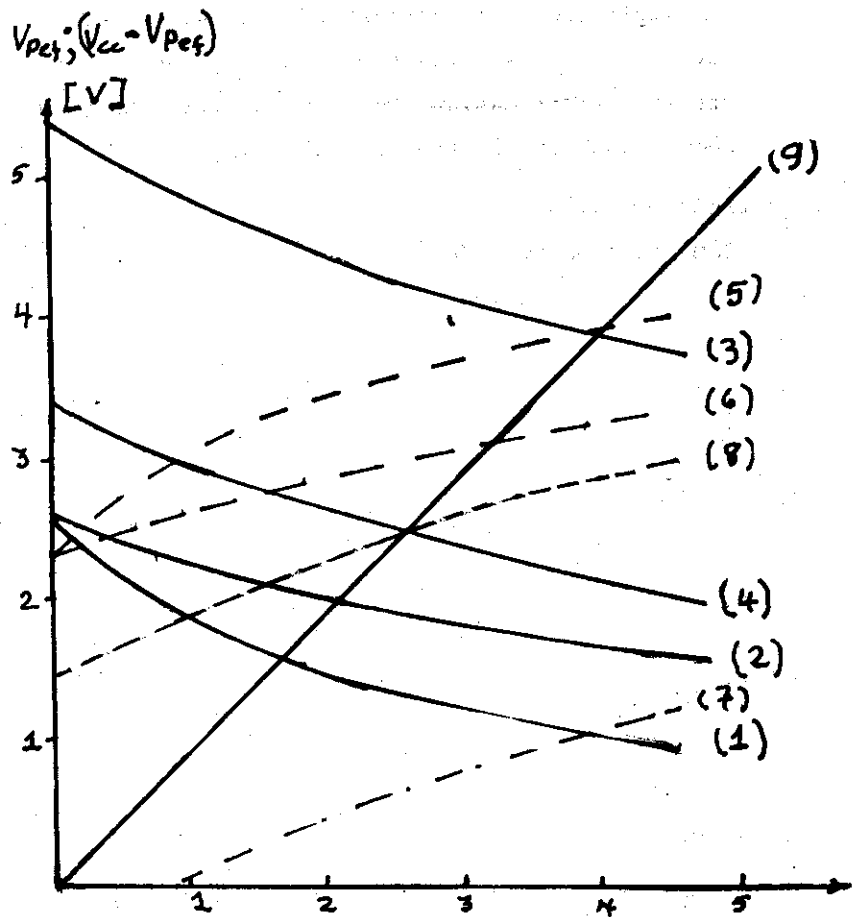


Fig. 1 Curvas 1,2,3,4 V_{pef} vs V_{sal} ; Curvas 5,6,7 y 8 $V_{cc} - V_{pef}$ vs V_{sal}

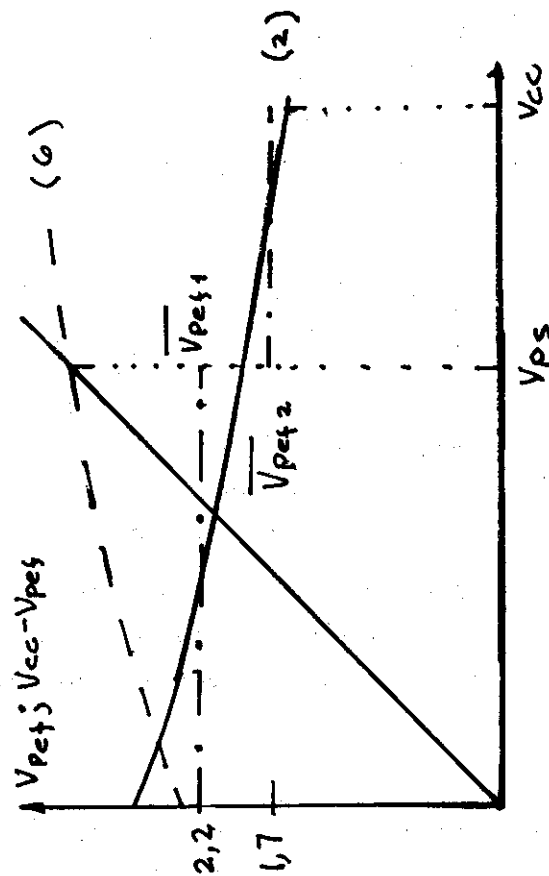


Fig. 2 Cálculo de V_{pef1} y V_{pef2}