

# Características del MOSFET

Nicolás Arias, Oscar Rojas, David Martínez.  
 {ndariass, oarojasg, drmartinezhe}@unal.edu.co  
 Universidad Nacional de Colombia

**Resumen**—Se obtuvieron los parámetros característicos del transistor de canal N  $CD4007$ , caracterizándolo en su región de triodo y de saturación, con base en las ecuaciones del comportamiento en dichas regiones, hallando los valores de la transconductancia, voltaje de umbral y potencial de cuerpo y observado sus comportamientos de manera experimental, además se compararon dichos resultados con el modelo ideal.

**Índice de términos**—Canal, Modulación, Potencial de cuerpo, Tensión de Umbral, Transconductancia, Transistor.

## I. INTRODUCCIÓN

### A. Región de corte

En esta región el transistor se encuentra apagado. No hay conducción entre la fuente (source) y el drenador (drain), de modo que el transistor se comporta como un interruptor abierto [2].

$$I_D = 0 \text{ si } V_{GS} < V_{TH}$$

### B. Región Lineal (Triodo)

Al polarizarse la puerta (gate) con una tensión mayor que la tensión de umbral, se crea una región de agotamiento en la región que separa la fuente (source) y el drenador (drain). Si esta tensión crece lo suficiente, aparecerán portadores minoritarios en la región de agotamiento, que darán lugar a un canal de conducción [2].

$$V_{GS} > V_{TH}$$

$$V_{DS} < V_{GS} - V_{TH}$$

$$I_{D_{Lineal}} = \mu_n C_{OX} \frac{W}{L} \left( (V_{GS} - V_{TH}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right) \quad (1)$$

Donde:

$W$ : Ancho del canal.

$L$ : Longitud del canal.

$C_{OX}$ : Capacitancia del óxido por unidad de área  $\frac{\epsilon_{OXSi}}{t_{OX}}$ .

$\epsilon_{OXSi}$ : Permitividad del óxido de Silicio  $3.5 * 10^{-11} \left[ \frac{F}{m} \right]$ .

$t_{OX}$ : Grosor de la capa del óxido.

$$k'_n = \mu_n C_{OX} \quad (2)$$

Debido al comportamiento lineal se estima la resistencia entre drenador y fuente

$$R_{DS} = \frac{V_{DS}}{I_D} = \frac{1}{k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})} \quad (3)$$

### C. Saturación

Cuando la tensión entre drenador y fuente supera cierto límite, el canal de conducción bajo la puerta sufre un estrangulamiento en las cercanías del drenador y desaparece. La corriente entre fuente y drenador no se interrumpe debido al campo eléctrico entre ambos, pero se hace independiente de la diferencia de potencial entre ambos terminales [2].

$$V_{GS} > V_{TH}$$

$$V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$$

$$I_{DQ} = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2 \quad (4)$$

### D. Modulación de longitud de canal

Para obtener una modulación de canal es necesario que el transistor se encuentre operando en la región de saturación. En saturación se infiere un factor de dependencia de  $T_D$  respecto a  $V_{DS}$  el cual es igual  $1 + \lambda V_{DS}$  donde  $\lambda$  es el parámetro de modulación de canal y se encuentra entre  $0.003 V^{-1}$  y  $0.005 V^{-1}$ .  $\lambda^{-1} = V_A$  es el voltaje de Early [1].

$$I_{DQ} = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2 (1 + \lambda V_{DS}) \quad (5)$$

### E. Efecto cuerpo

Si el sustrato se conecta a fuente no existe efecto cuerpo. Si el transistor es

- **NMOS** el sustrato va a tierra.
- **PMOS** el sustrato va a  $V_{DD}$ .

Al aumentar  $V_{SB}$  en polarización inversa aumenta  $V_T$ .

$$V_T = V_{TO} + \gamma \left( \sqrt{|-2\Phi_f| + V_{SB}} - \sqrt{|-2\Phi_f|} \right) \quad (6)$$

Donde:

$2\Phi_f$ : Potencial de superficie ( $\approx 0.6$ ).

$\gamma$ : Parámetro del efecto cuerpo  $[V^{-1}]$

## II. CARACTERÍSTICA DE FUENTE-COMÚN DEL NMOS

El montaje realizado se muestra en la figura 1.

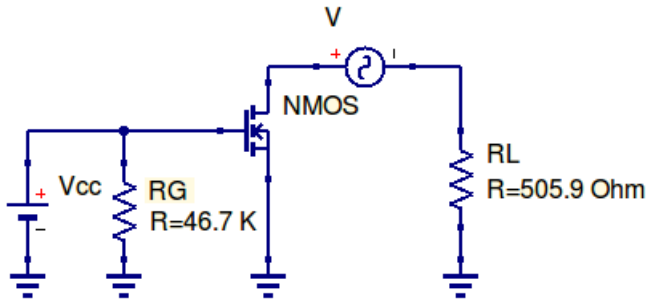


Fig. 1: Montaje utilizado para la caracterización de Fuente-Común del NMOS.

En esta parte de la práctica se obtuvo en el osciloscopio la gráfica de  $I_D$  vs.  $R_L$ , a partir de la cual se obtiene fácilmente la gráfica de  $I_D$  vs.  $V_{DS}$  considerando que  $I_D = V_L/R_L$ . Esto se hizo para valores de  $V_{GS}$  entre 3 V y 10 V, con intervalos de 1 V. Para determinar el parámetro  $k_n$  es de interés la región de triodo, hallando la pendiente  $m$  de esta parte de la gráfica. En la tabla I se muestra la pendiente hallada en cada gráfica, y su correspondiente valor de  $k_n$ . Para el transistor usado en esta parte de la práctica se tiene  $V_T = 1.3$  V.

TABLA I: Valores de  $k_n$  hallados para cada valor de  $V_{GS}$

$V_{GS}$ (V)	$m$ (mA/V)	$k_n$ (mA/V <sup>2</sup> )
3	0.741	0.436
4	0.988	0.366
5	1.483	0.401
6	1.318	0.280
7	1.412	0.248
8	1.483	0.221
9	1.561	0.203
10	1.581	0.182

A partir de los valores medidos se define un valor experimental de  $k_n$  como el promedio  $\mu$  de los datos medidos. De igual modo se halla la desviación estándar  $\sigma$  de los datos.

$$\mu(k_n) = 0.292$$

$$\sigma(k_n) = 0.097$$

### III. TENSIÓN DE UMBRAL Y POTENCIAL DE CUERPO

El montaje realizado se muestra en la figura 2.

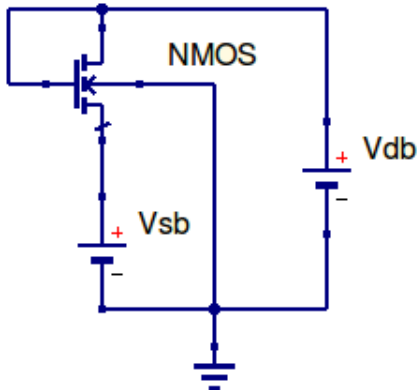


Fig. 2: Montaje realizado para determinar la tensión de Umbral y potencial de cuerpo.

Las tablas V, VI y VII muestran las mediciones de corriente de drenador en el circuito de la figura 2. Se tomaron medidas para  $V_{SB} = 5.075, 3.344, 1.402$  y la resistencia de prueba entregó un valor de  $2.5 \Omega$  en el multímetro.

Las figuras 7, 8 y 9 grafican los valores de las tablas haciendo un ajuste de curva suave.

TABLA II: Resultados para  $V_{SB} = 5.075$  V

$V_{DS}$ (V)	$V_R$ (mV)
4.15	0
4.68	0.6
5.12	1.4
5.4	2.2
5.67	2.9
5.91	3.7
6.23	4.8
6.39	5.4
6.68	6.6
6.95	7.7
7.15	8.5
7.4	9.6
7.56	10.4
7.71	11.1
7.95	12.2
8.22	13.5
8.39	14.3
8.73	16
8.91	17
9.4	19.5

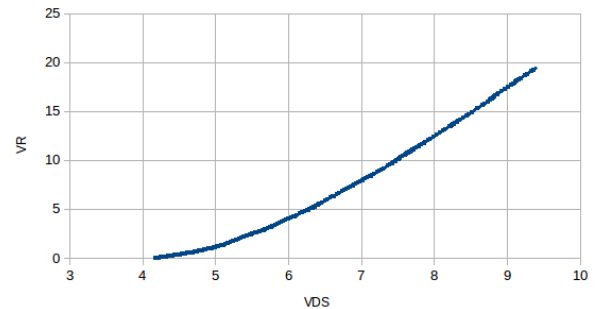


Fig. 3: Gráfica de la tabla V

TABLA III: Resultados para  $V_{SB} = 3.344\text{ V}$ 

$V_{DS} (V)$	$V_R (mV)$
3.47	0
4.49	1.5
5.11	3.1
5.48	4.3
5.87	5.7
6.28	7.4
6.54	8.4
6.89	10
7.37	12.2
7.68	13.6
8.03	15.3
8.27	16.6
8.67	18.6
9.03	20.5
9.34	22
9.43	22.3

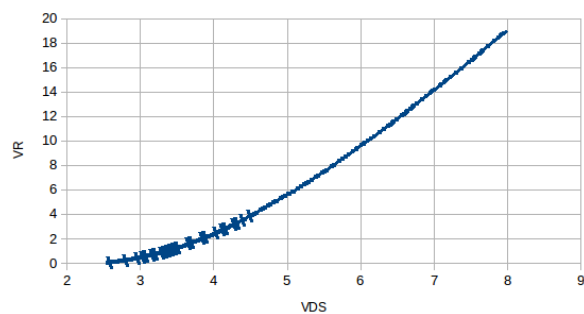


Fig. 5: Gráfica de la tabla VII

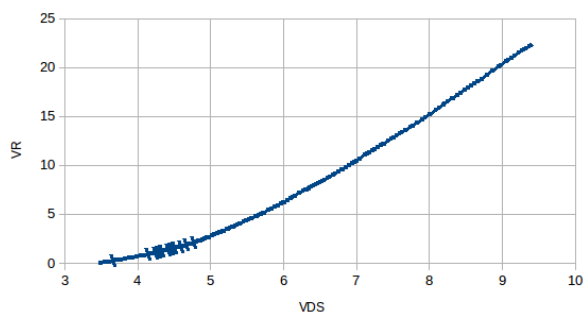
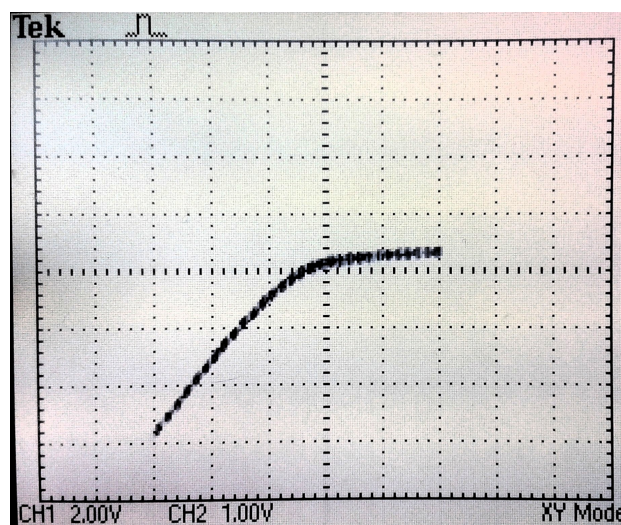


Fig. 4: Gráfica de la tabla VI

Fig. 6: Variación del voltaje en la resistencia de drenador (eje vertical) con respecto al voltaje  $V_{DS}$ TABLA IV: Resultados para  $V_{SB} = 1.402\text{ V}$ 

$V_{DS} (V)$	$V_R (mV)$
2.529	0
3.31	0.9
4.22	3
4.83	5
5.23	6.4
5.75	8.5
6.03	9.7
6.33	11
6.78	13.1
7.06	14.4
7.33	15.7
7.73	17.7
8	19

TABLA V: Resultados para  $V_{SB} = 5.075\text{ V}$ 

$V_{DS} (V)$	$V_R (mV)$
4.15	0
4.68	0.6
5.12	1.4
5.4	2.2
5.67	2.9
5.91	3.7
6.23	4.8
6.39	5.4
6.68	6.6
6.95	7.7
7.15	8.5
7.4	9.6
7.56	10.4
7.71	11.1
7.95	12.2
8.22	13.5
8.39	14.3
8.73	16
8.91	17
9.4	19.5

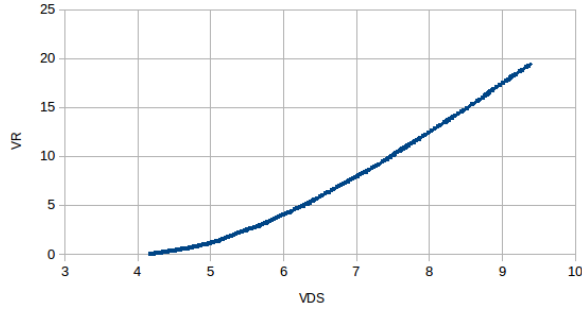


Fig. 7: Gráfica de la tabla V

TABLA VI: Resultados para  $V_{SB} = 3.344 V$ 

$V_{DS} (V)$	$V_R (mV)$
3.47	0
4.49	1.5
5.11	3.1
5.48	4.3
5.87	5.7
6.28	7.4
6.54	8.4
6.89	10
7.37	12.2
7.68	13.6
8.03	15.3
8.27	16.6
8.67	18.6
9.03	20.5
9.34	22
9.43	22.3

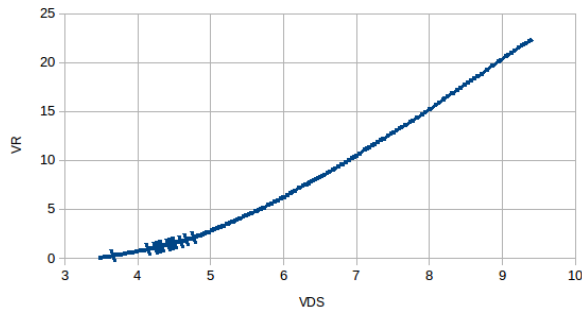


Fig. 8: Gráfica de la tabla VI

TABLA VII: Resultados para  $V_{SB} = 1.402 V$ 

$V_{DS} (V)$	$V_R (mV)$
2.529	0
3.31	0.9
4.22	3
4.83	5
5.23	6.4
5.75	8.5
6.03	9.7
6.33	11
6.78	13.1
7.06	14.4
7.33	15.7
7.73	17.7
8	19

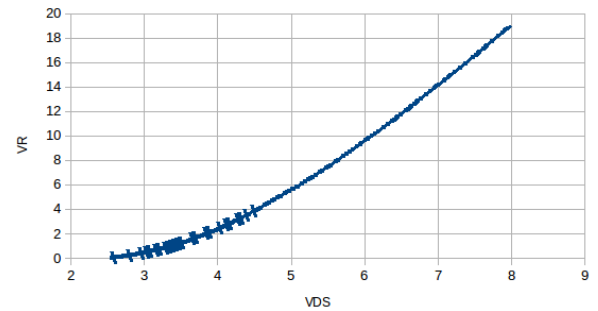


Fig. 9: Gráfica de la tabla VII

#### IV. ANÁLISIS Y CONCLUSIONES

##### A. Característica de Fuente-Común del NMOS

Los siguientes son algunos de los parámetros del transistor que aparecen en el modelo de SPICE.

- $K_P = k'_n = 111 \times 10^{-6} \text{ A/V} = 111 \times 10^{-6} \text{ mA/V}$ .
- $W = 30 \text{ nm}$
- $L = 10 \text{ nm}$  Las tablas V, VI y VII muestran las mediciones de corriente de drenador en el circuito de la figura 1. Se tomaron medidas para  $V_{SB} = 5.075, 3.344, 1.402$  y la resistencia de prueba entregó un valor de  $2.5 \Omega$  en el multímetro.

Las figuras 7, 8 y 9 grafican los valores de las tablas haciendo un ajuste de curva suave.

A partir de ahí se obtiene

$$k_n(\text{nominal}) = 0.333 \text{ mA/V}^2$$

Comparando el valor obtenido experimentalmente con este valor, es posible hallar el error relativo de este parámetro

$$e = 12.29 \%$$

El error presentado se atribuye al ruido presentado en las señales medidas, lo que hace que la medición de las pendientes de las gráficas no sea totalmente confiable. De igual modo, se considera que el dispositivo usado puede tener parámetros diferentes a los dados en el modelo de SPICE.

Durante el desarrollo de la práctica se observó que valores muy pequeños de  $R_L$  son inconvenientes, puesto que el ruido es grande en comparación con el nivel máximo de la señal, razón por la cual se eligió usar  $R_L = 510 \, \Omega$  (valor nominal). Aun así, los niveles de ruido para  $V_{GS} = 3 \, \text{V}$  y  $V_{GS} = 4 \, \text{V}$  son considerables.

Por otro lado, se requirió una frecuencia de la señal triangular muy baja, cercana a 6 Hz, para obtener un fragmento considerable de la gráfica. Para algunos valores de  $V_{GS}$  se logró llegar a la región de saturación del transistor.

### B. Tensión de Umbral y potencial de cuerpo

Con base en las mediciones y las expresiones para la corriente de drenador se puede observar que la corriente en la región de saturación inicia el comportamiento no lineal cuando  $V_{DS} \geq V_T$  teniendo  $V_D = V_G$ . Así el valor inicial de las tablas V, VI y VII corresponden a los potenciales de umbral para el  $V_{SB}$  determinado.

Usando la ecuación (6) se halla el potencial de cuerpo despejando las demás variables.

$$\gamma = \frac{V_T - V_{T0}}{\sqrt{|-2\Phi_f| + V_{SB}} - \sqrt{|-2\Phi_f|}} \quad (7)$$

De acuerdo con el modelo spice del CD4007  $2\phi_f = 0.6$  y  $V_{T0} = 1.4 \, \text{V}$  [3]. Así los valores obtenidos para el voltaje de umbral son:

TABLA VIII: Potenciales de cuerpo para diferentes  $V_{SB}$

$V_{SB}$	5.075	3.344	1.402
$V_T$	4.15	3.47	2.529
$\gamma$	1.7106	1.7088	1.7632

El promedio entre los valores  $\gamma$  hallados es de 1.7275. De acuerdo con [3] el  $\gamma$  esperado es de 1.5. El error es de 15.17 %. Se validó el método usado para hallar los voltajes de umbral y los potenciales de cuerpo, los valores de  $\gamma$  obtenidos tienen baja dispersión. La falta de exactitud en  $\gamma$  se debe a la diferencia entre el proceso de fabricación y el modelo ideal. Adicionalmente en la medida del  $V_{DS}$  de las tablas V, VI y VII hubo incertidumbre en la medición del multímetro con respecto al valor ideal.

### REFERENCIAS

- [1] Jaeger, Richard C. & Blalock, Travis N. "Microelectronic Circuit Design". McGraw-Hill, Fourth Edition, 1999.
- [2] Sedra, Adel S. & Smith, Kenneth C. "Circuitos Microelectrónicos". Oxford University Press, Cuarta Edición, 1999.
- [3] University of California in San Diego. Laboratory Assignment 4: MOS Logic Gates (Online Version). [http://www.code.ucsd.edu/cosman/lab4\\_modified.doc](http://www.code.ucsd.edu/cosman/lab4_modified.doc)