

# MODELADO ELECTRO-OPTICO DE TRANSISTORES MESFET Y P-HEMT EN SPICE

J. M. Zamanillo, H. Ingelmo, C. Pérez-Vega y A. Mediavilla

Departamento de Ingeniería de Comunicaciones

Grupo de RF & Microondas

Universidad de Cantabria

e-mail : [jose.zamanillo@unican.es](mailto:jose.zamanillo@unican.es)

**Abstract-** As an enhancement of our previous works in the electrical modelling of microwave and optical-microwave interaction field, this paper shows the result of the research on large signal behaviour (DC I/V curves) of AlGaAs P-HEMT (pseudomorphic high electron mobility transistor) and MESFET devices, in the overall I/V plane, when the incident optical input power is changed and how is possible to include the model into the PSPICE simulator. Experimental results show very good agreement with the theoretical analysis.

## I. INTRODUCCIÓN

En los últimos tiempos nuestro grupo de investigación ha desarrollado números modelos de dispositivos MESFET y HEMT bajo iluminación óptica, los cuales ofrecen unos resultados totalmente en concordancia con las medidas experimentales [1-3]. Los modelos desarrollados solamente habían sido introducidos en simuladores basados en el balance armónico como los simuladores: ADS de Agilent Technologies y Microwave Office de Advanced Wave Research. Ambos simuladores son de los más completos y eficientes que existen el mercado, pero presentan el inconveniente de su elevado precio, el cual solamente se encuentra al alcance de ciertas grandes empresas y de las universidades debido a la política de descuento por licencias educacionales, seguida por el fabricante del mismo. SPICE es una herramienta universalmente conocida y probada, cuyo precio es muy razonable, y además existen numerosas licencias de estudiante las cuales pueden obtenerse de forma gratuita de la mayoría de fabricantes del producto como ORCAD o Intusoft.

Con la idea de popularizar los modelos desarrollados en el seno de nuestro grupo de modelado, surgió la pregunta siguiente: *¿Por qué no utilizar SPICE como simulador de microondas?*, ello nos llevó a implementar alguno de nuestros modelos de DC para transistores MESFET y HEMT sin iluminación en SPICE, cuyos resultados ya han sido reportados en anteriores comunicaciones [4-5].

La idea que subyace en el presente trabajo es extender este tipo de simulación a dispositivos bajo iluminación láser con lo cual se debe introducir la potencia óptica aplicada al dispositivo como una nueva variable de control.

## II. EL SIMULADOR

El simulador SPICE fue desarrollado por la Universidad de Berkley en la década de los 70' del pasado siglo XX, y aunque hoy en día existen numerosos simuladores, es uno de los de mayor difusión en el seno de la comunidad científica.

Todos los modelos de dispositivos activos incluidos en SPICE, incluyendo el de MESFET de AsGa son de origen físico [4] y por tanto los parámetros que los definen dependen de la tecnología de fabricación del transistor, así como de factores geométricos solamente conocidos por el fabricante o el diseñador del dispositivo. En esta comunicación se quiere dar un paso más allá e introducir un modelo eléctrico basado en el concepto de circuito equivalente que además de cuenta de la potencia óptica aplicada al transistor. SPICE es un simulador basado en el análisis de los estímulos y respuestas del circuito a analizar en el dominio del tiempo, aunque permite mediante transformada de Fourier pasar al dominio de la frecuencia. Dado los modelos de transistores desarrollados en nuestro grupo se basan en la frecuencia como variable de barrido, en la presente comunicación solamente se introducirá en el simulador la parte del modelo que reproduce las curvas características tensión-corriente (I-V) de continua, así como su variación con la potencia óptica aplicada, dejándose el resto del modelo (curvas pulsadas y parámetros de scattering) como objetivo para posteriores trabajos.

## III. EL MODELO

Entre los diferentes modelos clásicos existentes en la bibliografía, se eligió el modelo DICOM [1] desarrollado con anterioridad por nuestro grupo por ser el adecuado para representar con fidelidad el comportamiento de dichos dispositivos. El esquema eléctrico del modelo de gran señal propuesto se muestra en la figura 1, dicho modelo es valido tanto para transistores MESFET como para transistores HEMT. Nótese que por tratarse de un modelo para DC se han omitido las inducciones parásitas Lg, Ld, Ls, así como las capacidades parásitas Cpgi y Cpdi.

Los modelos clásicos tales como el de Curtice, Materka, TOM "Trquint Own Model", etc., ofrecen, en general, buenos resultados en transistores de baja potencia, sin embargo no son capaces de responder de manera adecuada

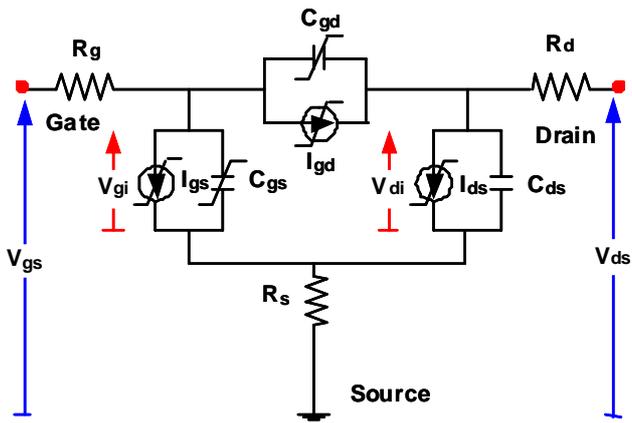


Fig 1. Modelo DICOM de gran señal para HEMT/MESFET bajo iluminación láser válido para DC.

para dispositivos HEMT de potencia. El modelo DICOM que ha sido seleccionado además de suplir esta carencia de los modelos precedentes es capaz de mostrar un fenómeno característico de los transistores HEMT: el fenómeno de compresión de transconductancia a medida que aumenta la tensión de puerta, que más tarde comprobaremos una vez implementado el modelo.

Este trabajo es una generalización del modelo de MESFET desarrollado por nuestro grupo [2-4] con importantes modificaciones en las fuentes de corriente  $I_{ds}$  e  $I_{gs}$  para dar cuenta el efecto de la iluminación óptica. La expresión para la fuente de corriente  $I_{ds}$  viene dada por (1) y cuyos parámetros más importantes se muestran en la tabla 1. El resto de las ecuaciones que componen el modelo han sido omitidas, puesto que han sido reportadas con anterioridad y una descripción detallada de las mismas puede encontrarse en [1].

$$I_{ds} = I_{dss} \cdot \left\{ \frac{a \cdot (V_{gi} - V_t) + \log \left\{ 2 \cdot \cosh \left[ a \cdot (V_{gi} - V_t) \right] \right\}}{2 \cdot a \cdot |V_t|} \right\}^{(E + K_e \cdot V_{gi})} \cdot (1 + S_s \cdot V_{di}) \cdot \tanh \left( \frac{S_l \cdot V_{di}}{1 - K_g \cdot V_{gi}} \right) + C \cdot V_{di}$$

$$\text{con: } V_t = V_{t0} + \gamma \cdot V_{di} \quad (1)$$

donde  $V_{gi}$  y  $V_{di}$  son los voltajes instantáneos,  $\gamma$ ,  $E$ ,  $S_l$ ,  $K_g$ ,  $a$  y  $b$  son constantes, e  $I_{dss}$ ,  $V_{t0}$ ,  $S_s$ ,  $K_e$ , y  $C$  son parámetros dependientes de la potencia óptica aplicada (PL) para poder ajustar el comportamiento de las curvas dinámicas I/V con la potencia óptica aplicada.

Las expresiones de la fuente de corriente mostrada en (1) utilizan como variables las tensiones anteriores internas del transistor  $V_{gi}$  y  $V_{di}$ , dichas tensiones son a su vez función de las tensiones aplicada externamente al dispositivo, estas son: la tensión gate-source y la tensión drain-source. La relación entre las mismas es la mostrada en (2) y (3).

$$V_{gi} = V_{gs} - I_d \cdot R_s \quad (2)$$

$$V_{di} = V_{ds} - I_d \cdot (R_d + R_s) \quad (3)$$

Parámetro	Significado físico	S.I.
$I_{dss}$	Corriente de drenador en saturación para $V_{gs}=0V$ .	A
$V_{t0}$	Tensión de estrangulamiento de canal.	V
$E$	Parámetro que describe la variación de la corriente de drenador en saturación.	-
$K_e$	Parámetro que describe la variación de la corriente de drenador en saturación.	$V^{-1}$
$S_s$	Pendiente de la corriente de drenador en saturación	$\Omega^{-1}$
$K_g$	Parámetro que describe la zona lineal	$V^{-1}$
$S_l$	Pendiente de la corriente de drenador en la zona lineal para $V_{gi}=0V$ .	$\Omega^{-1}$
$V_{pf}$	Tensión a partir de la cual comienza a degradarse la transconductancia	V
$\delta$	Parámetro de ajuste de la transconductancia.	-
$\gamma$	Parámetro de ajuste de la tensión umbral.	-
$a$	Parámetro de ajuste de la corriente de drenador.	$V^{-1}$
$C$	Parámetro de corrección de la corriente de drenador.	$\Omega^{-1}$

Tabla 1. Significado físico y unidades de los parámetros del modelo electro-óptico de MESFET-HEMT utilizado.

La dependencia con la potencia óptica aplicada PL al dispositivo viene dada por las siguientes expresiones:

$$C = C_1 \cdot PL \quad (4)$$

$$K_e = K_{e0} + K_{e1} \cdot PL \quad (5)$$

$$S_s = S_{s0} + S_{s1} \cdot PL^{S_s2} \quad (6)$$

$$V_{t0} = V_{t0_0} + V_{t0_1} \cdot PL^{V_{t0_2}} + V_{t0_3} \cdot PL \quad (7)$$

$$I_{dss} = I_{dss_0} + I_{dss_1} \cdot PL^{I_{dss_2}} + I_{dss_3} \cdot PL \quad (8)$$

Es de rigor resaltar la importancia de obtener con exactitud el valor de las resistencias parásitas del transistor, por su implicación en el valor de las tensiones intrínsecas; de la precisión con la que se haya obtenido sus valores dependerá el funcionamiento del modelo. Se ha podido comprobar a lo largo de este trabajo que un pequeño cambio de estos valores resistivos condiciona bastante el comportamiento de la corriente de drenador del dispositivo.

#### IV. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO EN SPICE

Una vez seleccionadas las ecuaciones necesarias para el correcto funcionamiento del circuito propuesto se ha procedido a la integración de las mismas en del simulador PSPICE versión de estudiante de ORCAD. Dicho tarea se ha estructurado en tres partes las cuales serán comentadas a continuación. Es necesario resaltar que para que la implementación del modelo sea válida en las versiones del simulador PSPICE, no se ha utilizado los esquemáticos, escribiéndose todas las librerías como ficheros de texto. En primer lugar, ha tenido que desarrollar una librería matemática denominada MATH.LIB la cual contiene una serie de sub-circuitos que implementan las funciones matemáticas más habituales (suma, resta, tangente hiperbólica, exponenciación, etc.), cuya documentación ya fue reportada en [4] y por lo no tiene caso repetirlo aquí. En segundo lugar, ha habido que definir cada uno de los sub-

circuitos que componen el modelo completo, como el correspondiente a la fuente de corriente  $I_{ds}$  (drain-source), el que modela la fuente de corriente  $I_{gs}$  (gate-source), el de la fuente de corriente  $I_{gd}$  (gate-drain) que describe el comportamiento del transistor en ruptura o "breakdown", así como los circuitos necesarios para modelar la capacidad no lineal  $C_{gs}$ , que acompaña a la fuente  $I_{gs}$ , y la capacidad lineal  $C_{gd}$  que acompaña a la fuente  $I_{gd}$ . A modo de ejemplo, en la Tabla 2 se muestra como se ha implementado la fuente de corriente no lineal  $I_{ds}$  bajo iluminación LASER en PSPICE, utilizando la ecuación (1), el contenido de dicho fichero se muestra en la figura 2.

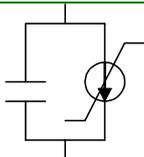
Fuente $I_{ds}$	Implementación
	<p>Se ha nombrado el subcircuito como: <i>IDS:OPTICO</i>.                      Posee 8 nudos, 6 de entrada y dos de salida.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•1 Nudos 1 y 2: Tensión de entrada <math>V_{gi}</math></li> <li>•2 Nudos 3 y 4: Tensión de entrada <math>V_{di}</math></li> <li>•3 Nudos 5 y 6: Corriente de salida</li> <li>•4 Nudos 7 y 8: Potencia óptica aplica PL.</li> </ul>

Tabla 2. Implementación del conjunto fuente de corriente  $I_{ds}$  mas capacidad Cds bajo iluminació láser como sub-circuito en el simulador PSPICE.

```

*****
* LIBRERIA MATEMATICA : IDS_OPTICO.LIB *
*****
.SUBCKT IDSOPTICO 1 2 3 4 5 6 7 8 PARAMS: GAMMA=-0.0689
KE=1.7999 SL=3.8200 KG=-1.3173 A=16 B=16
R11 1 0 1E12
R12 2 0 1E12
R13 102 0 1E12
EDIFF1 102 0 VALUE={V(1)-V(2)}
R21 3 0 1E12
R22 4 0 1E12
R23 304 0 1E12
EDIFF2 304 0 VALUE={V(3)-V(4)}
R31 7 0 1E12
R32 8 0 1E12
R33 708 0 1E12
EDIFF3 708 0 VALUE={V(7)-V(8)}
XKC 708 709 KC PARAMS: C1=0
XKKE 708 710 KKE PARAMS: KE0=-0.2988 KE1=0.0011
XSS 708 711 PARAMETROS PARAMS: K0=0.1241 K1=-0.0209
K2=0.2299 K3=0
XVTO 708 712 PARAMETROS PARAMS: K0=-0.4782 K1=-0.0192
K2=0.0271 K3=-0.0028
XIDSS 708 713 PARAMETROS PARAMS: K0=1.9238 K1=0.1518
K2=0.1785 K3=0.0055
XMU 713 714 KMUL PARAMS: KKMUL=1E-3
XMUL1 304 305 KMUL PARAMS: KKMUL={GAMMA}
XVT 305 712 306 SUMA
XRES1 102 306 307 RESTA
XMUL2 307 308 KMUL PARAMS: KKMUL={A}
VDCE 715 0 DC 2.718282
RDCE 715 0 1E12
XLOG 715 309 LOGDIEZ
XABS0 308 310 ABS
XMULT 309 310 311 MULTIPLICA2
XSUM1 311 308 312 SUMA
XABS1 306 313 ABS
XMUL4 313 314 KMUL PARAMS: KKMUL={B}
XMUL5 314 315 KMUL PARAMS: KKMUL=2.0
XDIV1 312 315 316 DIVIDE
XMUL6 102 710 103 MULTIPLICA2
XMUL7 103 104 P1 PARAMS: KAP1=1.0 KBP1={KE}
XELEVA 316 104 317 ELEVA
XMUL8 304 711 318 MULTIPLICA2
XMUL9 318 319 P1 PARAMS: KAP1=1 KBP1=1
XMUL10 304 320 KMUL PARAMS: KKMUL={SL}
XMUL11 102 321 KMUL PARAMS: KKMUL={KG}
XMUL12 321 322 P1 PARAMS: KAP1=-1 KBP1=1
XDIV2 320 322 323 DIVIDE
XTAN1 323 324 TANH
XMUL13 324 319 317 714 325 MULTIPLICA4
XMUL14 709 304 326 MULTIPLICA2
XSUM2 325 326 327 SUMA
XFIN 327 5 6 VTOI
.ENDS IDSOPTICO

```

Fig 2. Librería de PSPICE *IDS\_OPTICO.LIB* necesaria para simular el transistor MESFET/HEMT de microondas.

Aunque en este trabajo se muestra como introducir un modelo circuital de gran señal para el caso particular de un transistor FET de microondas bajo iluminación láser, el procedimiento puede ser generalizado para simular cualquier tipo de dispositivo electrónico que presente una característica I-V no lineal.

## V. RESULTADOS

A continuación se presentarán los resultados obtenidos mediante PSPICE para un transistores PHEMT de microondas de media potencia de la foundry PHILIPS de  $6 \times 150 \mu\text{m}$ , bajo condiciones de iluminación láser. En las figuras 3(a) y 3(b) se muestran los resultados obtenidos en PSPICE mediante el post-procesador gráfico PROBE para el transistor PHEMT de  $6 \times 150 \mu\text{m}$ . En la figura 3(a) puede apreciarse la variación de  $I_{ds}$  frente a  $V_{ds}$  con  $V_{gs}$  como parámetro, en condiciones de oscuridad ( $PL=0$ ) y en la figura 3(b) se muestra la corriente  $I_{ds}$  frente a  $V_{gs}$  con  $V_{ds}$  como parámetro cuando se ilumina el transistor con una potencia optica de  $PL=10\text{mW}$ .

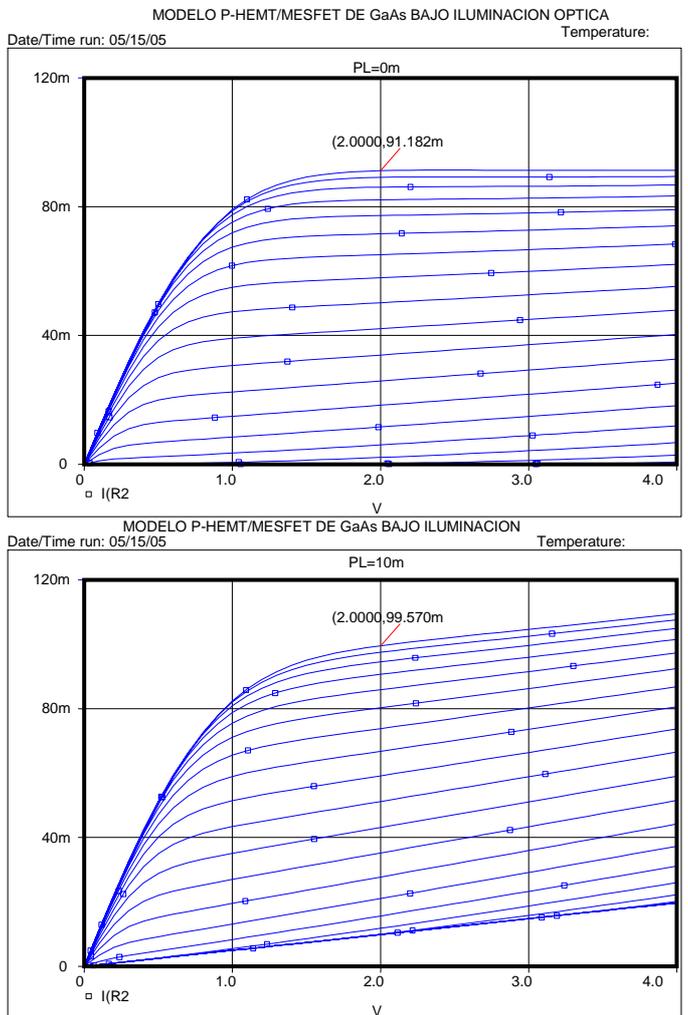


Fig 4. Resultados de la simulación con PSPICE para el transistor PHEMT de  $6 \times 150 \mu\text{m}$ .  
 (a) Curvas  $I_{ds}$  frente  $V_{ds}$  a  $V_{gs}$  constante con  $PL=0\text{mW}$ .  
 (b) Curvas  $I_{ds}$  frente  $V_{gs}$  a  $V_{ds}$  constante con  $PL=10\text{mW}$ .

En las figuras 4(a) y 4(b) se muestran se muestran los resultados obtenidos en PSPICE leídos directamente del fichero de salida *.OUT* de PSPICE mediante un pequeño

programa realizado en MATLAB comparados con las medidas experimentales realizadas en el laboratorio para el transistor PHEMT de PHILIPS de  $6 \times 150 \mu\text{m}$  en línea discontinua, tomándose los barridos en  $V_{gs}$  y  $V_{ds}$  en los mismos puntos que se habían medido experimentalmente en el laboratorio, para potencias óptica de  $0\text{mW}$  (oscuridad), y de  $10\text{mW}$ , respectivamente. En ambas figuras, se puede apreciar la perfecta concordancia entre los datos experimentales y los modelos desarrollados.

## VI. CONCLUSIONES

Se ha implementado un modelo circuital de gran señal bajo iluminación láser en el simulador PSPICE, extendiendo la utilización del citado simulador a modelos electro-ópticos de transistores de microondas. El método aquí presentado es generalizable a todo tipo de dispositivos no lineales activos o pasivos. Los resultados obtenidos concuerdan perfectamente con los valores experimentales, obteniéndose resultados similares a los obtenidos con simuladores de tipo balance armónico como Agilent ADS ó Microwave Office, incluyendo la compresión de la transconductancia. De esta forma utilizando una herramienta gratuita como es la versión de estudiante de PSPICE se pueden obtener con precisión las curvas I-V de transistores de microondas, bajo iluminación láser. Como futura línea de trabajo se plantea el desarrollo de nuevas rutinas que permitan obtener los parámetros de scattering para este tipo de dispositivos con PSPICE, utilizando el modelo completo [1]. Otra línea de trabajo consiste en la introducción de los modelos electro-térmicos para transistores LDMOS de microondas [11-12] de una forma análoga a como se ha introducido el modelo aquí presentado.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo esta parcialmente soportado por el Gobierno de Cantabria a través de un catrudo de I+D+i Invesnova-Sodercan y por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT) a través del proyecto CICYT-TIC2002-04084-C03-03. Además, los autores quieren agradecer al grupo de RF & Microondas de la Universidad de Cantabria, así como al proyecto NoE TARGET (1ST program of the EU under contract IST-1-707893-NOE) el soporte para la realización del presente trabajo.

## REFERENCIAS

- [1] A. Mediavilla, A. Tazón, J.L. García, T. Fernández, J.A. García, J.M. García, C. Navarro, J.M. Zamanillo. "Dynamic Properties and Modelling of Large Signal, Thermal, Optical and Intermodulation Effects in Microwave GaAs Devices", Invited paper on the IEEE MTT-S Workshop, Vol.1, Denver (USA). June 8-13 1997
- [2] J.M. Zamanillo, C. Navarro, C. Pérez-Vega, A. Mediavilla, and A. Tazón "Large Signal Model Predicts Dynamic Behavior of GaAs MESFET Under Optical Illumination". Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 29, No.1, pp 25-31. April 5 2001.
- [3] C. Navarro, J.M. Zamanillo, A. Mediavilla, A. Tazón, J.L. García, M. Lomer and J.M. López-Higuera. "An Accurate Photonic Capacitance Model for GaAs MESFET". IEEE Transactions on MTT, Vol 50, No. 4, pp 1193-1197, April 2002.
- [4] J. M. Zamanillo, C. Navarro, C. Pérez-Vega, J. A. García, A. Mediavilla and A. Tazón. "New Large Signal Model of AlGaAs P-HEMT and GaAs MESFET Under Optical Illumination". GaAs 2002, Applications Symposium Proceedings, pp.121-124. Milan, Italy. Sept. 2002.

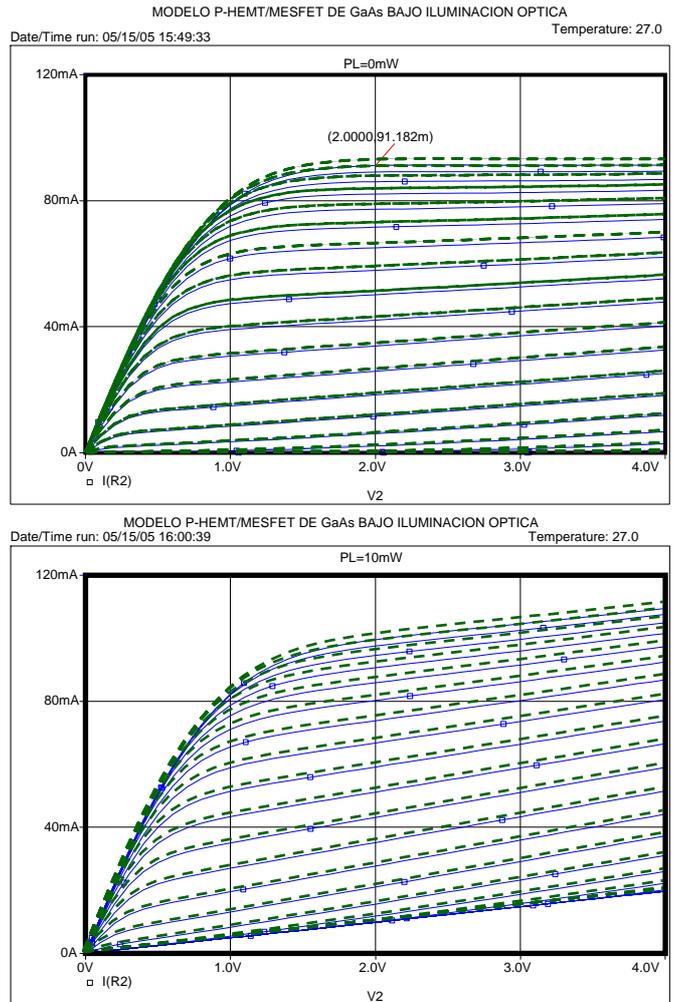


Fig 5. Gráficas comparativas realizadas en MATLAB a partir de los resultados obtenidos en PSPICE (línea continua) y las medidas experimentales realizadas en el laboratorio (línea discontinua) para el transistor HEMT de  $6 \times 150 \mu\text{m}$ .

(a)  $PL=0 \text{ mW}$  (b)  $PL=10 \text{ mW}$ .

- [5] J.M.Zamanillo, H.Ingelmo, C. Pérez-Vega. "Modelado de Transistores PHEMT de Microondas en SPICE", Actas en CD ROM de la Unión Internacional de Radio URSI, XIX Simposium Nacional ISBN 84-688-7736-0, Barcelona Septiembre de 2004.
- [6] J. M. Zamanillo, H.Ingelmo C. Pérez-Vega and A. Mediavilla. "Large-Signal PHEMT Transistor Model for SPICE based simulators". Book of Proceedings of TARGET Workshop on RF Power Amplifier, pp 65, 68. Orvieto, Italy, April 2005.
- [7] G. Massobrio, P. Antognetti "Semiconductor device modelling with SPICE". Mc Graw Hill 1993
- [8] J.M. Zamanillo, J. Portilla, C. Navarro, C. Pérez-Vega and A. Mediavilla, "Optical Control of a GaAs MMIC Amplifier at S Band". GaAs 2003 European Gallium Arsenide, Applications Symposium Proceedings, pp.117-120, Munich, Germany. Oct. 2003
- [9] J.M. Zamanillo, C. Navarro, J. Sáiz-Ipiña, C. Pérez-Vega and A. Mediavilla. "New Large Signal Electrical Model of GaAs MESFET Under Optical Illumination". GaAs 2001 European Gallium Arsenide, Applications Symposium Proceedings, pp.167-170, London, Sept-2001.
- [10] W. Curtice, J. Pla, D. Bridges, T. Liang, and E. Shumate, "A New Dynamic Electro-Thermal Nonlinear Model for Silicon RF LDMOS FETs," IEEE International Microwave Symposium Digest of Papers, 1999.
- [11] Motorola's Electro Thermal (MET) LDMOS Model, Motorola Internal Report. <http://mot-sps.com/models/ldmos/ldmosmodels.html>