# Estudio y Modelado de la Fiabilidad en Transistores GaN

Judit Arroyo<sup>(1)</sup>, Tomás Fernández<sup>(1)</sup>, Fernando Sánchez<sup>(2)</sup>, Marina Verdú<sup>(2)</sup>, Antonio Tazón<sup>(1)</sup>, Asmae Mimouni<sup>(1)</sup>

tomas.fernandez@unican.es, fsanchezs@oc.mde.es

<sup>(1)</sup> Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones. Universidad de Cantabria Avda. los Castros s/n, 39005, Santander

<sup>(2)</sup> Centro de Investigación y Desarrollo de la Armada, Dpto. de Investigación, Arturo Soria 289, 28033 Madrid

Abstract- In this paper, reliability prediction models will be proposed, from different measurements obtained in a Life Test using as test vehicle six GaN HEMT's from wafer AEC1147 provided by III-V Labs. The dependence on stress time of four different magnitudes have been studied (saturated current, gate-source biasing voltage, gate current and transconductance) when monitoring versus time at 175 °C channel temperature. As a result, mathematical expressions to simulate this dependence have been obtained. The aim of these models is to serve as a tool to circuit designers and manufacturers when studying failure mechanisms.

### I. INTRODUCCIÓN

La generación de potencia en altas frecuencias constituye un aspecto estratégico en los sistemas actuales y futuros de transmisión de la información tales como las aplicaciones, tanto militares como civiles, de telecomunicaciones o radar. Para frecuencias superiores a 3GHz, las tecnologías que compiten por el monopolio de la hiperfrecuencia son los PHEMT de GaAs, HBT de GaAs y HEMT de GaN. Mientras que las dos primeras se pueden considerar maduras, la tercera, por el contrario, está todavía en proceso de desarrollo en Europa. El proyecto europeo KORRIGAN pretende dotar a Europa de esta tecnología con la aspiración de poder concebir circuitos MMIC en el horizonte del año 2009.

El análisis de los principales criterios tecnológicos (físicos y eléctricos) de los materiales de gran banda prohibida, y especialmente del Nitruro de Galio, GaN, muestra que este es un serio candidato para las aplicaciones de telecomunicaciones y radar. La emergencia de la tecnología GaN podría suponer un punto de inflexión en el dominio de la potencia en hiperfrecuencia (3-20 GHz) ampliando las fronteras alcanzadas hasta el momento en este campo e incluso llegando a desbancar a las tecnologías hasta hoy utilizadas.

Teniendo en cuenta el estado actual en Europa de la tecnología GaN, se hace necesario establecer todo un protocolo y posterior modelado de la fiabilidad que ésta presente en términos de tiempo de operación, estrés térmico,

etc. Así, en este artículo se aborda la caracterízación y posterior modelado de las magnitudes que se consideran fundamentales en términos de fiabilidad, para transistores GaN [1]. Los resultados obtenidos han sido usados dentro del proyecto Europeo Korrigan en el paquete de trabajo correspondiente al estudio de la fiabilidad para la predicción del comportamiento de los dispositivos diseñados.

# II. MEDIDAS LLEVADAS A CABO EN EL TEST DE FALLOS

Partiendo de medidas en un Test de Fallos, realizadas por III-V Labs sobre seis dispositivos HEMT diferentes de la oblea AEC-1147, se ha estudiado la dependencia de con el tiempo de cuatro magnitudes del transistor representativas de la influencia de este tipo de pruebas sobre la tecnología. GaN. Estas magnitudes son la corriente de saturación de drenador, *Idss*, la tensión de polarización gate-source, *Vgs*, la corriente de gate, Ig, y la transconductancia, gm.

Para realizar el test, se sometió a los dispositivos a un envejecimiento dado por una temperatura de operación de 175 °C y una polarización, para todos ellos, de Vds=25V e Ids=250 mA durante un mínimo de 2500 horas.

En la Tabla 1 se presenta un resumen de los dispositivos medidos, así como el tiempo de medida utilizado en cada uno de ellos y las magnitudes caracterizadas.

Dispositivo	Duración Test	Magnitudes Medidas
10005	4791 horas	$\Delta Idss$ (%), $V_{GS}$ , $I_{GS}$ y $g_m$
N1 y N8	2400 horas	$\Delta Idss$ (%), $V_{GS}$ , $I_{GS}$ y $g_m$
N2	2843 horas	$\Delta Idss$ (%), $V_{GS}$ , $I_{GS}$ y $g_m$
N3 y N10	2959 horas	$\Delta Idss$ (%), $V_{GS}$ , $I_{GS}$ y $g_m$

Tabla 1. Resumen de las medidas realizadas sobre los diferentes dispositivos.

# III. MODELADO DE LA REDUCCIÓN DE LA CORRIENTE DE SATURACIÓN

Observando las medidas de la Reducción de la Corriente de Saturación  $\Delta I_{DSS}$  (%) con el tiempo de estrés, el comportamiento parece seguir una evolución función de la raíz cuadrada del tiempo. Basándose en este comportamiento, para el ajuste del modelo se utilizó la solución propuesta por Chou. et Al. [2], mostrada en la ecuación (1).

$$\Delta Idss(\%) = S_0 \cdot \exp\left(\frac{-0.83}{KT_{channel}}\right) \sqrt{t}$$
<sup>(1)</sup>

donde  $S_0$  es un parámetro asociado a la tecnología (HEMT de GaN en este caso) y a la temperatura de canal del dispositivo, K es la constante de Boltzman,  $8,625 \cdot 10^{-5}$  eVK<sup>-1</sup>,  $T_{channel}$  la temperatura de canal y -0,83 es el valor de la energía de activación propuesta por Chou et. Al. para los HEMT de GaAs.  $S_0$  puede obtenerse a partir de la ecuación (1) conocida la  $T_{channel}$  y tomando una muestra de tiempo representativa de la evolución de la corriente [2].

	S <sub>0</sub> (%·horas <sup>-1/2</sup> )	Ea (eV)
TR10005	-1.0315e+023	-0.82604
TRN1	-1.0363e+023	-0.82335
TRN2	-1.0373e+023	-0,82587
TRN3	-1,0377e+023	-0,8250
TRN8	-1,0453e+023	-0,82492
TRN10	-1,0276e+023	-0,83023

Tabla 2. Parámetros obtenidos para los diferentes dispositivos en el modelado de la reducción de la corriente de saturación.

Como ejemplo, en las Figuras 1 y 2 se presentan los resultados obtenidos para los dispositivos N3 y N8, mostrándose el excelente grado de precisión obtenido.



Fig. 1. Comparación entre el modelo de la reducción de la corriente de saturación y los resultados de medida



Fig. 2. Comparación entre el modelo de la reducción de la corriente de saturación y los resultados de medida

# IV. MODELADO DE LA REDUCCIÓN DE LA TENSIÓN DE POLARIZACION GATE-SOURCE

Para llevar a cabo el ajuste de los datos proporcionados por III-V Labs, en este caso se optó por utilizar una ecuación polinómica, mostrada en (2). El motivo fundamental para elegir esta expresión es la fuerte dispersión en el comportamiento que muestran los dispositivos, lo que se traduce fundamentalmente en grandes diferencias, desde un punto de vista microscópico, en las características tensión frente a tiempo.

$$Vgs = Vgs_{t0} + Vgs_{1}(t - t_{0}) + Vgs_{2}(t - t_{0})^{2} + Vgs_{3}(t - t_{0})^{Vgs_{4}}$$
(2)

En la Tabla 2, se muestra el valor de los parámetros de la ecuación (2) para los diferentes dispositivos considerados. En las figuras 3 y 4, se presentan comparaciones entre los resultados medidos y los modelados obtenidos a partir de la ecuación (2).

	Vgs <sub>1</sub> (V/hora)	Vgs <sub>2</sub> (V/hora <sup>2</sup> )	Vgs <sub>3</sub> (V/hora <sup>Vgs4</sup> )	Vgs4
TR10005	-3.59E-04	4.52E-08	6.46E-02	2.46E-01
TRN1	-4.48E-04	1.27E-07	1.00E-01	2.50E-02
TRN2	-3.71E-04	1.25E-07	1.28E-01	6.34E-02
TRN3	-1.02E-04	3.43E-08	5.39E-02	2.47E-01
TRN8	1.90E-01	-3.04E-07	-2.00E-01	9.93E-01
TRN10	-7.69E-05	4.10E-08	3.98E-02	2.21E-15

Tabla 3. Parámetros obtenidos para los diferentes dispositivos en el modelado de la reducción de la tensión de polarización gate-source



Fig. 3. Comparación entre el modelo de la reducción de la tensión de polarización y los resultados de medida. Dispositivo N2

#### V. MODELADO DE LA EVOLUCION DE LA CORRIENTE DE GATE

A la vista de las medidas proporcionadas, para este caso particular se ha optado por una dependencia exponencial, dada por la ecuación (3).

$$I_{GS} = IGS_1 \cdot e^{IGS_2 \cdot t} + IGS_3 \cdot e^{IGS_4 \cdot t}$$
(3)

donde IGS1, IGS2, IGS3 e IGS4 son los parámetros a obtener.



Fig. 4. Comparación entre el modelo de la reducción de la tensión de polarización y los resultados de medida. Dispositivo N3.

En la tabla 4, se muestra el valor de los parámetros, para los distintos, dispositivos, obtenidos mediante un proceso de optimización.

	Igs <sub>1</sub> (A)	$Igs_2$ (horas <sup>-1</sup> )	Igs <sub>3</sub> (A)	$Igs_4$ (horas <sup>-1</sup> )
TR10005	-1.34E-03	7.51E-05	1.32E-03	-2.50E-03
TRN1	-1.44E-03	1.18E-04	1.19E-03	-6.42E-03
TRN2	-4.01E-04	-1.86E-05	3.75E-04	-2.17E-03
TRN3	-8.98E-04	-9.85E-05	8.14E-04	-3.42E-03
TRN8	-2.34E-03	1.11E-04	2.15E-03	-1.41E-02
TRN10	-1.26E-03	-3.23E-05	1.26E-03	-8.79E-03

 Tabla 4. Parámetros obtenidos para los diferentes dispositivos en el modelado de la evolución de la corriente de gate.

Las figuras 5 y 6 ponen de manifiesto que la ecuación propuesta es capaz de dar cuenta de forma apropiada de la evolución temporal de corriente de gate.



Fig. 5. Comparación entre el modelo de la evolución de la corriente de gate y los resultados de medida. Dispositivo N3



Fig. 6. Comparación entre el modelo de la evolución de la corriente de gate y los resultados de medida. Dispositivo N10

#### VI. MODELADO DEL DECREMENTO DE LA TRANSCONDUCTANCIA

La transconductancia en transistores MESFET y HEMT está íntimamente relacionada con la ganancia en pequeña señal de los mismos. Las medidas frente al tiempo de la evolución de este parámetro, puso de manifiesto que se podían encontrar variaciones importantes del mismo, lo que hace de vital importancia tener caracterizada la misma.

La ecuación que se propone para modelar la variación temporal de la transconductancia viene dada por:

$$\Delta g_m(\%) = 100 \cdot \left( Gm_{t0} + Gm_1(t - t_0) + Gm_2(t - t_0)^2 + Gm_3(t - t_0)^{Gm_4} \right)$$
(4)

donde  $Gm_{t0}$  es el valor medido de la transconductancia en el instante inicial,  $t_0$  es el valor del instante inicial (horas) y  $G_{m1}$ ,  $G_{m2}$ ,  $G_{m3}$  y  $G_{m4}$  son los parámetros de la ecuación que describen el comportamiento de la expresión.

En la tabla 5 se muestra el valor de los diferentes parámetros de la expresión (4) para los diferentes dispositivos bajo test.

	Gm <sub>1</sub>	Gm <sub>2</sub>	Gm <sub>3</sub>	Crrr
	(1/hora)	(1 /hora <sup>2</sup> )	(1/hora <sup>Gm4</sup> )	Gm4
TR10005	-4.12E-03	9.35E-09	4.14E-03	9.97E-01
TRN1	-1.07E-04	1.42E-08	2.12E-03	2.93E-01
TRN2	-6.71E-05	4.37E-09	1.88E-02	1.32E-17
TRN3	-1.34E-05	1.12E-09	-4.64E-03	3.09E-01
TRN8	2.31E-03	-1.20E-08	-4.21E-03	9.28E-01

 Tabla 5. Parámetros obtenidos para los diferentes dispositivos en el modelado de la disminución de la transconductancia.

Como en casos anteriores, el grado de precisión que se logra en términos de predicción de la evolución temporal de la transconductancia pone de manifiesto que la ecuación elegida responde al comportamiento medido, como se puede apreciar en las comparaciones entre medidas y modelos de las gráficas 7 y 8.



Fig. 7. Comparación entre el modelo del decremento de la transconductancia y los resultados de medida. Dispositivo N1



Fig. 8. Comparación entre el modelo del decremento de la transconductancia y los resultados de medida. Dispositivo 10005.

## VII. CONCLUSIONES

Para la Corriente de Saturación  $\Delta I_{dss}(\%)$ , se ha obtenido una expresión similar a la propuesta por Chou et. Al. [4]. Desde un punto de vista físico, este tipo de comportamiento se asocia en la tecnología GaAs a la evolución de la degradación de tipo interdifusión del metal del transistor en el canal [2], siendo esto un punto a ser confirmado en la tecnología GaN. Resultaría de interés [2] la realización de nuevos test de fallos a elevadas temperaturas para establecer la degradación de la Corriente de Saturación y de la Transconductancia cubriendo un mayor número de condiciones de operación.

Considerando la evolución de la Tensión Puerta-Fuente  $V_{gs}$  así como de la Corriente de Puerta  $I_g$ , se han propuesto dos expresiones diferentes para simular su dependencia con la duración del test, mostrando muy buenos resultados en términos de predicción.

En cuanto a la Transconductancia, se ha llegado a los mismos resultados que en la literatura consultada [16]. Estudiando la fiabilidad, el origen físico de la degradación de la Transconductancia  $g_m$  podría deberse a varios fenómenos como la degradación óhmica, la modificación de la carga de

la superficie o la calidad del material. En cualquier caso, la mayoría de estos fenómenos están en estos momentos sometidos a estudio y/o necesitan ser verificados en el futuro. Igualmente se ha propuesto una expresión de ajuste con muy buenos resultados en términos de predicción.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren hacer constar su agradecimiento al proyecto EDA KORRIGAN (RTP 102.052), dentro del cual se han obtenido y desarrollado todos los resultados que se presentan en este artículo.

#### REFERENCIAS

- [1] Y. C. Chou, D. Leung, Q. Kan, M. Biedenbender, D. Eng, R. Lai, T. Block, and A. Oki, "Reliability Model for Predicting Long-Term DC/RF Performance in GaAs PHEMTs," *IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symp. Digest*, pp. 248-251, Nov. 2005.
- [2] Y.C. Chou, D. Leung, I. Smorchkova, M. Wojtowicz, R. Grundbacher, L. Callejo, Q. Kan, R. Lai, P.H. Liu, D. Eng, A. Oki, "Degradation of AlGaN/GaN HEMTs under elevated temperature lifetesting", Microelectronics Reliability 44 (2004) 1033–1038, Elsevier.
- [3] Dimitris Pavlidis, Pouya Valizadeh and S. H. Hsu," AlGaN/GaN High Electron Mobility Transistor (HEMT) Reliability", 13th GAAS Symposium - Paris, 2005, pp.265-268
- [4] Y.C.Chou, D.Leung, Q.Kan, M.Biedenbender, D.Eng, R.Lai, T.Block, and A.Oki, "Reliability Model for Predicting Long-Term DC/RF Performance in GaAs PHEMTs", pp. 248-251, IEEE 2005.