

# ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DEL EFECTO KINK EN TRANSISTORES HEMT DE GaN

Asmae Mimouni<sup>(1)</sup>, Tomás Fernández<sup>(1)</sup>, Antonio Tazón<sup>(1)</sup>, Fernando Sánchez<sup>(2)</sup>, Marina Verdú<sup>(2)</sup>, Mohamed Boussouis<sup>(3)</sup>

ami27@alumnos.unican.es, 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

<sup>(3)</sup>Dpt. de physique Université Abdel Malek Essaadi, Tetouan, Maroc

**Abstract-** Using as test vehicles virgin and aged GaN HEMT devices, a study of the kink effect evolution with the applied electric field and ambient temperature has been performed. The obtained results lead to a physics explanation of the kink effect origin as well as its dependence on ambient temperature. Experimental results, showing the different effects taking place in the transistor, will be reported for several GaN devices operating at different electric field and temperature conditions.

## I. INTRODUCCION

Los transistores HEMT AlGaIn/GaN son los candidatos más prometedores para aplicaciones que requieran altos niveles de potencia de salida y alta frecuencia de operación [1]. Sin embargo, desde el punto de vista de fiabilidad, existen toda una serie de efectos, asociados a defectos basados en estados trampa, etc., como el colapso de corriente y el efecto kink que limitan la operación real de dichos dispositivos.

En particular, el efecto kink se manifiesta como un aumento brusco de la corriente de drenador para una tensión determinada de este terminal. Esto causa un aumento de la conductancia de salida  $g_{ds}$  y una disminución de la corriente de fugas de la puerta  $I_g$ . Aunque en distintos trabajos se trata este efecto en dispositivos construidos sobre distintos substratos InAlAs/InGaAs [3] - [4], AlGaAs/GaAs [5] o AlGaIn/GaN [6] [7], no hay un acuerdo definitivo sobre su origen y los fenómenos físicos implicados en la aparición del mismo; algunas explicaciones de esto efecto se atribuyen a la acumulación de huecos generada por ionización por impacto [3], [8], en particular en semiconductores de gap estrecho como Si o GaAs, (dónde la ionización por impacto es más probable). En lo referente a AlGaIn/GaN la ionización por impacto fue observada por Brar [9] y relacionada también con el origen del efecto de kink.

En este trabajo se comienza por hacer una descripción de algunos fenómenos físicos involucrados en el efecto kink, para posteriormente analizar desde un punto de vista eléctrico la presencia de este fenómeno. De la misma manera se estudia la dependencia del efecto kink con la temperatura externa lo que permite llegar a las conclusiones presentadas.

## II. El fenómeno de ionización por impacto

Este fenómeno aparece cuando el campo eléctrico es lo suficientemente intenso como para proporcionar a los portadores una energía muy superior a la energía térmica de la red (a este portador se le denomina “caliente”). En un impacto con un átomo de la red del material, se le podrá eventualmente arrancar un electrón, creando así un par electrón-hueco e ionizando este átomo. En un semiconductor, este fenómeno se traduce en términos de energía en el paso de un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción. La situación se muestra en la figura 1.

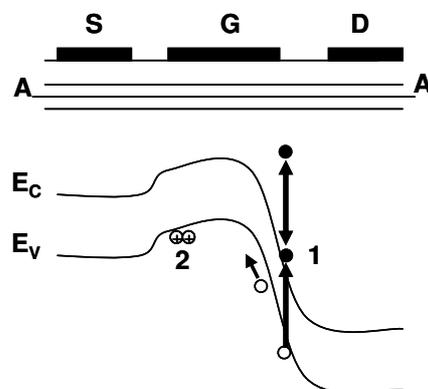


Fig. 1. Esquema de diagrama de energía a lo largo del canal.

En la situación representada en la figura 1, un electrón en la posición 1, a resultas de la ionización por impacto, genera un par electrón-hueco. El hueco generado a resultas del impacto se mueve hacia la source, a lo largo del canal, hasta llegar a la posición 2. El hueco generado en 2 representa una carga positiva que hace disminuir la barrera de potencial, con el incremento derivado de la corriente de drenador. Por otra parte, los huecos en la posición 2, fluyen hacia la puerta, negativamente cargada, contribuyendo a la corriente de puerta [9].

### III. Análisis eléctrico del efecto kink

Para confirmar la teoría que justifica el efecto kink, se llevan a cabo una serie de medidas en DC a tres temperaturas diferentes ( $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) sobre transistores HEMT AlGaIn/GaN ( $8\times 75$  micras) vírgenes y transistores HEMT AlGaIn/GaN ( $8\times 75$  micras) sometidos a un envejecimiento eléctrico y térmico en un test de fallos por III-V Lab. En las figuras 2 y 3 se muestra la presencia del efecto kink para el transistor envejecido a la temperaturas  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  respectivamente.

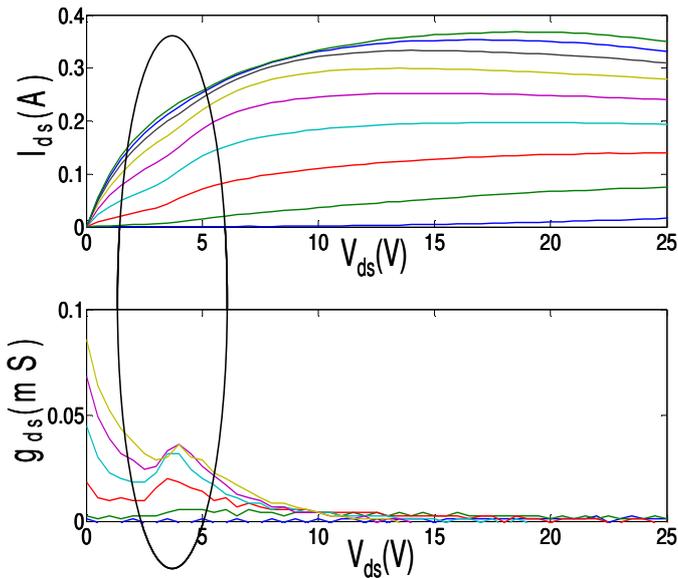


Fig. 2. Medida del efecto kink para el transistor envejecido a  $T=27\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

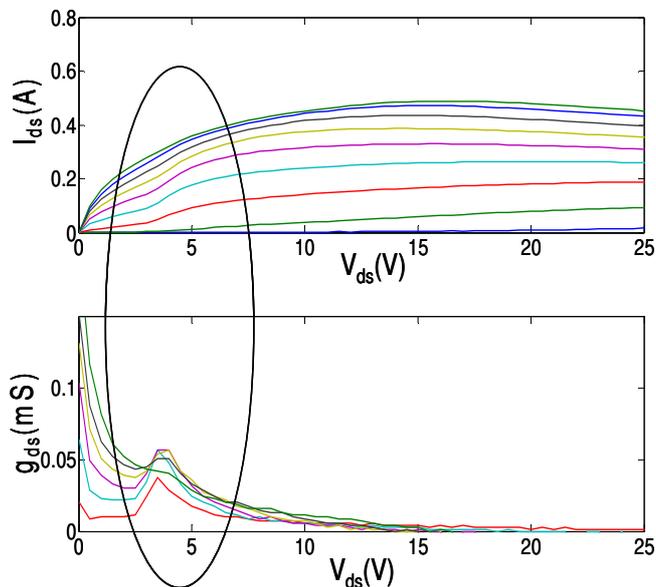


Fig. 3. Medida del efecto kink para el transistor envejecido a  $T=-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Observando la corriente  $I_{ds}$  para el transistor HEMT AlGaIn/GaN ( $8\times 75$ ) envejecido, a ambas temperaturas, se aprecia la aparición del aumento brusco de la corriente  $I_{ds}$  para tensiones superiores a la tensión de pinch-off, lo que causa un aumento de la conductancia de salida a la misma tensión del drenador.

Por otra parte se observa que el efecto de kink es más visible a temperaturas bajas ( $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), lo que está de acuerdo con trabajos existentes [11]. Como se ha dicho, el efecto kink se relaciona con el fenómeno de ionización por impacto debido a lo cual, un aumento de la temperatura puede ofrecer una energía suficiente a los electrones atrapados en los niveles intermedios entre la banda de valencia y la de conducción como para que salten a la banda de conducción y, por lo tanto, participen en la conducción aumentando, de esta forma, el valor de la corriente  $I_{ds}$ .

En la figura (4) se presenta la corriente de drenador,  $I_{ds}$ , para los dos transistores HEMT de AlGaIn/GaN, virgen y envejecido a la temperatura ( $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Se observa el efecto kink para los dos dispositivos para un mismo valor de la tensión  $V_{ds}$ , observándose también la disminución en la corriente  $I_{ds}$  para el transistor envejecido, a resultados del proceso de envejecimiento térmico y eléctrico. Esto pone de manifiesto la dependencia de los niveles trampa con los procesos de degradación debidos a dicho envejecimiento.

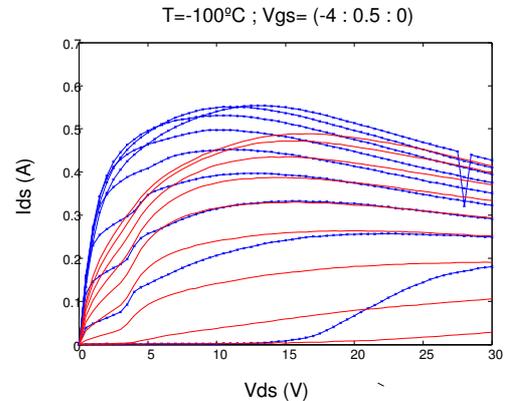


Fig. 4. Comparación de la corriente  $I_{ds}$  para los transistores virgen (líneas con puntos) y envejecido (líneas continuas) a  $T=-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Uno de los comportamientos anómalos que se observa en transistores HEMT de tipo GaN, y en particular en los dispositivos medidos, es el aumento de la corriente de fugas en la puerta. Algunos autores [12] atribuyen la presencia de esta corriente de fugas a la generación de huecos como consecuencia del proceso de *ionización por impacto*. Ya se explicó sobre la figura 1 que los huecos producidos se ven atraídos también hacia la puerta cargada negativamente. Las figuras 5 y 6 presentan la corriente de fugas en la puerta en función de  $V_{ds}$  y  $V_{gs}$  para los transistores estudiados a la temperatura  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

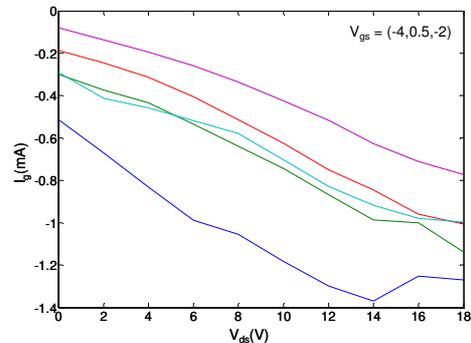


Fig. 5. Corriente de fugas en la puerta para el transistor virgen a  $T=27\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $V_{gs}$  desde  $-4\text{ V}$  hasta  $-2\text{ V}$  con paso de  $0.5\text{ V}$ .

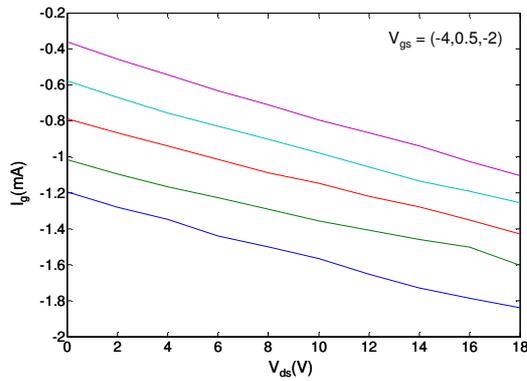


Fig. 6. Corriente de fugas en la puerta para el transistor envejecido a  $T=27^{\circ}\text{C}$ ;  $V_{gs}$  desde  $-4\text{ V}$  hasta  $-2\text{ V}$  con paso de  $0.5\text{ V}$ .

#### IV. Evolución del Efecto kink con la Temperatura

Para observar la evolución a altas temperaturas del efecto kink, se han llevado a cabo medidas I/V en régimen de DC y RF sobre transistores HEMT AlGaIn/GaN, sometidos a altas temperaturas de operación [12]; en este trabajo se indica que en este tipo de dispositivos, el efecto kink se debe principalmente a la presencia de estados energéticos trampa. En las figuras 7 y 8 se presenta el comportamiento medido, para los transistores bajo test (virgen y envejecido respectivamente), de la corriente de salida  $I_{ds}$  medida a la temperatura  $70^{\circ}\text{C}$ .

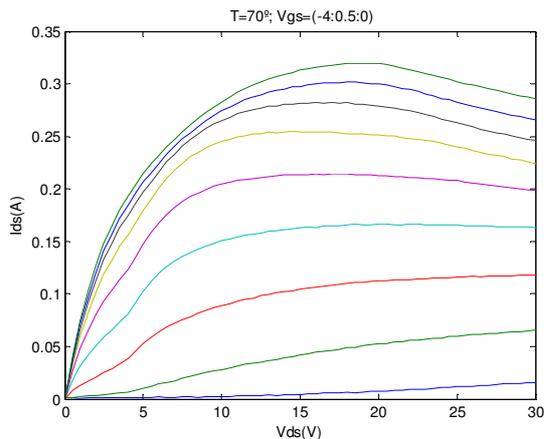


Fig. 7. Corriente  $I_{ds}$  para el transistor virgen a  $T=70^{\circ}\text{C}$ ;  $V_{gs}$  desde  $-4\text{ V}$  hasta  $0\text{ V}$  con paso de  $0.5\text{ V}$ .

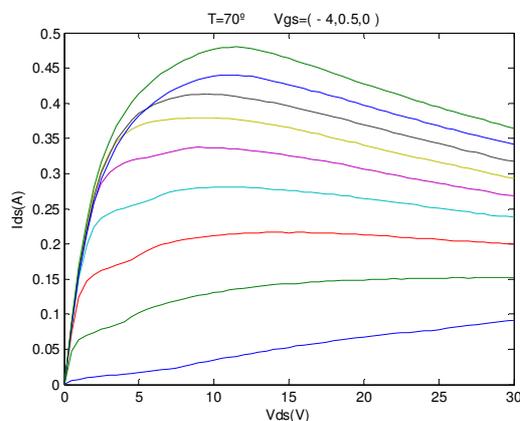


Fig. 8. Corriente  $I_{ds}$  para el transistor envejecido a  $T=70^{\circ}\text{C}$ ;  $V_{gs}$  desde  $-4\text{ V}$  hasta  $0\text{ V}$  con paso de  $0.5\text{ V}$ .

De la observación de las gráficas 7 y 8, se extrae la conclusión de que el efecto kink tiene poca relevancia para valores altos de temperatura, y especialmente para el transistor envejecido ya que este transistor se ha sometido a temperaturas muy elevadas ( $300^{\circ}\text{C}$ ) en el proceso de envejecimiento lo que conlleva que la presencia de niveles trampa se minimiza, a resultados del aumento de la temperatura.

#### IV. Conclusiones

Se ha llevado a cabo medidas encaminadas a identificar el efecto kink en dispositivos HEMT GaN. Para ello se han realizado medidas sobre dos dispositivos distintos, uno virgen y otro envejecido, a tres temperaturas diferentes ( $-100^{\circ}\text{C}$ ,  $27^{\circ}\text{C}$ ,  $70^{\circ}\text{C}$ ).

Desde un punto de vista físico se ha presentado un estudio detallado sobre las causas del efecto kink, encontrándose el origen del mismo en la acumulación de huecos producida por efecto de la ionización por impacto a bajas temperaturas. También se ha investigado sobre la relación entre el efecto kink y la presencia de estados trampa para altos valores de temperatura ambiente.

La presencia del efecto kink en los dispositivos bajo estudio se manifiesta como un aumento brusco de la corriente de drenador para tensiones superiores a la de pinch-off, lo que causa un aumento de la conductancia de salida para una tensión de drenador determinada. Para valores altos de temperatura ( $70^{\circ}\text{C}$ ) el efecto kink tiene menor incidencia especialmente para el transistor envejecido lo que es atribuible a la presencia de niveles trampa.

#### 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] U. K. Mishra, P. Parikh, and Y.-F. Wu, "AlGaIn/GaN HEMTs—An overview of device operation and applications," *Proc. IEEE*, vol. 90, no. 6, pp. 1022–1031, Jun. 2002.
- [2] A. Matulionis, J. Liberis, L. F. Eastman, and Y. J. Sun, "Drift Velocity Saturation and Hot-Phonon Disintegration in AlGaIn/AlN/GaN Channels," in *Proc. WOCSDICE*, A. Porch, R. Perks, and V. Morgan, Eds., Cardiff, U.K., 2005, pp. 71–72.
- [3] J. Deng, R. Gaska, M. S. Shur, M. A. Khan, and J. W. Yang, "Negative Differential Conductivity in AlGaIn/GaN HEMT: Real Space Charge Transfer from 2D to 3D States?" *Mrs Internet J. Nitride Semicon.*, vol. Res.5S1 W4.5, 2000.
- [4] P. M. Fabis and H. Windischmann, "Thermal Management Enhancement for GaAs Devices Using CVD Diamond Heat Spreaders in a Plastic Package Environment," *Journal of Electronic Packaging*, vol. 122 Issue 2, pp. 92–97, 2000.
- [5] R. Aubry, "Etude des Aspects Electrothermiques de la Filière HEMT AlGaIn/GaN pour les Applications de Puissance Hyperfréquence," Ph.D. dissertation, Université de Lille, France, 2001.

- [6] S. M. Sze, *Semiconductor Devices - Physics and Technology*, Wiley, Ed., 1985.
- [7] M. S. Shur, "GaN and Related Materials for High Power Applications," in *Symposium Proceedings of Material Research Society, Symposium E, Fall 1997*.
- [8] S. L. Delage, M. A. Poisson, C. Brylinski, and H. Blanck, "Composant Semiconducteur avec Dissipateur Thermique Intégré," 25 Juillet 1995.
- [9] B. Brar, K. Boutros, R. E. DeWames, V. Tilak, R. Shealy, and L. Eastman, "Impact ionization in high performance AlGaN/GaN HEMTs," in *Proc. IEEE Lester Eastman Conf., 2002*, pp. 487–491.
- [10] Tatsushi Akazaki, Hideaki Takayanagi, and Takatomo Enoki, Member, IEEE "Kin Effect in an InAs-Inserted-Channel InAlAs/InGaAs Inverted HEMT at Low Temperature" *IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS*, VOL. 17, NO. 7, JULY 1996
- [11] R. Cuervo, Y. Pei, Student Member, IEEE, Z. Chen, Senior Member, IEEE, S. Keller, S. P. DenBaars, Fellow, IEEE, F. Calle, and U. K. Mishra, Fellow, IEEE "The Kink Effect at Cryogenic Temperatures in Deep Submicron AlGaN/GaN HEMTs" *IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS*, VOL. 30, NO. 3, MARCH 2009