

Mecánica Computacional Vol XXXVII, págs. 1361-1371 (artículo completo)
Efectos Termomecánicos en Transistores MOSFET Trench Inducidos por Quemado por Evento Único (Eds.)
Santa Fe, 5-7 Noviembre 2019

**SINGLE EVENT BURNOUT THERMOMECHANICALS EFFECTS INDUCED IN
POWER TRENCH MOSFETS**

Gabriela Peretti^{a,b}, Eduardo A. Romero^{a,b}, Gustavo L. Demarco^a y Carlos E. Tais^a

^a*Grupo de Estudio de Calidad en Mecatrónica, Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Villa María, Avda. Universidad 450, 5900 Villa María, Argentina, gecam@frvm.utn.edu.ar*

^b*Grupo de Desarrollo Electrónico e Instrumental, Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Matemática, Astronomía y Física, Medina Allende S/N, Ciudad Universitaria, Córdoba Argentina, gperetti@famaf.unc.edu.ar*

Palabras clave: MOSFET trench, quemado por evento único, modelado de dispositivos de potencia

Resumen. Los transistores MOSFET de potencia son susceptibles al fenómeno de quemado por evento único (SEB, single event burnout). El fenómeno SEB se caracteriza por generar un rápido aumento de la temperatura por efecto Joule, que conduce a una falla catastrófica si no se implementa alguna estrategia de protección. Los autores de este trabajo analizaron los efectos termo-mecánicos que ocurren en un transistor DMOS luego de un SEB. Se mostró que, bajo determinadas condiciones, el mecanismo dominante de falla es la superación de los valores máximos admisibles de tensión mecánica en las capas metálicas y no la fusión de las mismas como había sido postulado por otros autores. Recientemente se ha comenzado a explorar SEBs en MOSFETs trench. Estos dispositivos presentan, respecto de los DMOS, tamaño reducido, menor resistencia en conducción y mayor capacidad de manejo de corriente. En este trabajo se estudian por primera vez los efectos mecánicos y térmicos que se presentan en un MOSFET trench durante un proceso SEB, por medio del método de elementos finitos. Se establecen las capas que alcanzan el punto de fusión o bien presentan valores críticos de tensiones mecánicas.

Keywords: Trench MOSFET, Single Event Burnout, Power Device Modelling.

Abstract. Power MOSFET transistors are susceptible to the phenomenon of Single Event Burnout (SEB). The SEB phenomenon is characterized by a rapid increase in temperature due to the Joule effect, which leads to a catastrophic failure if no protection strategy is implemented. The authors of this work analyzed the thermo-mechanical effects that occur in a DMOS transistor after a SEB. It was shown that, under certain conditions, the dominant mechanism of failure is the exceeding of the maximum admissible values of mechanical stress in the metal layers and not the fusion of them, as had been postulated by other authors. Recently, SEB has begun to be explored in trench MOSFETs. These devices have, compared to the DMOS, a reduced size, lower resistance in on state, and higher current handling capacity. In this work, is studied for the first time the mechanical and thermal effects that occur in a MOSFET trench during a SEB process, using the finite element method. Layers that reach the melting point or have critical values of mechanical stresses are established.

1 INTRODUCCIÓN

Los transistores de potencia MOSFETs resultan vulnerables al quemado por evento único (SEB, Single Event Burnout), inducido por iones de alta energía. El fenómeno SEB se caracteriza por disparar la conducción de un transistor bipolar parásito inherente en la estructura del MOSFET. En determinadas condiciones de polarización, se puede generar una alta densidad de corriente en el dispositivo con el consecuente rápido aumento de la temperatura por efecto Joule. El efecto conduce a una falla catastrófica si no se implementa alguna estrategia de protección.

Si bien este efecto es dominante en medioambientes ricos en radiación ionizante, fundamentalmente el espacial, también puede presentarse en alturas relativamente bajas (Hands et al. 2011). Esto ha motivado el desarrollo de mecanismos de mitigación que contribuyan a mantener en servicio al sistema que presentó una falla de tipo SEB. Sin embargo, para diseñar estos sistemas, es necesario comprender adecuadamente la dinámica de la falla producida por este fenómeno. Esta es dependiente de las tecnologías y topologías utilizadas para la fabricación de los dispositivos MOS, las cuales son muy diversas. Este hecho complica el estudio, siendo necesaria una investigación caso por caso.

El efecto SEB en transistores de potencia fue publicado por primera vez en 1986 (Waskiewicz et al. 1986). Otros trabajos pueden encontrarse en (Fischer 1987; Wrobel et al. 1986; Titus y Jamiolkowski 1989; Calvel et al. 1991; Stassinopoulos et al. 1992; Kuboyama et al. 1992; Reed et al. 2003)

El mecanismo de falla propuesto por estos autores identifica a la fusión de ciertas capas del dispositivo, sin considerar las tensiones termo-elásticas como causa probable de destrucción. Estudios en relación a este fenómeno se presentan en (Tais, Romero, y Demarco 2009; Romero, Demarco, y Tais 2011), realizando aproximaciones propuestas por otros autores (Walker et al. 2000). Posteriormente, se extiende el estudio a geometrías en 3D, para considerar diferentes posiciones de la fuente de calor (Peretti et al. 2015). En (Tais et al. 2018) se tiene en cuenta la celda sobre la que se produce el SEB y las vecinas, con el ánimo de obtener resultados más realistas.

Los trabajos anteriores consideraron para su estudio dispositivos MOS del tipo vertical, siendo estos los dispositivos mejor caracterizados en cuanto a SEB. Solo recientemente (Wang, Zhang, y Yu 2013), se ha comenzado a explorar el fenómeno en dispositivos MOSFET de tipo trench (o UMOSFET). Estos dispositivos presentan, frente a los MOS verticales, menor tamaño, menor resistencia en estado de conducción, menor capacidad de carga y mayor capacidad de corriente, siendo por tanto cada vez más utilizados.

Si bien el principio de funcionamiento de los MOS trench es similar a los MOS verticales, su layout es diferente. Por esta razón, se debe conducir un nuevo estudio de los efectos térmicos y termo-elásticos con el objeto de verificar cuál es la causa de falla predominante cuando se induce un SEB.

En este trabajo se estudian por primera vez los efectos mecánicos y térmicos que se presentan en un MOSFET trench durante un proceso SEB. Para este fin, se utiliza un modelo del dispositivo que presenta geometría cilíndrica con simetría de revolución (2D), resolviendo el modelo matemático por medio del método de elementos finitos.

2 ESTRUCTURA DEL DISPOSITIVO

La Figura 1 muestra la disposición física de una celda MOS trench. En la misma, los elementos esquemáticos ilustran la ubicación de la celda activa MOS, así como el BJT parásito. Como puede observarse, el layout de este dispositivo difiere del de un MOS vertical, particularmente en la compuerta. El contacto de metal del surtidor conecta el surtidor n+ con el

cuerpo p+ y cubre la superficie del dispositivo excepto en la compuerta, la cual está aislada por óxido. El contacto de metal del drenador se encuentra en la parte inferior del dispositivo, cubriendo por completo todo el dispositivo. El polisilicio de la compuerta se encuentra ubicado verticalmente, dentro de una trinchera compuesta por el óxido de compuerta. La corriente fluye verticalmente desde el surtidor, a través del cuerpo p para luego llegar a la zona del drenador que está formada por la capa epitaxial n-epi ubicada en la parte inferior y el sustrato n+.

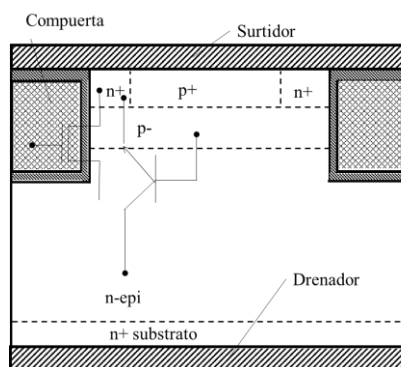


Figura 1: Estructura del MOS trench

Para realizar las simulaciones del efecto SEB, se adopta una geometría cilíndrica como una aproximación a la que tiene realmente la celda. La Figura 2 muestra la mitad de la estructura del MOS utilizada para el estudio, con los materiales constituyentes y dimensiones (Wang, Zhang, y Yu 2013). El espesor de la capa de óxido es de $0.05\mu\text{m}$ y la de la capa metálica de $5\mu\text{m}$ (no indicados en la figura). El efecto de generación de calor generado por el rápido aumento de la corriente se modela como una región de generación de calor caracterizada por su radio de generación r_g y su altura r_g , también mostrada en la Figura 2.

En nuestro estudio se han utilizado potencias para la región de generación de 0.5W , 1W y 2W . El valor de h_g se ha mantenido constante e igual a $2\mu\text{m}$. Se han adoptado dos valores de r_g , $1.45\mu\text{m}$ (Fuente 1) y $0.75\mu\text{m}$ (Fuente 2). De esta forma, se persigue el propósito de evaluar el comportamiento del dispositivo con fuentes con diferentes grados de extensión dentro del MOS.

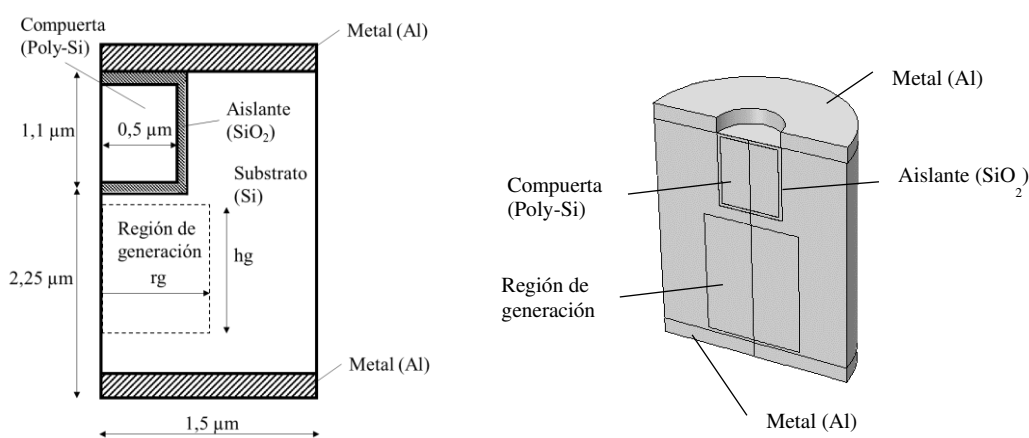


Figura 2: (a) Corte longitudinal de la celda en estudio con la estructura, dimensiones y características de la región de generación. (b) Modelo 3D.

3 MODELOS FÍSICOS Y SIMULACIÓN

La ecuación que describe el campo de desplazamientos u_i ($i = 1..3$) de un material isotrópico y homogéneo, sometido a un campo térmico no estacionario $T = T(\mathbf{x}_r, t)$ a una posición \mathbf{x}_r y en tiempo t es:

$$\mu u_{i,kk} + (\lambda + \mu)u_{k,ki} - \rho \ddot{u}_i - \gamma T_i = 0 \quad i, k = 1..3 \quad (1)$$

En (1) los parámetros λ y ν son las constantes de Lamé para un material dado que caracterizan la relación entre el tensor de tensiones σ_{ij} ($i, j = 1..3$) y el tensor de deformaciones ϵ_{ij} ($i, j = 1..3$), ρ es la densidad del material, $\gamma = (3\lambda + 2\nu)/\alpha$ donde α es el coeficiente de expansión térmica.

Se realiza un tratamiento cuasiestático del problema (despreciando el término de inercia) (Romero et al. 2011, Peretti et al. 2015).

$$\mu u_{i,kk} + (\lambda + \mu)u_{k,ki} - \gamma T_i = 0 \quad i, k = 1..3 \quad (2)$$

La ecuación (2) es lineal y permite obtener el campo de desplazamientos u_i ($i = 1..3$) del cuerpo. Resolvemos (2) con condiciones de borde libres en cada superficie del cuerpo. Consecuentemente no hay esfuerzos mecánicos debido a restricciones externas.

La definición del tensor de deformaciones en términos de desplazamientos es:

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad i, j = 1..3 \quad (3)$$

De la relación constitutiva de cada material, el tensor de tensiones se calcula mediante:

$$\sigma_{ij} = 2\mu\epsilon_{ij} + [\lambda e - \gamma(T - T_0)]\delta_{ij} + \sigma'_{ij} \quad i, j = 1..3 \quad (4)$$

Donde $e = \epsilon_{kk}$ ($k = 1..3$) es la traza del tensor de deformaciones, T_0 es la temperatura de referencia (300 K), y σ'_{ij} es el campo de tensiones residuales a la temperatura de referencia. A esta temperatura, las tensiones residuales son de un orden de magnitud menor (Hu 1991) que las críticas, por lo que se consideran despreciables.

Por otro lado, la ecuación de conducción de calor es:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) + k \eta \dot{e} = W \quad (5)$$

Donde c es la capacidad calorífica, k es la conductividad térmica, $\eta = \gamma T_1$ siendo T_1 un estado de temperatura inicial y $W = W(\mathbf{x}_r)$ un término fuente que representa la generación de calor interna. Cuando \mathbf{x}_r se encuentra fuera de la región de generación, $W = 0$ para cualquier tiempo t . El acoplamiento de la temperatura y el campo de deformaciones se debe al término $\eta \dot{e}$. Asumimos que la velocidad de deformación es suficientemente pequeña por lo que puede ser despreciable. Así, (5) se reduce a:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = W \quad (6)$$

Esta simplificación permite obtener la solución del problema termoelástico desacoplando el análisis térmico del mecánico. La distribución de temperatura obtenida resolviendo (6) se utiliza para determinar desplazamientos, deformaciones y tensiones utilizando (2), (3) y (4).

La ecuación (6) es una ecuación diferencial no lineal parabólica (PDE) dados que sus coeficientes c y k son dependientes de la temperatura. Su solución determina el campo de temperatura como función de la posición y el tiempo.

3.1 Propiedades térmicas y mecánicas de los materiales

Los materiales constituyentes del MOSFET poseen propiedades térmicas y mecánicas marcadamente diferentes. Por simplicidad, se considera que los materiales son isotrópicos y

se incorpora al modelo matemático la dependencia de las mismas con la temperatura. El silicio, óxido y polisilicio se comportan como frágiles, y alcanzan su rotura súbitamente sin deformaciones plásticas. El aluminio presenta características de ductilidad. De acuerdo a esto, para analizar el estado tensional de cada material se utiliza el criterio de máximas tensiones normales para los frágiles y el criterio de la máxima energía de distorsión para el dúctil (Tais, Romero, y Demarco 2009). Se muestran en la Tabla 1 los valores máximos admisibles de las variables que serán comparadas más adelante con los resultados de la simulación para determinar el mecanismo de falla.

	Tensión admisible [MPa]	Temperatura fusión [K]
Sustrato (Si)	7000	1700
Oxido (SiO ₂)	8400	1900
Compuerta (Polisilicio)	1200	1700
Metal (Al)	170	930

Tabla 1: Valores admisibles para las variables analizadas

3.2 Modelo de simulación

Para la resolución del problema (1) y (6) se utiliza software comercial basado en el método de elementos finitos. En la Figura 3a y en la Figura 3b se muestra el dominio en estudio con las distintas capas constitutivas. La malla de discretización que se utiliza se muestra en la Figura 3c. Esta se realiza con una malla no estructurada constituida por elementos triangulares lagrangeanos cuadráticos. Cada elemento posee tres grados de libertad por nodo (dos desplazamientos u_r , u_z y la temperatura T). La densidad de malla se aumenta en la zona de compuerta, dado que al estar constituida por materiales con distintas propiedades térmicas y mecánicas se obtiene una mejor resolución de las variaciones de las temperaturas y tensiones mecánicas a determinar.

La resolución temporal se efectúa mediante el empleo de un esquema implícito de orden variable de diferencias hacia atrás. El sistema de ecuaciones no lineales planteado en cada etapa se resuelve utilizando el método iterativo de Newton. El sistema lineal se resuelve mediante el paquete μ MFPACK (Unsymmetric MultiFrontal Method) apropiado para sistemas lineales no simétricos y con matrices ralas (sparse).

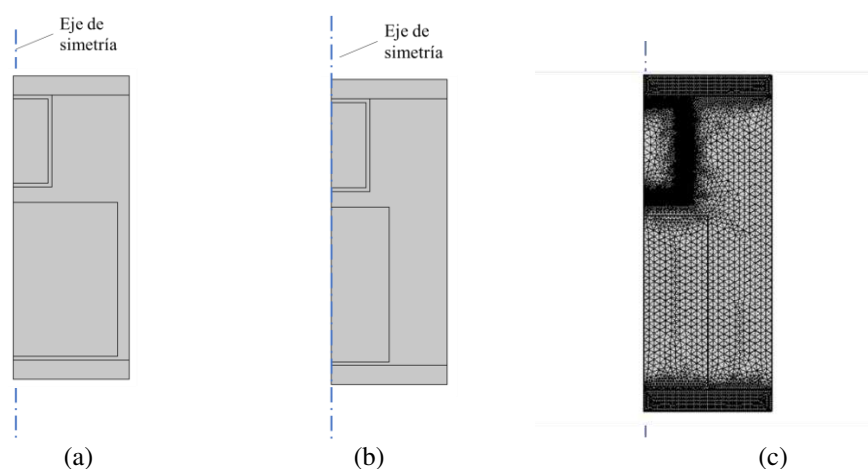


Figura 3: Modelo de simulación (a) Fuente 1 ($rg=1.45\mu\text{m}$ y $hg=2\mu\text{m}$) (b) Fuente 2 ($rg=0.75\mu\text{m}$ y $hg=2\mu\text{m}$) (c) Discretización del dominio con elementos finitos triangulares

4 RESULTADOS

4.1 Fuente 1 ($r_g=1.45\mu\text{m}$, $h_g=2\mu\text{m}$)

Como se mencionó en la Sección 2, se asignaron tres potencias a la región de generación, 0.5W, 1W y 2 W para evaluar diferentes densidades de potencia. En lo que sigue, se presentan los gráficos de las evoluciones temporales de los campos de temperatura y tensiones en los materiales constitutivos del dispositivo. Asimismo, se reportan los mapas de temperaturas y tensiones para aquellos materiales que fallan.

En la Figura 4, se presentan los resultados para el silicio. Desde esta gráfica se observa que esta capa llega a la fusión para la fuente de 2W, en un tiempo de aproximado de 32ns. Para el resto de las potencias evaluadas, no se evidencia falla en este material. Las tensiones que se observan en el silicio (para todas las potencias) se encuentran muy por debajo de los máximos admisibles.

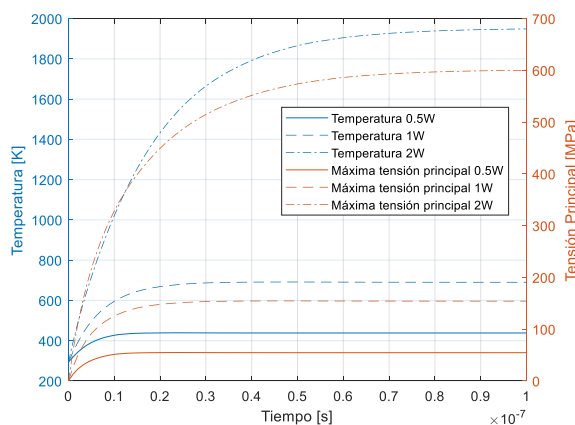


Figura 4: Evolución temporal de la temperatura y de la máxima tensión principal en el sustrato (Si).

Los resultados obtenidos para el metal pueden verse en la Figura 5, determinándose que no se alcanzan las temperaturas de fusión para ninguna de las potencias evaluadas. Sin embargo, se superan las tensiones máximas admisibles para el caso de 2W, entrando en fluencia este material para 6ns.

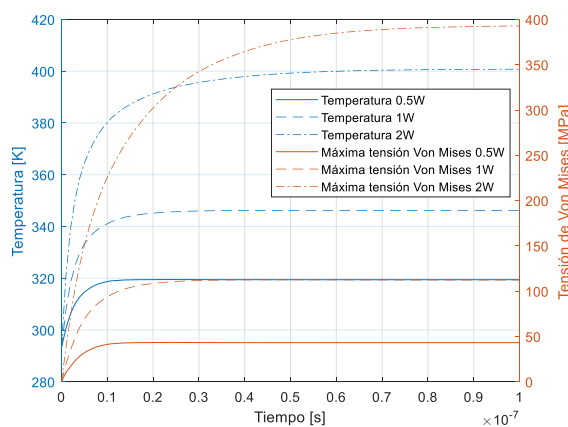


Figura 5: Evolución temporal de la temperatura y de la máxima tensión de Von Mises en el metal (Al).

La Figura 6 y la Figura 7 revelan que para ninguna de las potencias consideradas se alcanzan las temperaturas de fusión ni las tensiones máximas admisibles para el óxido y el polisilicio

respectivamente. Se observa un comportamiento sub amortiguado para las tensiones en estas capas (no observado en otros dispositivos estudiados previamente), que requiere de investigación adicional para su justificación. Como resultado de esta primera evaluación, puede determinarse que la falla crítica se da en el metal, dado que la fluencia en el mismo se alcanza a un tiempo menor que la fusión del silicio.

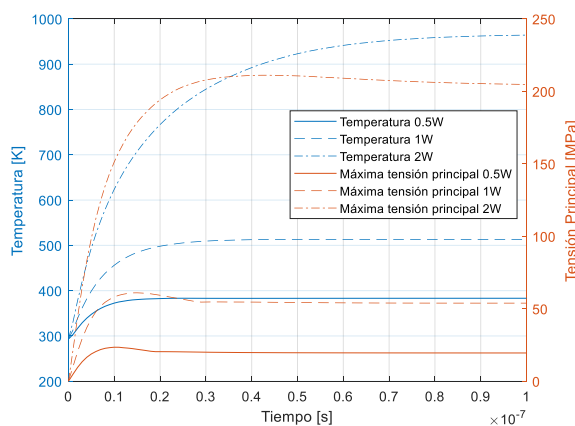


Figura 6: Evolución temporal de la temperatura y de la máxima tensión principal en el aislante (SiO₂).

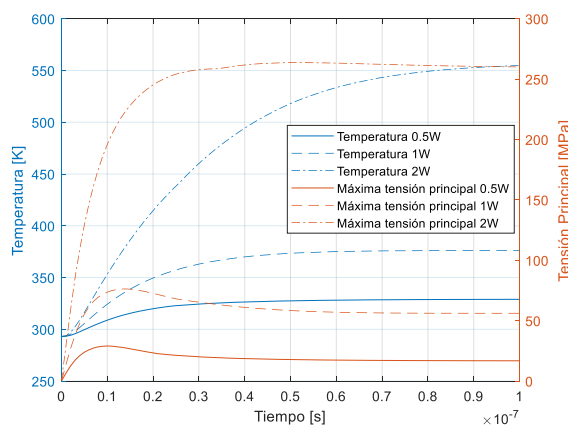


Figura 7: Evolución temporal de la temperatura y de la máxima tensión principal en la compuerta (Polisilicio).

Finalmente, en la Figura 8 y en la Figura 9 se reporta el mapa de temperaturas del dispositivo completo y el de tensiones de las capas de metal, obtenidos cuando la fuente es de 2W, potencia a la cual se evidencian los fenómenos críticos. La Figura 9b muestra en un solo color la zona del MOSFET que supera la tensión crítica, al momento en que se produce la fusión del silicio.

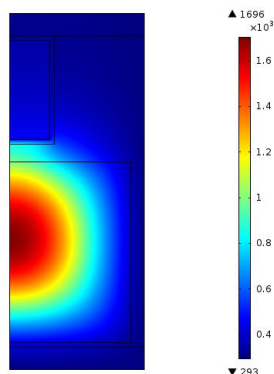


Figura 8: Distribución de temperatura para el instante de fusión del silicio (t=0.032 us)

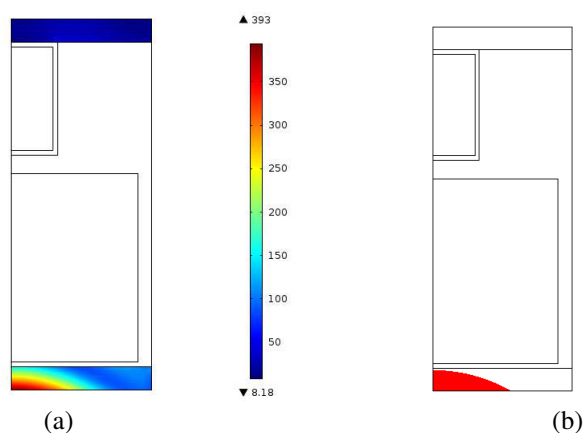


Figura 9: (a) Distribución espacial de la máxima tensión de Von Mises en el metal para el instante de fusión del silicio ($t=0.035$ us). (b) Región donde se supera el valor admisible (170 MPa). Se muestra en cada caso la región del material que supera el valor admisible

4.2 Fuente 2 ($r_g=0.75\mu\text{m}$ y $h_g=2\mu\text{m}$)

En la Figura 10 se observan los resultados para el silicio, para los distintos valores de potencia asignados a la fuente de generación. Esta capa alcanza la fusión para las potencias de 2W (5ns) y 1W (22ns). Las tensiones se encuentran siempre por debajo del máximo admisible.

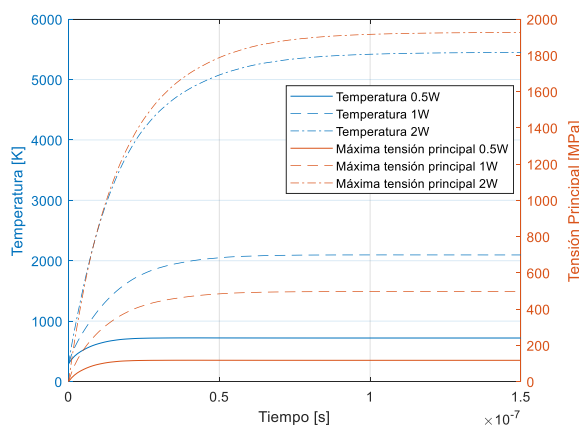


Figura 10: Evolución temporal de la temperatura y de la máxima tensión principal en el sustrato (Si).

Los resultados para las regiones metálicas se muestran en la Figura 11. Las temperaturas para este material están lejos de la fusión. Sin embargo, para regiones de generación de calor de 2W y 1W se superan las tensiones de fluencia. Los tiempos de falla son 1.2ns y 3.5ns aproximadamente.

La simulación para el óxido y el polisilicio muestra que ambas capas alcanzan la fusión para la fuente de 2W, pero lo hacen después de que el silicio funda. Estos resultados no se muestran aquí por razones de espacio.

A partir de los resultados se establece la misma dinámica que para el caso anterior, dado que la fluencia del metal ocurre antes que la fusión del silicio. No obstante, para el caso de la fuente de 2W, el tiempo de fusión del silicio (5ns) está cercano al de falla del metal (1.2ns).

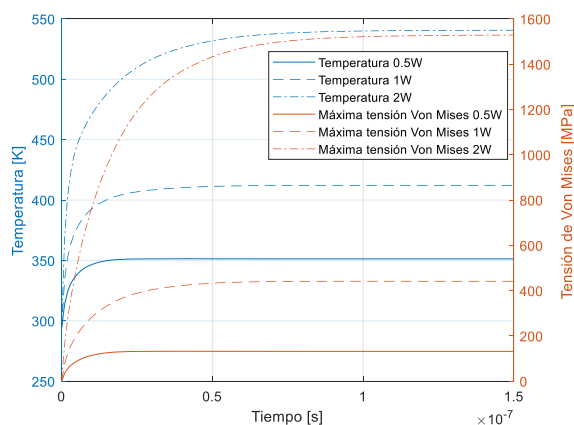


Figura 11: Evolución temporal de la temperatura y de la máxima tensión de Von Mises en el metal.

En la Figura 12 se muestran los mapas de temperatura para los casos en los cuales funde el silicio, dado que es la capa crítica si se consideran temperaturas solamente. Por otro lado, la Figura 13 presenta los mapas de tensiones para los casos en los que el metal falla por tensiones. Las figuras del lado derecho muestran en un solo color las zonas en las que se produce la falla del metal al momento de la fusión del silicio.

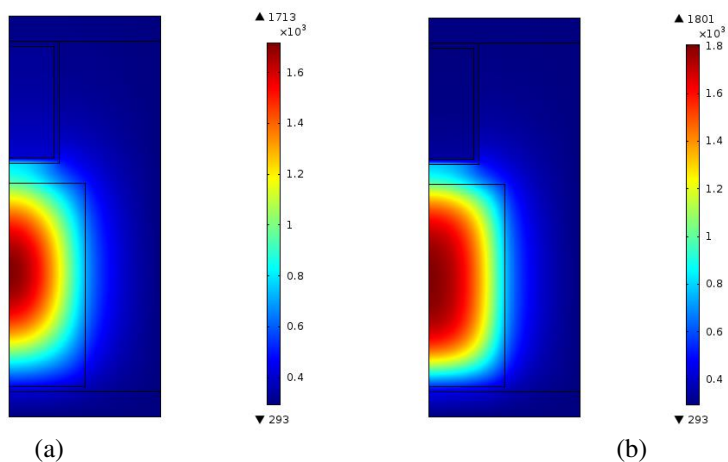


Figura 12: Distribución espacial de la temperatura para el instante de fusión del silicio (a) 1W a $t = 0.022\mu s$ y (b) 2W a $t = 0.005\mu s$

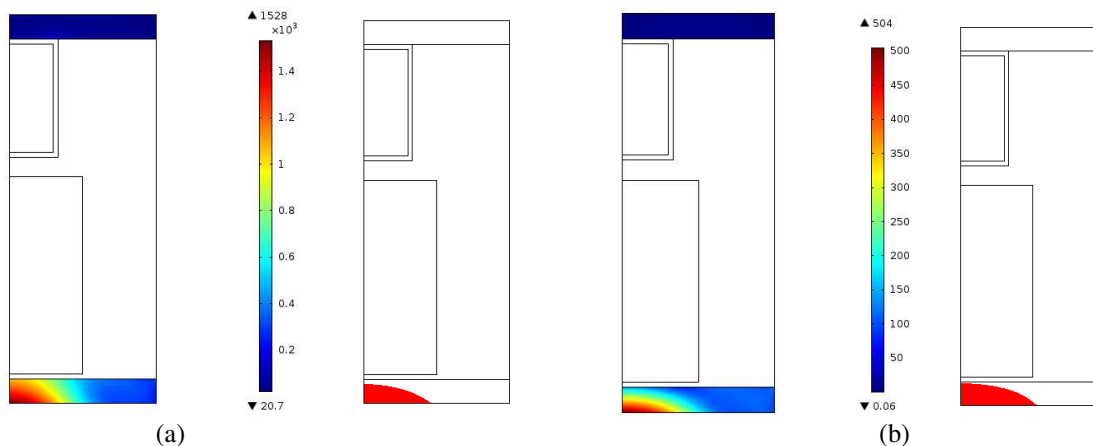


Figura 13: Distribución espacial de la máxima tensión de Von Mises en el instante de fusión del silicio (a) 1W a $t = 0.022\mu s$ y (b) 2W a $t = 0.005\mu s$. Se muestra en cada caso la región del material que supera el valor admisible

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan por primera vez resultados referentes a los efectos mecánicos y térmicos provocados por SEBs en transistores MOSFET trench.

Para simular el efecto del SEB se adopta una fuente de calor que emula el efecto del aumento rápido de corriente. Se consideran para la fuente dos tamaños diferentes, con tres valores de potencia para cada tamaño, con el objeto de simular el efecto de diferentes densidades de potencia. Se aproxima la celda MOS con una geometría cilíndrica.

Los resultados de simulación por elementos finitos muestran que, a la mínima potencia, para los dos tamaños considerados no se observan fallas mecánicas o la fusión de alguna capa. Para la máxima potencia se presentan fallas para los dos tamaños de fuente, mientras que para la potencia media se alcanza la condición crítica para la fuente de tamaño menor. El mecanismo de falla, cuando se produce, es la fluencia del metal. Esta última se presenta antes que se produzca la fusión del silicio. Las restantes capas (polisilicio y óxido) no experimentan falla alguna para todos los casos considerados.

REFERENCIAS

- Calvel, P., C. Peyrotte, A. Baiget, y E. Stassinopoulos. 1991. "Comparison of experimental measurements of power MOSFET SEBs in dynamic and static modes". *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 38 (6): 1310–14.
- Fischer, T. A. 1987. "Heavy-ion induced, gate rupture in power MOSFETs". *IEEE Transactions on Nuclear Science*, núm. 6: 1786–91.
- Hands, Alex, Paul Morris, Keith Ryden, Clive Dyer, Pete Truscott, Andrew Chugg, y Sarah Parker. 2011. "Single event effects in power MOSFETs due to atmospheric and thermal neutrons". *IEEE Transactions on Nuclear Science* 58 (6 PART 1): 2687–94. <https://doi.org/10.1109/TNS.2011.2168540>.
- Hu, S. M. 1991. "Stress-related problems in silicon technology". *Journal of Applied Physics* 70 (6): R53. <https://doi.org/10.1063/1.349282>.
- Kuboyama, S., S. Matsuda, T. Kanno, y T. Ishii. 1992. "Mechanism for single-event burnout of power MOSFETs and its characterization technique". *IEEE Transactions on Nuclear Science* 39 (6): 1698–1703. <https://doi.org/10.1109/23.211356>.
- Peretti, Gabriela, Gustavo Demarco, Eduardo Romero, y Carlos Tais. 2015. "3D Thermal and Mechanical Analysis of a Single Event Burnout". *IEEE Transactions on Nuclear Science* 62 (4): 1879–87. <https://doi.org/10.1109/TNS.2015.2451075>.
- Reed, R.A., J. Kinnison, J.C. Pickel, S. Buchner, P.W. Marshall, S. Kniffin, y K.a. LaBel. 2003. "Single-event effects ground testing and on-orbit rate prediction methods: the past, present, and future". *IEEE Transactions on Nuclear Science* 50 (3): 622–34. <https://doi.org/10.1109/TNS.2003.813331>.
- Romero, Eduardo, Gustavo Luis Demarco, y Carlos E. Tais. 2011. "Time evolution of single-event burnout in vertical power MOSFETs and implications for mitigation strategies". *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability* 11 (1): 171–78. <https://doi.org/10.1109/TDMR.2010.2102761>.
- Stassinopoulos, E. G., G J Brucker, P Calvel, A Baiget, C Peyrotte, y R. Gaillard. 1992. "Charge generation by heavy ions in power mosfets, burnout space predictions, and dynamic SEB sensitivity". *IEEE Transactions on Nuclear Science* 39 (6): 1704–11. <https://doi.org/10.1109/23.211357>.
- Tais, Carlos E., Eduardo A Romero, y Gustavo L. Demarco. 2009. "Thermomechanical stresses analysis of a single event burnout process". *IEEE Transactions on Nuclear Science* 56 (3): 1521–30. <https://doi.org/10.1109/TNS.2009.2016565>.

- Tais, Carlos E, Gabriela Peretti, Eduardo A Romero, y Gustavo L Demarco. 2018. “Efectos térmicos en estructuras mos poligonales bajo condiciones de quemado por evento único”. *Mecánica Computacional XXXVI*: 2201–10.
- Titus, J L, y L S Jamiolkowski. 1989. “Development of cosmic ray hardened power MOSFETs”. *IEEE Trans. on Nuclear Science* 36 (6): 2375–82.
- Walker, D G, T S Fisher, J Liu, y R D Schrimpf. 2000. “Thermal characterization of Single Event Burnout failure in semiconductor power devices”. *Sixteenth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium* 21 (23): 213–19.
- Wang, Ying, Yue Zhang, y Chenghao Yu. 2013. “Research of single-event burnout in power UMOSFETs”. *IEEE Transactions on Electron Devices* 60 (2): 887–92. <https://doi.org/10.1109/TED.2012.2234126>.
- Waskiewicz, A E, J W Groninger, V H Strahan, y D M Long. 1986. “Burnout of power MOS transistors with heavy ions of Californium-252”. *IEEE Trans. on Nuclear Science* 33 (6): 1710–13.
- Wrobel, T F, F N Coppage, G L Hash, y A. J. Smith. 1986. “Current induced avalanche in epitaxial structures”. *IEEE Transactions on Nuclear Science* 32 (6): 3991–95. <https://doi.org/10.1109/TNS.1985.4334056>.