

## DETERMINACIÓN DE TIEMPOS CRÍTICOS PARA MITIGACIÓN DE EFECTOS POR QUEMADO DE EVENTO ÚNICO EN TRANSISTORES MOSFET TRENCH

### CRITICAL TIMES DETERMINATION FOR EFFECTS MITIGATION DUE TO SINGLE EVENT BURNOUT IN POWER TRENCH MOSFETS

Gabriela Peretti<sup>a,b</sup>, Eduardo A. Romero<sup>a,b</sup>, Gustavo L. Demarco<sup>a</sup> y Carlos E. Tais<sup>a</sup>

<sup>a</sup>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](mailto:gecam@frvm.utn.edu.ar)

<sup>b</sup>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](mailto: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), 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 que genera 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. Recientemente se ha comenzado a explorar el fenómeno SEB en transistores UMOSFET o trench. Estos dispositivos presentan, respecto de los verticales, un tamaño reducido, menor resistencia en estado de conducción y mayor capacidad de manejo de corriente. Este trabajo presenta resultados sobre SEBs en un dispositivo MOS trench, analizando los efectos de falla para fuentes de calor que emulan el efecto con una potencia más realista. También se evalúan los efectos de desconexión de la fuente de calor para el caso que muestra el peor caso para el tiempo de falla. Se utiliza un modelo 2D axisimétrico resolviendo el modelo matemático utilizando el método de elementos finitos.

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

**Abstract.** Power trench MOSFETs are susceptible to single event burnout (SEB), induced by high energy ions. SEB is characterized by triggering the conduction of a parasitic bipolar transistor inherent in the MOSFET structure that generates a high current density in the device with a rapid increase in temperature due to the Joule effect. This effect leads to catastrophic failure if no protection strategy is implemented. Single Event Burnout has recently begun to be explored in UMOSFET or trench power MOSFETS. These are devices that have, compared to DMOS, a reduced size, less resistance in the conduction state, and a greater capacity to handle the current. This work presents results on SEBs in a MOS trench device, analyzing the failure effects for heat sources that emulate the effect with a more realistic power, presenting different positions and volumes. The disconnection effects of the heat source are also evaluated for the worst-case failure time. An axisymmetric 2D model of the device is used, solving the mathematical model using the finite element method.

## 1 INTRODUCCIÓN

Los dispositivos MOSFET de trinchera (trench), presentan, frente a los dispositivos MOS verticales (DMOS) un tamaño de celda menor, ofreciendo una menor resistencia en conducción sin sacrificar los límites de polarización inversa (Williams et al., 2017). Por esta razón, son los preferidos en sistemas de conmutación de alta frecuencia en aplicaciones espaciales (Krishnamurthy, Kannan y Hussin, 2015). Sin embargo, en este medio ambiente rico en radiación ionizante de diferente naturaleza los dispositivos son afectados de diferente forma. Particularmente importante es el efecto causado por los iones de alta energía denominado de quemado por evento único (SEB, Single Event Burnout), que provoca la falla catastrófica del dispositivo y consecuentemente de la misión en la cual participa.

En un SEB se dispara, por la interacción ión-semiconductor, la conducción del transistor bipolar parásito inherente en de la estructura del MOSFET. Bajo condiciones de polarización inversa, cuando el dispositivo soporta tensiones relativamente altas, se genera una alta densidad de corriente, con el consecuente rápido aumento de la temperatura por efecto Joule. Este fenómeno se da en la región de drift del MOS, teniendo características muy localizadas desde el punto de vista térmico. Generalmente el evento culmina en la falla catastrófica, si no se implementa alguna estrategia de mitigación.

El fenómeno de SEB en transistores MOS verticales ha sido estudiado ampliamente desde el punto de vista eléctrico, desde su primera publicación en 1986 (Waskiewicz et al. 1986). Otros trabajos pueden encontrarse en (Calvel et al. 1991; Stassinopoulos et al. 1992; Kuboyama et al. 1992; Reed et al. 2003; Wang, Zhang, y Yu 2013). Posteriormente, los autores de este trabajo encontraron que las tensiones termo-elásticas pueden ser causa probable de destrucción del dispositivo (Tais, Romero, y Demarco 2009; Romero, Demarco, y Tais 2011; Peretti et al. 2015; Tais, Peretti, y Romero 2018). En estos trabajos se emula el efecto de generación de calor producido por las altas corrientes mediante una fuente ubicada en diferentes posiciones en el dispositivo, de geometría y potencia variables.

En Peretti et al. (2019), se estudian por primera vez los efectos termo elásticos inducidos por SEBs en un transistor MOS trench. Las simulaciones demostraron que se producen efectos de falla por fluencia del metal, pero solo para las fuentes de calor de potencia elevada, no habiéndose establecido un mecanismo de falla para las fuentes de menor potencia. Por otro lado, debido a su carácter exploratorio, ese trabajo no tuvo en cuenta la evolución de los campos de temperatura y tensiones luego de la desconexión de la fuente de potencia. Esto es de vital importancia para la implementación de estrategias de minimización de los efectos provocados por SEBs.

En este trabajo, presentamos resultados relacionados con efectos SEBs en un dispositivo MOS trench como el utilizado por Peretti et al. (2019), analizando los efectos de falla para fuentes de calor de menor potencia que las evaluadas en el trabajo previo, pero con diferentes posiciones y volúmenes, ya que se considera que la variabilidad entre dispositivos puede determinar que estas difieran. También se evalúan los efectos de desconexión de la fuente de calor para el caso que presenta el tiempo de falla más desfavorable.

## 2 MODELADO DEL DISPOSITIVO BAJO ESTUDIO

La Figura 1 muestra la disposición física de una celda MOS trench, indicando 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 superior (surtidor) conecta la región 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 inferior (drenador), cubre por completo la cara inferior del dispositivo. El polisilicio de la compuerta se encuentra ubicado verticalmente, dentro de una

trinchera rodeada 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+.

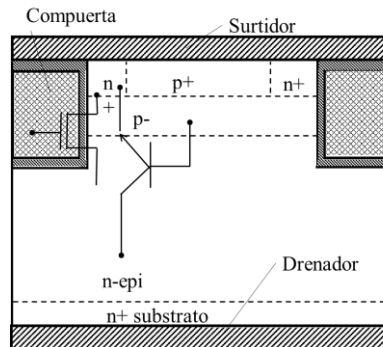


Figura 1: Estructura del MOS trench

En este trabajo, se aproxima una celda MOS trench mediante una geometría cilíndrica. Con el propósito de comparar resultados, se considera el mismo dispositivo presentado en Peretti et al. 2019. La mitad de la geometría se muestra en la Figura 2, detallando también los materiales constituyentes y dimensiones. No se indican en la misma el espesor de la capa de óxido, de 0.05  $\mu\text{m}$  y la capa metálica de 5  $\mu\text{m}$ .

El efecto de generación de calor provocado por el rápido aumento de la corriente se modela como una región de generación caracterizada por su radio de generación  $r_g$  y su altura  $h_g$ , también mostrada en la Figura 2. La posición relativa en el eje z también es variable.

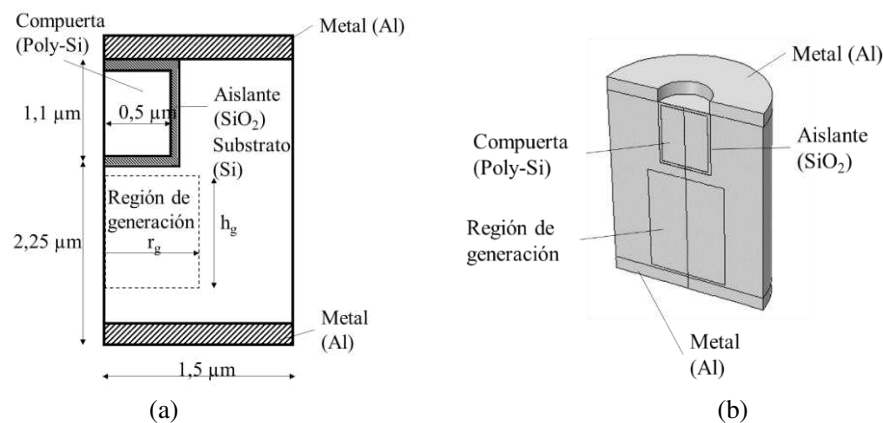


Figura 2: (a) Corte longitudinal de la celda en estudio con la estructura, dimensiones y características de la región de generación. (b) Modelo 3D.

### 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  $\lambda$  y  $\nu$  son las constantes de Lamé para un material dado que caracterizan la relación entre el tensor de tensiones  $\sigma_{ij}$  ( $i, j = 1..3$ ) y el tensor de deformaciones  $\varepsilon_{ij}$  ( $i, j$

=1..3),  $\rho$  es la densidad del material,  $\gamma = (3\lambda+2\nu)/\alpha$  donde  $\alpha$  es el coeficiente de expansión térmica. Se realiza un tratamiento quasiestático 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  $\sigma'_{ij}$  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:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla^2(kT) + k\eta\dot{e} = W \quad (5)$$

Donde  $c$  es la capacidad calorífica,  $k$  es la conductividad térmica,  $\eta = \gamma T_1$  siendo  $T_1$  un estado de temperatura inicial y  $W=W(x_r)$  un término fuente que representa la generación de calor interna. Cuando  $x_r$  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:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla^2(kT) = W \quad (6)$$

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 Criterios de falla

Por simplicidad se asume que los materiales constituyentes del MOS son isotrópicos. Utilizando la facilidad del software empleado, se incorporan al modelo matemático la dependencia con la temperatura de las propiedades de los materiales, detalladas en (Tais, Romero, y Demarco 2009).

Definimos la falla térmica en un material cuando alcanza su correspondiente punto de fusión. Por otro lado, para definir una falla debido a esfuerzos mecánicos se debe considerar el comportamiento de cada material. El silicio, óxido y polisilicio se comportan como frágiles y alcanzan su rotura súbitamente sin deformaciones plásticas significativas, por lo que adoptamos el criterio de máximas tensiones normales como criterio de falla. Por otro lado, consideramos

al aluminio como dúctil, por lo que utilizamos el criterio de máxima energía de distorsión (tensión equivalente de Von Mises) para describir su característica de falla (Tais, Romero, y Demarco 2009). De acuerdo a estos criterios, se considera una falla si algún material supera los límites mostrados en la Tabla 1. Estos valores serán comparados con los resultados de la simulación para determinar el mecanismo de falla de acuerdo al límite que se supere primero.

	Tensión admisible [MPa]	Temperatura de fusión [K]
Sustrato (Si)	7000	1700
Oxido (SiO <sub>2</sub> )	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 utilizó software comercial basado en el método de elementos finitos. En la Figura 3a se muestra el dominio en estudio con las distintas capas constitutivas y en la Figura 3b la malla de discretización. Ésta 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 Figura 3c muestra mayor densidad de elementos en la región de compuerta, dado que, al estar constituidas por materiales con distintas propiedades térmicas y mecánicas, requiere 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 UMFPACK (Unsymmetric MultiFrontal Method) apropiado para sistemas lineales no simétricos y con matrices ralas (sparse).

La modelización de la fuente de generación se efectuó mediante la definición de una función analítica espacial en la cual se parametrizan para varios valores el radio de generación y la altura de la fuente, como así también su posición en el eje vertical. Para la consideración de la desconexión se utilizó una función escalón unitario de duración igual al tiempo de desconexión propuesto.

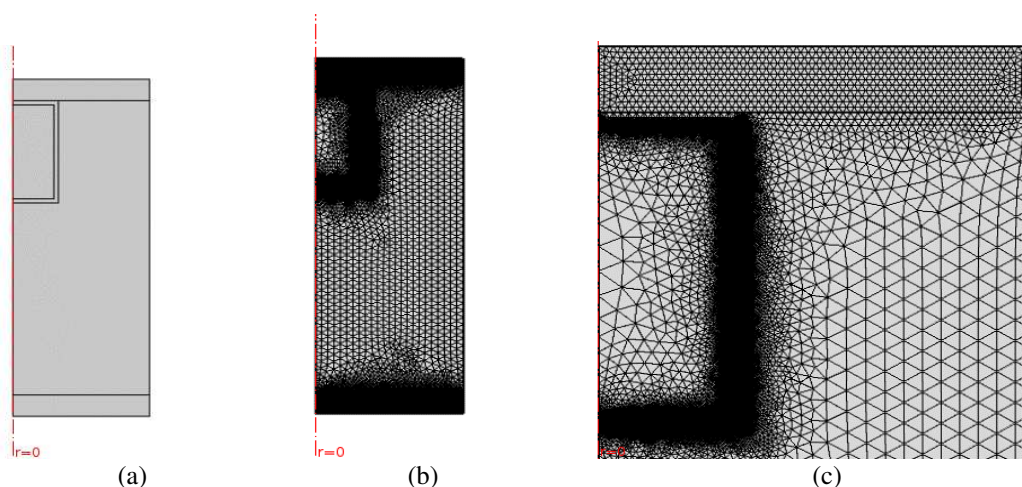


Figura 3: Modelo de simulación (a) Dominio en estudio (b) Discretización del dominio con elementos finitos triangulares no estructurados (c) Detalle de la discretización en la región de compuerta.

#### 4 DEFINICIÓN DE LAS FUENTES DE GENERACIÓN DE CALOR

En (Peretti et al. 2015), se utilizaron para un MOS vertical diferentes potencias para las fuentes de generación de calor, observándose efectos destructivos en todos los casos. La menor densidad de potencia fue de  $7.073e^{14}$  W/m<sup>3</sup> para una fuente con  $r_g=15$   $\mu$ m,  $h_g=10$   $\mu$ m y potencia 5W. Este valor de densidad se toma como referencia para evaluar los resultados de este trabajo.

Por otro lado, Wang, Zhang y Yu, (2013) estudiaron un transistor trench con la geometría adoptada en este trabajo. Ellos determinaron que, para ciertas condiciones de posición del impacto del ion y de la energía de transferencia lineal (LET, Linear Energy Transfer) las corrientes circulantes llegan a un valor estacionario, evidenciando el establecimiento de SEB. De los datos reportados por esos autores, es posible determinar una disipación de potencia cercana a 0.5 W, adoptándose este valor para todas las fuentes a considerar en este estudio. Esta potencia se asigna a una región que es variable, por lo que la densidad de potencia cambiará de acuerdo con las dimensiones de la fuente.

Finalmente, Peretti et al. (2019) adoptaron, para un dispositivo con las dimensiones y potencia dadas en Wang, Zhang y Yu, 2013, un valor de radio de la fuente prácticamente igual al del dispositivo, ocupando casi por completo la región de drift del mismo. Se encontró que, para esta fuente, ninguno de los materiales alcanza valores críticos para temperatura o riesgos de rotura por efectos mecánicos. Se hace notar que, aun ocupando un volumen importante para el tamaño del dispositivo, la densidad de potencia es de  $3.78e^{16}$  W/m<sup>3</sup>, dos órdenes de magnitud más grande que el caso reportado en Peretti et al. 2015. Esto sugiere que la geometría trench es más tolerante a SEBs, soportando densidades superiores al de tipo vertical.

Esta discusión motivó un estudio paramétrico en el cual se evaluó el comportamiento del dispositivo TRENCH para diferentes densidades de potencia, respetando siempre la potencia determinada en Wang, Zhang y Yu, 2013. La idea fue determinar un volumen crítico a partir del cual se comiencen a observar efectos destructivos.

Para este fin, se variaron tanto la altura como el radio, hasta encontrar una fuente que llevó al dispositivo a condición de falla, de acuerdo con los criterios definidos en la Sección 3.1. Esta fuente se denomina crítica centrada, y tiene una densidad de potencia de  $4.45e^{17}$  W/m<sup>3</sup>.

Para corroborar si otras posiciones de la fuente alteran la dinámica de la falla, se consideraron dos fuentes más con las mismas dimensiones que la centrada pero desplazadas en el eje z. Las principales características de las fuentes se resumen en la Tabla 2, mientras que la Figura 4 muestra las posiciones de cada una de ellas.

Fuente	Radio de generación, $r_g$ [ $\mu$ m]	Altura, $h_g$ [ $\mu$ m]	Posición en eje z [ $\mu$ m]
Crítica centrada	0.62	0.937	1.1
Crítica inferior	0.62	0.937	0.5
Crítica superior	0.62	0.937	1.7

Tabla 2: Características de las fuentes utilizadas en el trabajo. La potencia total es de 0.5 W en todos los casos

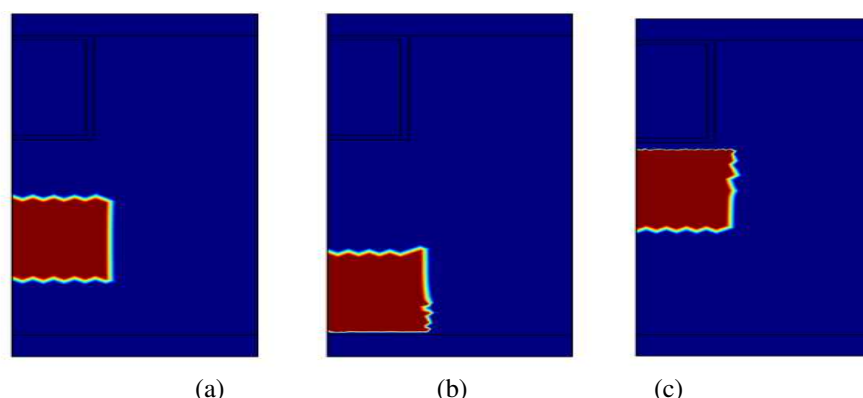


Figura 4: Ubicación de las fuentes utilizadas en el trabajo. (a) Centrada, (b) Inferior, (c) Superior

## 5 RESULTADOS DE SIMULACIÓN

### 5.1 Efectos de las fuentes críticas

Para la fuente crítica centrada, se obtienen las siguientes evoluciones temporales de temperaturas (Figura 5a) y tensiones (Figura 5b) en cada una de las capas constitutivas. Se observa que se supera la temperatura de fusión en el silicio, siendo ésta la causa de la falla. El tiempo al que ocurre la falla es de  $0.037 \mu\text{s}$ . En el metal inferior las tensiones mecánicas trepan a valores cercanos a los admisibles durante el estado estacionario evaluándolo mediante el criterio de la máxima energía de distorsión (Tensión de Von Mises).

Para la fuente crítica en la posición inferior el comportamiento es diferente a la centrada. Se observa que las temperaturas no alcanzan valores los críticos de la Tabla 3 para ninguna de las capas (Figura 6a). Sin embargo, se observan valores de tensiones próximas a la fluencia en el aluminio superior para el tiempo de  $0.00225 \mu\text{s}$  (Figura 6b).

Finalmente, para la fuente crítica en posición superior pueden verse las evoluciones temporales de temperaturas en la Figura 7a y tensiones mecánicas en la Figura 7b. Se observa que la capa que falla es la correspondiente al sustrato por superar la temperatura de fusión, para un tiempo levemente menor a  $0.02 \mu\text{s}$ . Esta es una diferencia respecto a los casos anteriores.

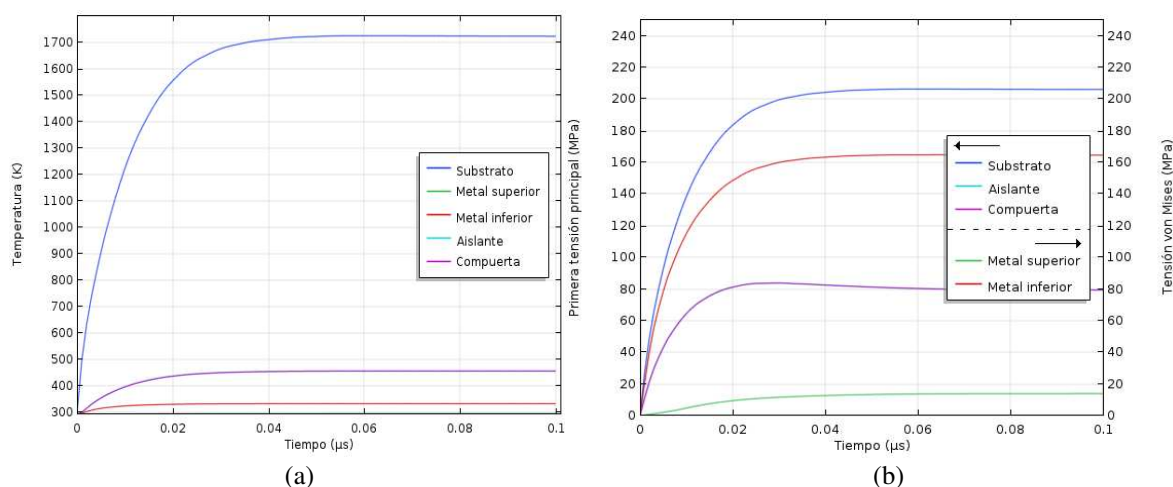


Figura 5: Evolución temporal de (a) temperaturas y (b) tensiones en las capas del dispositivo, fuente centrada.



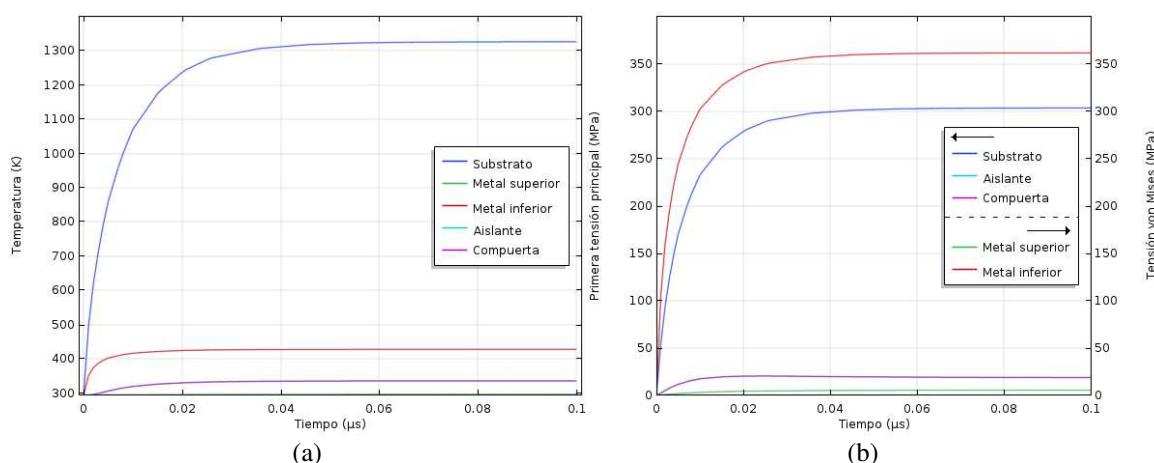


Figura 6: Evolución temporal de (a) temperaturas y (b) tensiones en las capas del dispositivo, fuente inferior

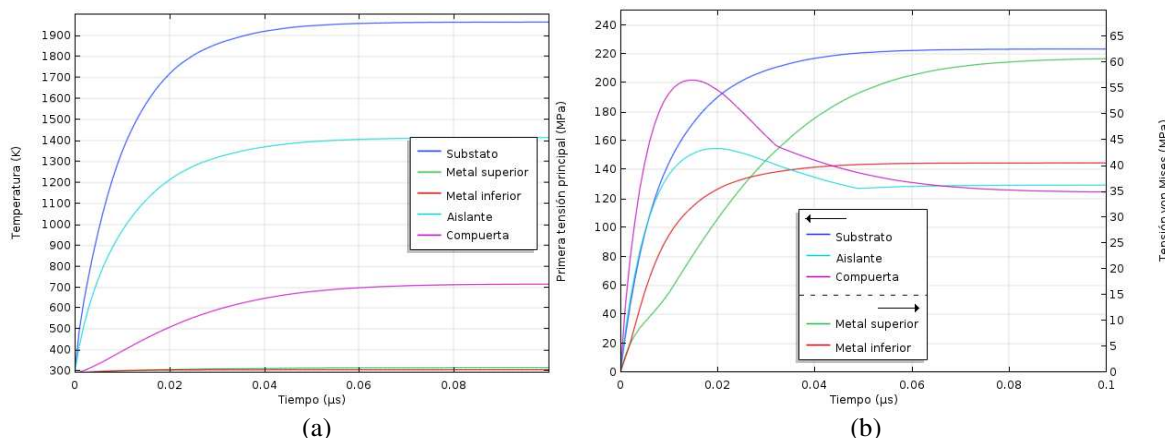


Figura 7: Evolución temporal de (a) temperaturas y (b) tensiones en las capas del dispositivo, fuente superior.

A modo de resumen de los efectos observados, se reportan en la Tabla 4 los tiempos de falla, ya sea por alcanzar la máxima temperatura (indicado como fusión) o bien cuando se alcanza la tensión de fluencia (indicado como falla mecánica). N/A denota que el material No Alcanza la condición de falla en el tiempo simulado. Como puede verse, la situación más desfavorable se da para la fuente crítica inferior, condición en la que el metal inferior es el primero en fallar.

Capa	Fuente Centrada	Fuente Inferior	Fuente Superior
Silicio	0.037 (fusión)	N/A	0.02 (fusión)
Metal superior	N/A	0.02 (falla mecánica)	N/A
Metal inferior	N/A	0.0025 (falla mecánica)	N/A
Óxido	N/A	N/A	N/A
Poly-Si	N/A	N/A	N/A

Tabla 4: Tiempos de falla [μs] para cada capa

En la Figura 8 y en la Figura 9 se muestra la distribución espacial de las temperaturas y tensiones para los casos críticos citado en la Tabla 4, en particular para las capas de metal superior e inferior y la de substrato, observándose el efecto localizado del SEB.



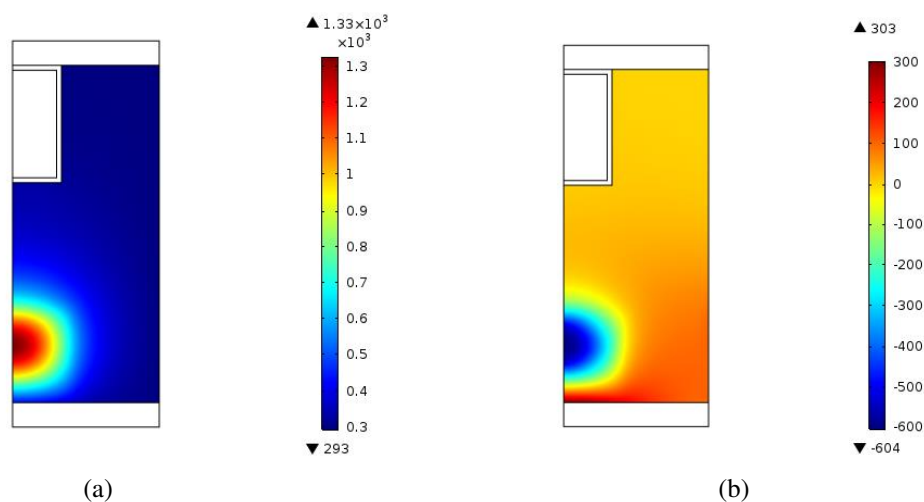


Figura 8: Distribución espacial de (a) Temperatura y (b) Tensión Principal en el sustrato, fuente inferior.

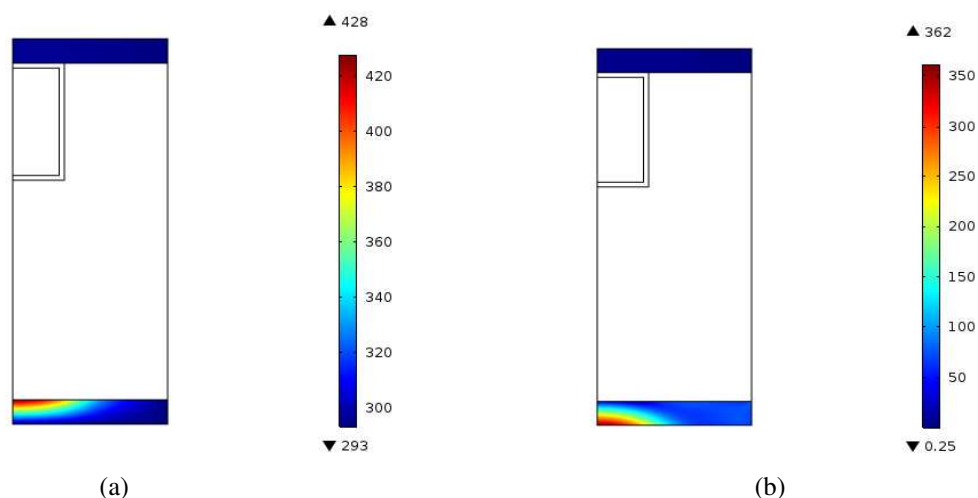


Figura 9: Distribución espacial de (a) Temperatura y (b) Tensión de Von Mises en el metal, fuente inferior.

## 5.2 Desconexión de la fuente

Una alternativa para evitar daños en los dispositivos por SEBs es desconectar la fuente de alimentación. Sin embargo, debido al fenómeno de inercia térmica, puede que las temperaturas crezcan por sobre lo esperado después de la desconexión, y que aparezcan tensiones termoelásticas superiores a las que se daban durante el período de tiempo en el cual el dispositivo elevaba su temperatura. Para dispositivos verticales, se encontró en Romero, Demarco, y Tais (2011) que era necesario desconectar la fuente en un tiempo considerablemente menor (hasta el 83%) al que sucedía la falla. Resta evaluar si para el dispositivo trench estudiado en este trabajo se presenta la misma situación.

Dado que presenta los valores más críticos de tiempo de falla, se considera la fuente inferior para evaluar el comportamiento del dispositivo cuando se desconecta la fuente. Para obtener el tiempo de desconexión que permita no superar los valores máximos admisibles, se recurre a un método iterativo de reducción escalonada de los mismos y análisis de tensiones en el aluminio inferior. Como resultado de este procedimiento se obtiene que el tiempo adecuado es de  $0.00225 \mu\text{s}$ . Bajo estas circunstancias, se obtienen las evoluciones temporales de temperaturas y tensiones que se muestran en la Figura 10.

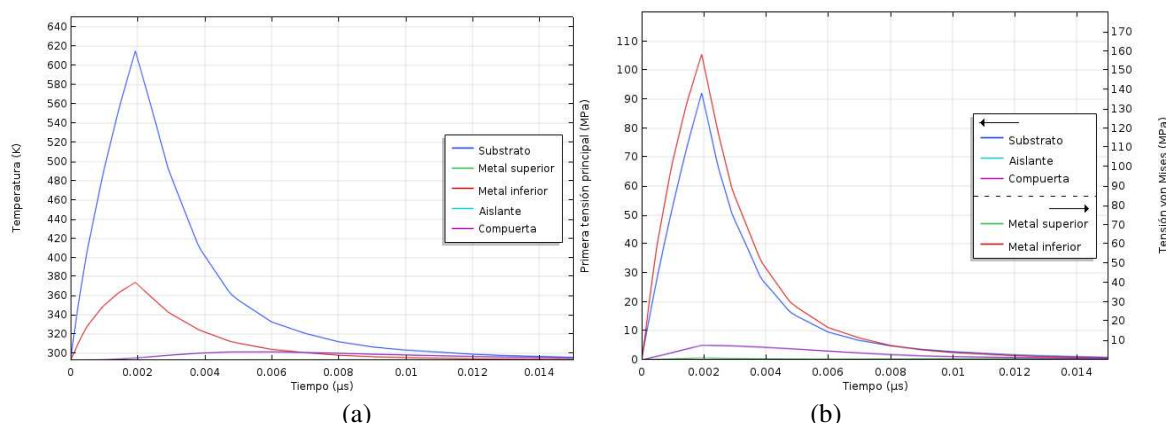


Figura 10: Evolución de (a) temperatura y (b) tensiones en las diferentes capas del dispositivo, tiempo de desconexión de la fuente  $0.00225 \mu\text{s}$ , fuente inferior.

Debe destacarse que, si bien el tiempo de desconexión ha debido reducirse respecto al de falla (reportado en Tabla 3 y en Tabla 4), el mismo no ha sido significativo y marca una diferencia respecto de dispositivos estudiados previamente. Atribuimos estos efectos a la menor dimensión del dispositivo que provoca que los fenómenos de inercia térmica sean menos pronunciados.

## 6 CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan resultados relacionados con los efectos mecánicos y térmicos provocados por SEBs en transistores MOSFET trench. Se estudiaron fuentes de calor con un valor de potencia más realista, menor que el utilizado en trabajo previo. Se buscaron diferentes posiciones y volúmenes de estas fuentes hasta producir la falla en el dispositivo, encontrándose para un caso, que el dispositivo falla por fusión de silicio, mientras que en los otros dos falló por fluencia el metal inferior. También, para el caso con peor tiempo de falla se simuló los efectos de desconexión, encontrándose que no es necesario reducir significativamente el tiempo de falla para lograr una desconexión sin generar fallas en el material. Esto difiere significativamente de lo estudiado para transistores verticales.

## REFERENCIAS

- Calvel, P, C Peyrotte, A Baiget, y E G Stassinopoulos. 1991. "Comparison of experimental measurements of power MOSFET SEBs in dynamic and static modes". *IEEE Transactions on Nuclear Science* 38 (6): 1310–14.
- Hu, S. M. 1991. "Stress-related problems in silicon technology". *Journal of Applied Physics* 70 (6): R53.
- 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.
- Peretti, G., Demarco G., Romero E., y Tais C. 2015. "3D Thermal and Mechanical Analysis of a Single Event Burnout". *IEEE Transactions on Nuclear Science* 62 (4): 1879–87.
- 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.
- Romero, E., Demarco G. y Tais C. 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.
- 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.
- Tais, C., Romero E., y Demarco G. 2009. “Thermomechanical stresses analysis of a single event burnout process”. *IEEE Transactions on Nuclear Science* 56 (3): 1521–30.
- Tais, C, Peretti G., y Romero A. 2018. “Efectos Térmicos en Estructuras MOS Poligonales bajo Condiciones de Quemado por Evento Único”. *Mecánica Computacional* 36 (48): 2201–10.
- 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.
- 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 Transactions on Nuclear Science* 33 (6): 1710–13.