

## IMPACTO DE LA CONSIDERACIÓN DE LA COMPUERTA EN LOS EFECTOS TERMOELÁSTICOS OBSERVADOS EN TRANSISTORES DE POTENCIA DURANTE UN PROCESO DE QUEMADO POR EVENTO ÚNICO

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

<sup>a</sup> Grupo de Estudio en Calidad en Mecatrónica, Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Villa María, Avda. Universidad 450, 5900 Villa María, Córdoba, Argentina, [gecam@frvm.utn.edu.ar](mailto:gecam@frvm.utn.edu.ar), <http://www.frvm.utn.edu.ar>

<sup>b</sup> Grupo de Desarrollo Electrónico e Instrumental, Universidad Nacional de Córdoba Facultad de Matemática, Astronomía y Física, Avda. Medina Allende s/n Ciudad Universitaria, 5000 Córdoba, Argentina, [gperetti@famaf.unc.edu.ar](mailto:gperetti@famaf.unc.edu.ar)

**Palabras clave:** Efectos de la radiación, modelado de dispositivos de potencia, termoelasticidad, fallas

**Resumen.** El Quemado por Evento Único (Single Event Burnout) resulta de la interacción de una partícula cargada proveniente de la radiación espacial con un dispositivo de potencia en estado de no conducción y bloqueando tensiones relativamente altas. Este es uno de los fenómenos de mayor incidencia en la electrónica espacial y que fácilmente puede conducir al fracaso de una misión. Uno de los dispositivos más susceptibles a este tipo de eventos es el transistor DMOS (Double-Diffused Metal-Oxide-Semiconductor), atribuyéndose el fenómeno al disparo de transistores bipolares parásitos que están presentes en la estructura del dispositivo. Esto provoca la concentración de corriente en una pequeña porción del dispositivo conduciendo a una considerable elevación de la temperatura. Generalmente, este fenómeno provoca la falla catastrófica del DMOS, siendo el mecanismo de falla postulado el de fusión del silicio o de alguna de las capas que constituyen el transistor. No obstante, se ha demostrado en investigaciones anteriores que resulta de interés el análisis térmico y de esfuerzos mecánicos que se dan en la estructura del DMOS durante un SEB, debido a que pueden superarse los valores máximos admisibles para los materiales antes de que alguno alcance su temperatura de fusión. En este trabajo se estudian efectos mecánicos y térmicos en un transistor MOS de potencia considerando diferentes posiciones para la localización de la región de generación de calor provocada por el SEB. Para los estudios se simula mediante el método de elementos finitos el modelo termo elástico que representa el fenómeno de conducción térmica y de esfuerzos mecánicos que se producen durante el SEB. Se formula un modelo 3D del dispositivo más realista que el previamente utilizado por los autores, el cual no consideraba el polisilicio de la compuerta con el objeto de disminuir el costo computacional de la simulación. En este sentido, el trabajo presenta resultados que validan la simplificación realizada previamente. Asimismo, los resultados confirman, para el modelo más completo presentado aquí, la dependencia del tiempo de falla con la ubicación de la fuente de calor.

## 1 INTRODUCCIÓN

La interacción de la radiación ionizante con dispositivos electrónicos tiene diferentes manifestaciones, dando lugar a efectos indeseados como SEU (Single Event Upset), SET (Single Event Transient) y ASET (Analog Single Event Transient), entre otros. Estos eventos tendrán mayor o menor importancia dependiendo del tipo de aplicación particular que en la que ocurran. Obviamente, el escenario en el cual estos fenómenos se presentan con mayor frecuencia es el de las aplicaciones espaciales. Un evento particularmente peligroso se da cuando un transistor MOS de potencia, en estado de bloqueo de tensiones altas, interactúa con la radiación ionizante. Bajo estas circunstancias, y dependiendo de la zona de impacto del ion, es posible el disparo del transistor, elevándose la corriente de manera súbita y consecuentemente la temperatura en determinados puntos del dispositivo. Esto conduce a la falla del mismo si no se implementan mecanismos de protección ante tales eventos. Este proceso es conocido con el nombre de Quemado por Evento Único (SEB, Single Event Burnout).

La Figura 1 muestra la vista en corte de un transistor MOS de potencia, en donde se han señalado también las corrientes que se establecen cuando se da la interacción del mismo con iones de alta energía. En particular, la estructura mostrada corresponde a un transistor de tecnología DMOS.

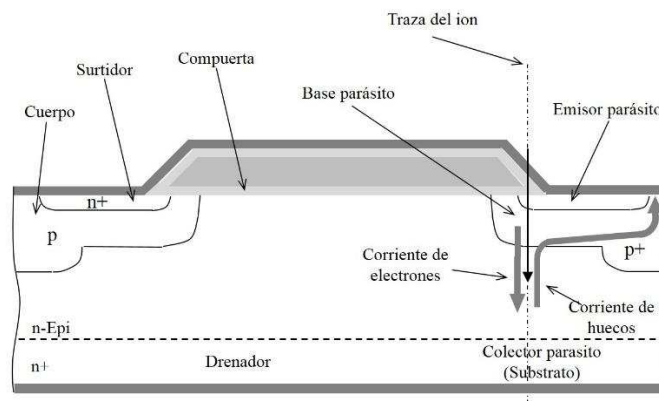


Figura 1: Estructura del transistor vertical DMOS

Un proceso SEB comienza cuando un ion de alta energía atraviesa la región del surtidor del transistor, produciendo un filamento de plasma de electrones y huecos que se localiza inicialmente en las cercanías de la trayectoria de la partícula incidente. Debido a que el dispositivo se encuentra polarizado, los campos eléctricos impuestos por estas polarizaciones hacen que los electrones fluyan hacia el drenador y los huecos hacia el colector. Cuando el filamento se localiza en cercanías del canal del MOS, la corriente de huecos genera una caída de tensión que se extiende para polarizar de manera directa la región P y la juntura de surtidor (Hohl et al. 1989). Esta polarización alcanza su máximo valor en las proximidades del filamento, fortaleciendo la polarización del transistor constituido por la fuente, el cuerpo y el drenador. Los altos campos eléctricos presentes en la región de depleción del colector conducen a efectos de multiplicación debido a avalancha, incrementando la corriente y la caída de tensión (Hohl & Galloway 1987). La corriente experimenta un crecimiento rápido hasta llegar a la ruptura secundaria del transistor NPN. Finalmente, una corrida térmica produce la falla catastrófica del dispositivo.

El primer reporte de SEBs en transistores MOS de tipo N irradiados con Cf-252 se presenta en (Waskiewicz et al. 1986). Desde entonces, diferentes autores abordaron el problema desde diversas perspectivas. Los trabajos más relevantes pueden encontrarse en (Oberg & Wert 1987;

Fischer 1987; Wrobel et al. 1985; Titus & Jamiolkowski 1989; Calvel, P., Peyrotte, C., Baiget, A. and Stassinopoulos 1991; Stassinopoulos et al. 1992; Reed et al. 2003; Kuboyama et al. 1992), caracterizándose por postular como mecanismo de falla a la fusión de alguna de las capas del dispositivo. Sin embargo, la evolución de los gradientes de temperatura que se dan durante el fenómeno SEB produce tensiones termoelásticas que, para alguna condición particular, pueden llegar a superar las máximas admisibles por el material. En (Tais et al. 2009; Romero et al. 2011) estas tensiones son tenidas en cuenta por primera vez y se demuestra que bajo ciertas condiciones el esfuerzo mecánico domina la dinámica de falla. Para esos estudios los autores adoptaron simplificaciones previamente propuestas (Walker et al. 2000), lo que hizo posible mantener el costo computacional en niveles razonables. Posteriores simplificaciones al modelo físico del dispositivo permitieron modelar posiciones más realistas de la fuente de calor que representa al SEB (Peretti et al. 2015). Para ello, los autores recurrieron a un modelado en tres dimensiones que permitió dar mayor realismo a los estudios previos. Sin embargo, debieron practicar algunas simplificaciones y consideraciones para hacer posible el estudio. La primera simplificación fue hecha al modelo en sí mismo, ya que se decidió eliminar la compuerta debido a que tenía una influencia despreciable en el comportamiento de otras capas. Por otro lado, se validó un modelo en tres dimensiones mediante comparación con un modelo en dos dimensiones, solo para la fuente de calor en la posición central.

En este trabajo, se propone un modelado más completo que incluye la compuerta del dispositivo y una validación del mismo más detallada que la anteriormente presentada en (Peretti et al. 2015). Esto permite obtener una confianza mayor en los resultados y, al mismo tiempo, obtener datos sobre el comportamiento de la compuerta, inviados anteriormente.

## 2 DESCRIPCIÓN DEL TRANSISTOR BAJO ESTUDIO

### 2.1 Geometría y ubicación de la fuente de calor

Un transistor DMOS se compone de un gran número de celdas que los fabricantes disponen de maneras diversas, siendo una de las usuales la denominada red atómica (Baliga 2010). El proceso SEB, tal como se describió más arriba, produce un incremento súbito de la corriente en el dispositivo, el cual es iniciado por la interacción con el ion incidente. Esta corriente genera una elevación también rápida de la temperatura debido a efecto Joule. Como consecuencia, aparecen en el dispositivo gradientes térmicos que provocan tensiones mecánicas en los materiales constituyentes. En el estudio que se presenta en este trabajo, se supondrá que el SEB ocurre en una de las celdas que componen el dispositivo. Esta celda se muestra en la Figura 2. Como en trabajos anteriores (Walker et al. 2000; Tais et al. 2009; Romero et al. 2011), y por cuestiones de simplicidad, se modelan los efectos del SEB como una fuente de generación de calor cilíndrica. Se asume también que la disipación de potencia está principalmente localizada en la región epitaxial del DMOS. Estas consideraciones evitan el modelado de la interacción ion-dispositivo, lo cual conduciría a un costo computacional muy grande.

Se adopta una geometría cilíndrica como una aproximación a la que tiene realmente la celda. La Figura 2 muestra la estructura utilizada para el estudio, con los materiales constituyentes y dimensiones. En este trabajo, y a diferencia de (Peretti et al. 2015), se ha tenido en cuenta la capa de polisilicio que constituye la compuerta del dispositivo. La fuente de generación de calor es mostrada en la posición centrada por una cuestión de claridad (Figura 2 a), pero durante el estudio es desplazada radialmente. Los parámetros  $r_g$  (radio de la región de generación),  $z_{go}$  (posición axial de la región de generación) y  $z_{gl}$  (espesor) caracterizan la región. Adoptamos  $z_{go} = 2\mu\text{m}$  y  $z_{gl} = 10\mu\text{m}$ . El parámetro  $r_g$  es desconocido, y puede tomar valores desde el radio de un filamento de corriente hasta el de la celda del MOSFET. Para este trabajo se adopta

$r_g=15\mu\text{m}$  de acuerdo a (Walker et al. 2000; Romero et al. 2011).

Para la potencia disipada en la región de generación consideramos dos escenarios posibles, uno correspondiente a 10W y otro a 50W. El espesor  $z_{gl} = 10\mu\text{m}$  coincide con el espesor de la capa epitaxial para un dispositivo MOS típico con un voltaje especificado de 70V (Walker et al. 2000).

Debido a que a la región de generación se desplaza en las diferentes simulaciones, se considera también el parámetro  $d$ , que es la distancia desde el centro de la región de generación al eje del dispositivo. Para nuestro estudio,  $d$  asume cuatro valores:  $0\mu\text{m}$  (centrado),  $2.5\mu\text{m}$ ,  $5\mu\text{m}$  y  $7.5\mu\text{m}$ .

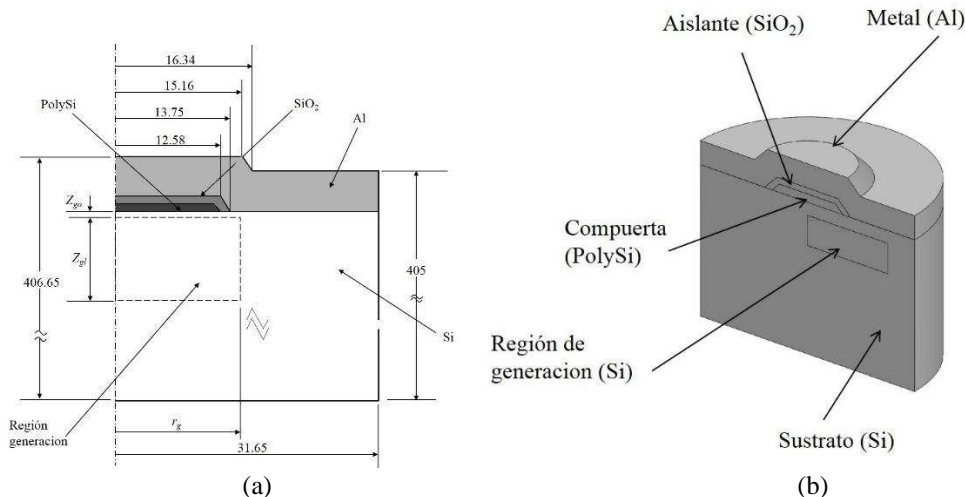


Figura 2. (a) Corte longitudinal de la celda en estudio con la estructura, dimensiones y características de la región de generación. (b) Modelo 3D. Dimensiones expresadas en  $\mu\text{m}$

## 2.2 Propiedades térmicas y mecánicas

Las propiedades térmicas y mecánicas de los materiales presentes en el dispositivo son las adoptadas en (Tais et al. 2009), no obstante, se reproducen aquí por cuestiones de claridad.

Se considera que todos los materiales presentes en el dispositivo son isotrópicos (Feng & Wu 2001). El modelo tiene en cuenta la dependencia con la temperatura de las propiedades de los materiales (MATWEB 2010). Se asume que la falla térmica en un determinado material se alcanza cuando se supera su correspondiente punto de fusión. Por otra parte, se adopta el criterio de falla debido a esfuerzos mecánicos dependiendo del comportamiento de cada material. Se consideran el silicio, el polisilicio y el dióxido de silicio como frágiles mientras que el aluminio como dúctil. La falla de los materiales frágiles resulta súbita, sin deformaciones plásticas significativas, y se adopta la teoría de la máxima tensión normal como criterio de falla. Para el aluminio, se utiliza el criterio de la máxima energía de distorsión (tensión equivalente de Von Mises) para describir las características de la falla.

## 3 MODELO FÍSICO

En esta sección presentamos las ecuaciones gobernantes para la conducción de calor y el fenómeno de tensiones y deformaciones asociado, utilizadas para determinar el campo de temperaturas y de tensiones que ocurren en el dispositivo durante el proceso SEB.

### 3.1 Ecuación de desplazamiento

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 (Nowacki 1962):

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

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  $\epsilon_{ij}$  ( $i, j = 1..3$ ),  $\rho$  es la densidad del material,  $\gamma = (3\lambda + 2\nu)/\alpha$  donde  $\alpha$  es el coeficiente de expansión térmica.

Si bien el análisis térmico es dependiente del tiempo, los efectos dinámicos mecánicos pueden ser despreciados debido a la diferencia en la escala de tiempos del fenómeno térmico y mecánico. Así es posible efectuar un tratamiento cuasiestático al problema y el término de inercia  $\rho \ddot{u}$  puede despreciarse en la ecuación (1).

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

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.

### 3.2 Ecuación de conducción de calor

La ecuación de conducción de calor es:

$$\rho c \dot{T} - k T_{,kk} + k \eta \dot{e} = W \quad (5)$$

Donde  $\dot{T} = dT/dt$ ,  $T_{,kk} = \nabla^2(T)$ ,  $c$  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:

$$\rho c \dot{T} - k T_{,kk} = W \quad (6)$$

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 (resolviendo (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.

#### 4 RESOLUCIÓN NUMÉRICA

Para resolver (2) y (6) se utiliza software comercial basado en el método de elementos finitos empleando la malla mostrada en la Figura 3. La discretización espacial se realiza con una malla de elementos tetraédricos no estructurados con una formulación cuadrática lagrangeana.

La densidad de malla se incrementa en el área de compuerta dada las reducidas dimensiones de las capas en esa región y la localización de materiales con diferentes propiedades térmicas y mecánicas. De esta forma es posible obtener una solución suficientemente precisa.

Se supone 300K como temperatura inicial, estableciéndose como condición de borde que la superficie superior y la lateral estén aisladas mientras que la superficie inferior permanece a la temperatura constante de 300K. También se reduce la altura de la capa de sustrato de  $400\mu\text{m}$  a  $50\mu\text{m}$  con el objeto de disminuir la cantidad de elementos del modelo. Estas condiciones son similares a las empleadas en (Walker et al. 2000) y (Tais et al. 2009). La dimensión radial ( $31.65\mu\text{m}$ ) se elige de manera que las condiciones de borde no afecten los resultados en las regiones de observación.

El algoritmo de resolución del sistema no lineal que resulta de la discretización en elementos finitos utiliza una forma modificada del método amortiguado de Newton que se describe en (Deuflhard 1974).

Para la resolución del sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias se utiliza el solver DASPK (Brown, P. N., Hindmarsh, A. C., y Petzold 1994), que utiliza una fórmula de diferenciación hacia atrás de orden y paso variable (Brenan, K. E., Campbell, S. L. y Petzold 1989). El solver presenta un esquema de avance en el tiempo de características implícitas, por lo que en cada etapa resuelve un sistema de ecuaciones lineales o no lineales, con características adaptivas en cuanto al paso temporal.

Para el análisis detallado de los efectos térmicos y mecánicos en la capa metálica y la compuerta se utiliza la técnica de submodelado. Esta técnica consiste en efectuar un primer análisis en el modelo global el cual se discretiza mediante una malla adecuada para obtener resultados precisos en las superficies que limitan las regiones de interés. En un segundo análisis, se analizan únicamente estas regiones transfiriendo los valores de las variables en los bordes calculadas anteriormente. En este último modelo se incrementa la densidad de la malla respecto al primer análisis permitiendo obtener mayor precisión en los resultados en áreas donde se presentan irregularidades geométricas de importancia.

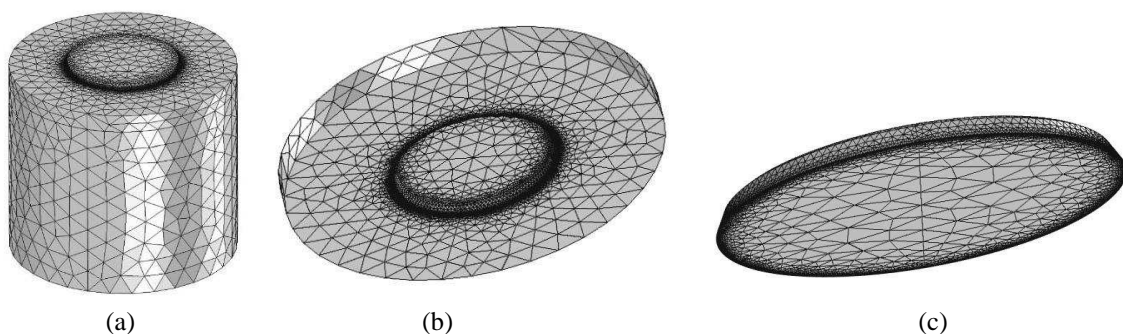


Figura 3: Discretización con elementos (a) Modelo completo (b) Submodelo del metal (c) Submodelo de la compuerta

## 5 RESULTADOS DE SIMULACIÓN

### 5.1 Comportamiento de la capa metálica

Como ha sido demostrado en trabajos anteriores (Peretti et al. 2015), la capa de metal es aquella en la cual se producen los efectos más severos durante un proceso SEB. Por este motivo, en el presente se hace foco en lo que sucede en esta capa. Para su material constituyente (aluminio) se considera como valor límite para la falla una tensión máxima admisible de 170MPa y una temperatura de fusión de 930K.

Sobre el campo de temperaturas observado en el metal, puntualizaremos que se llega a valores críticos en temperatura (fusión) para tiempos mucho más elevados que aquellos en los que se produce la falla mecánica. En este sentido, nuestros resultados de simulación confirman lo observado en trabajos anteriores, respecto de que la dinámica de la falla en el dispositivo bajo SEB está dominada por efectos mecánicos. Por este motivo, y con el fin de brindar mayor detalle de las curvas que son de interés, se ha decidido no reportar aquí los resultados referentes a la evolución de temperatura en el metal, limitando la presentación a las curvas de esfuerzos mecánicos.

Uno de los objetivos del presente trabajo es evaluar el impacto de la inclusión de la compuerta en el modelo de simulación tridimensional, determinando las diferencias con lo observado previamente (Peretti et al. 2015), en cuanto a la evolución del esfuerzo mecánico en la capa de metal. Con el propósito de realizar una comparación consistente, se han mantenido los puntos en los cuales se ha evaluado la máxima tensión.

Las Figura 4 (a) a (d) muestran la evolución temporal del valor máximo de la tensión equivalente de Von Mises en el metal, para los dos modelos considerados (con polisilicio y sin polisilicio), para la fuente de generación de calor con radio  $15\mu\text{m}$  y potencia de 10W.

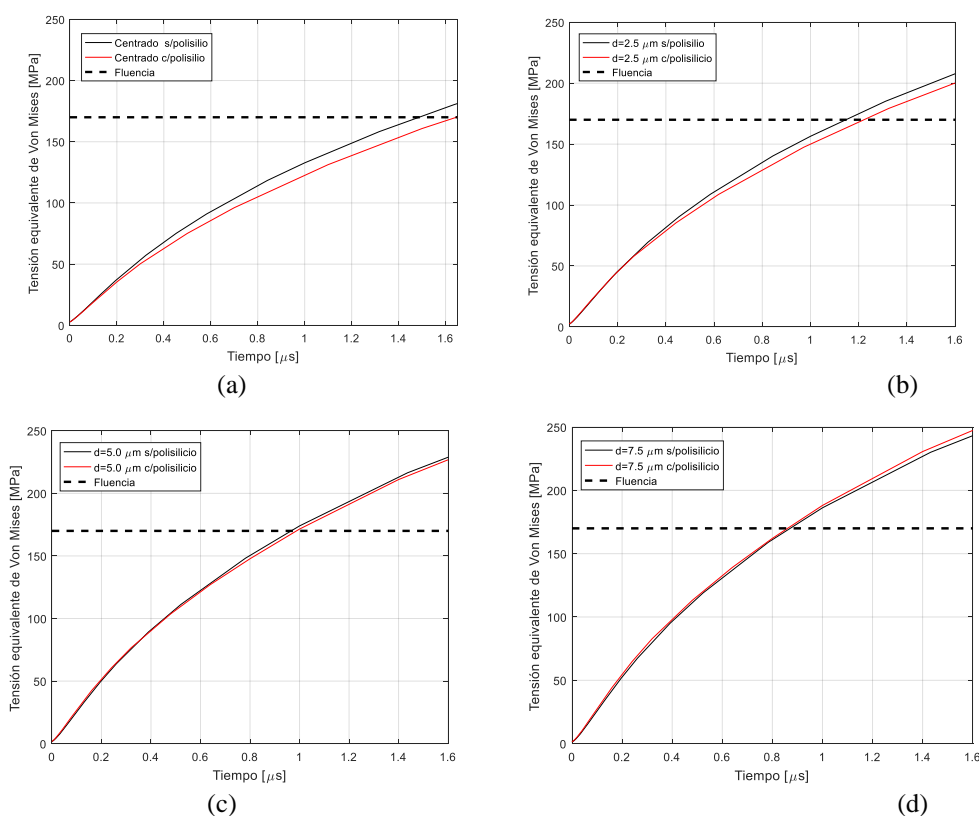


Figura 4: Evolución de la máxima tensión de Von Mises en la capa metálica para potencia de 10W, para distintas posiciones de la región de generación. (a) centrada, (b)  $d=2,5\mu\text{m}$ , (c)  $d=5,0\mu\text{m}$ , (d)  $d=7,5\mu\text{m}$ .



Desde estas gráficas puede notarse un acuerdo significativo entre los resultados, observándose diferencias que se consideran como menores. También se confirma la dependencia del esfuerzo mecánico máximo respecto de la posición de la fuente de generación, observada en trabajos previos.

Un punto de comparación interesante es el del tiempo estimado a la falla, en este caso aquel en el que se alcanza la fluencia del metal. El límite de tensiones admisibles para el metal se reporta en los gráficos con línea de puntos, para facilitar la lectura de los tiempos correspondientes. Se considera que las diferencias observadas en los tiempos estimados a la falla son tolerables para este caso, justificándose la adopción de un modelo simplificado. Para facilitar la comparación entre estos tiempos, los mismos se reportan en la Tabla 1. Como puede observarse de la misma, las diferencias en la estimación del tiempo a la falla alcanzan al 9,73%. Es interesante observar que, para aquellos casos en los que se evidencian diferencias mayores, el modelo simplificado (sin polisilicio) brinda resultados más conservadores, debido a que entrega un tiempo estimado a la falla menor.

En la Tabla 2 se presentan los valores de tensiones presentes en el modelo con polisilicio al tiempo en que el modelo simplificado alcanza la tensión de falla. Para todos los casos analizados, el valor es siempre menor en el modelo más completo, siendo la diferencia máxima observada entre los dos modelados de 10,2%.

Las Figura 5 (a) a (d), muestran la evolución del campo de tensiones en el metal para una fuente de generación de calor de potencia igual a 50W.

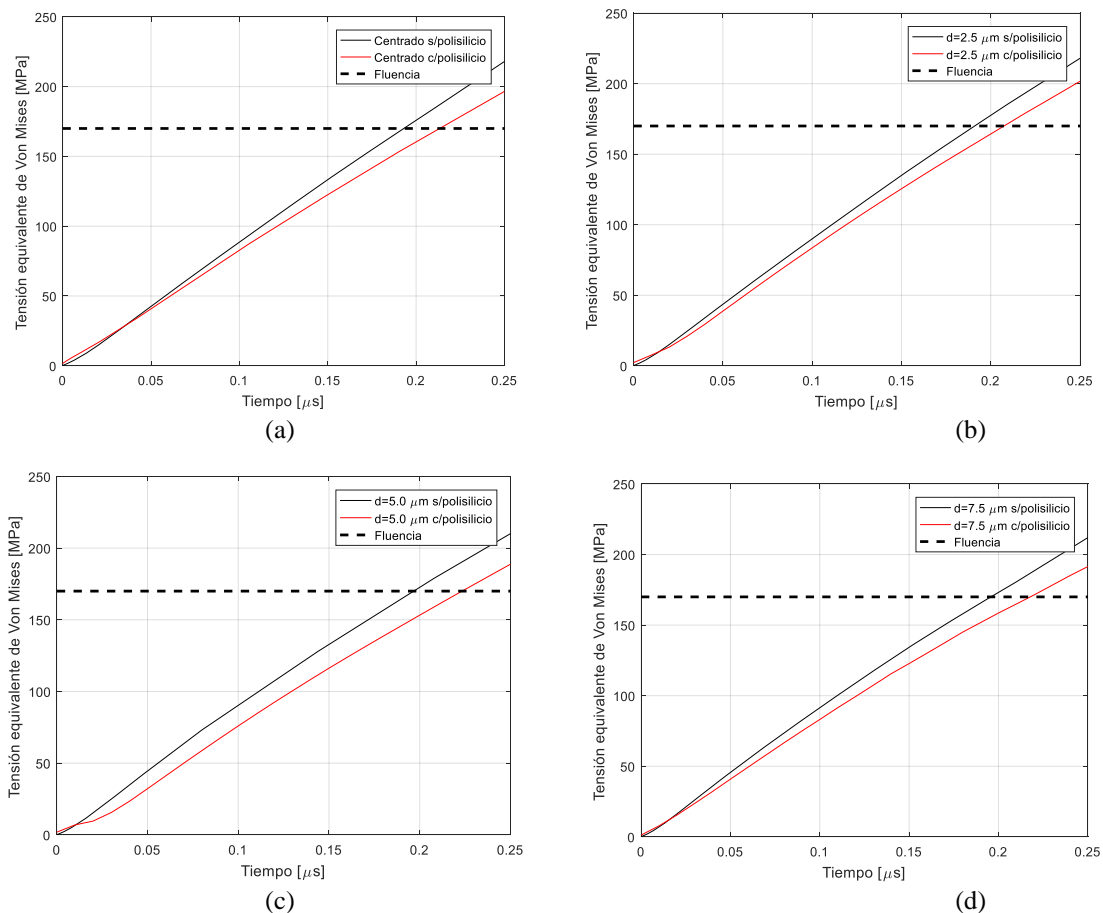


Figura 5: Evolución de la máxima tensión de Von Mises en la capa metálica para potencia de 50W. (a) centrada, (b)  $d=2,5\mu\text{m}$ , (c)  $d=5,0\mu\text{m}$ , (d)  $d=7,5\mu\text{m}$ .



Para este caso, las curvas muestran diferencias más marcadas, pero se consideran también menores. El modelo simplificado brinda resultados más conservadores, con tiempos de falla menores, tal como en el caso anterior. Para el caso de esta fuente de generación de calor se observa que no existen diferencias significativas entre los tiempos de falla para cada una de las posiciones consideradas. Para facilitar la lectura de los tiempos de falla brindados por cada modelo, estos están también reportados en la Tabla 1. El máximo error cometido en la estimación del tiempo de falla asciende para a 15,15%. Por otra parte, si se observan los valores de tensiones presentes en el modelo con polisilicio en el tiempo en que se alcanza la falla en el modelo simplificado (Tabla 2), se encuentra que la tensión en el modelo con la compuerta incluida presenta valores menores, con una diferencia máxima de 14,2%.

Desplazamiento de la región de generación d ( $\mu\text{m}$ )	Potencia 10W		Potencia 50W	
	Sin compuerta	Con compuerta	Sin Compuerta	Con compuerta
Centrada	1.500	1.646	0.193	0.213
2.5	1.156	1.220	0.193	0.205
5	0.970	0.987	0.194	0.223
7.5	0.874	0.861	0.194	0.218

Tabla 1: Comparación de los tiempos de falla, expresados en  $\mu\text{s}$

Desplazamiento de la región de generación d ( $\mu\text{m}$ )	Potencia 10W		Potencia 50W	
	Tiempo ( $\mu\text{s}$ )	Tensión Von Mises (MPa)	Tiempo ( $\mu\text{s}$ )	Tensión Von Mises (MPa)
Centrada	1.500	160.8	0.193	153.5
2.5	1.156	152.6	0.193	156.7
5	0.970	168.2	0.194	145.9
7.5	0.874	169.2	0.194	151.8

Tabla 2: Máxima tensión equivalente de Von Mises en el metal en el modelo con compuerta, al instante de la falla mecánica en el modelo sin compuerta.

Los resultados de esta sección permiten concluir que los errores observados pueden considerarse como menores y apoyan la confirmación de la hipótesis planteada respecto de que la inclusión de la compuerta en el modelo no afectará significativamente los resultados relacionados a los tiempos de falla y al comportamiento general del dispositivo cuando se desplaza la fuente de calor.

## 5.2 Comportamiento de la compuerta

Para caracterizar el comportamiento de la compuerta, se asume como criterio de falla para esta capa de polisilicio una máxima tensión admisible de 1200MPa y una temperatura de fusión de 1700K. Si bien se han evaluado los resultados correspondientes a todas las posiciones de la fuente, se reportan aquí (por razones de claridad) solamente los casos más críticos. Estos corresponden a la fuente desplazada 7,5  $\mu\text{m}$  del eje del dispositivo ( $d=7,5 \mu\text{m}$ ), para las dos condiciones de potencia de la fuente, 10W (Figura 6) y 50W (Figura 7).

En ambas figuras se muestra solamente la zona de interés para esta parte del estudio

(polisilicio), obtenida del modelo 3D utilizado para nuestras evaluaciones. Si bien se han considerado diferentes cortes para explorar el comportamiento de esta capa, se presentan solamente los resultados correspondientes a un corte efectuado con un plano que contiene el eje del dispositivo y la recta sobre la que se desplaza la fuente de generación. Esto se debe a que en ningún caso se han hallado valores que alcancen a los críticos (tanto de temperatura como de tensiones). Para el corte seleccionado, se reportan la distribución de los valores que alcanza la tensión principal (Figura 6a y Figura 7a) y de la temperatura (Figura 6b y Figura 7b), para el tiempo de falla reportado en la Tabla 1. Se debe puntualizar que el plano de corte se selecciona de manera que coincide con los máximos valores de tensión observados en la compuerta.

Como puede observarse de las figuras, en ninguno de los casos analizados se llega a la falla de la compuerta al momento en que se produce la falla de la capa metálica. Por otro lado, también puede notarse como los valores más altos de tensiones y temperaturas de la compuerta se presentan coincidentes con el desplazamiento de la región de generación.

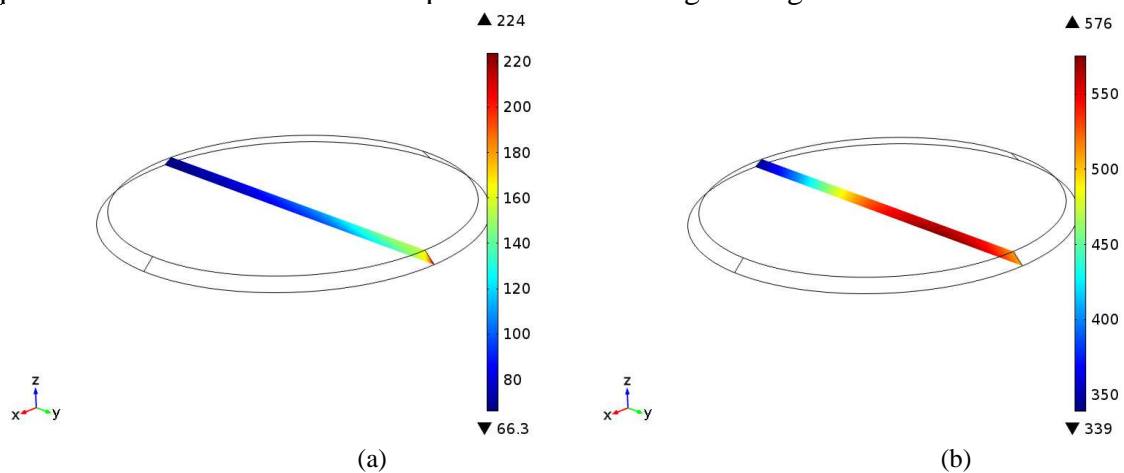


Figura 6: Distribución espacial en la compuerta para región de generación de 10W en  $d=7.5\mu\text{m}$ . (a) máxima tensión principal (MPa) y (b) temperatura (K) a  $t=0.874\mu\text{s}$ .

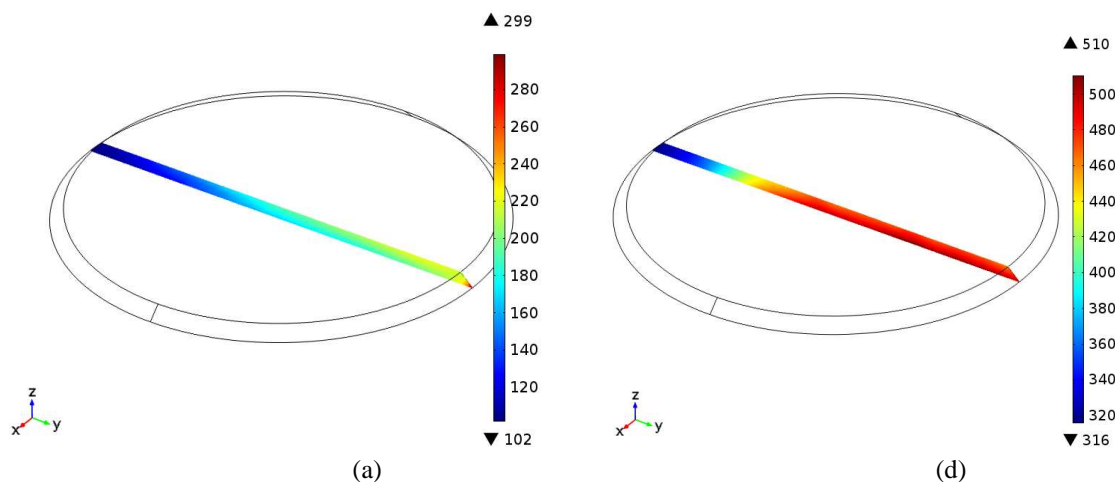


Figura 7: Distribución espacial en la compuerta para región de generación de 50W en  $d=7.5\mu\text{m}$ . (a) máxima tensión principal en MPa y (b) temperatura en K a  $t=0.194\mu\text{s}$ .

## 6 CONCLUSIONES

En este trabajo se han profundizado los estudios previamente presentados por estos autores, relacionados a los efectos térmicos y mecánicos que experimenta un transistor MOS sujeto a un proceso SEB. En particular, se ha adoptado un modelo 3D que contempla la capa de polisilicio de la compuerta, a los fines de corroborar el postulado previamente realizado en el sentido de que esta capa no altera significativamente el comportamiento del dispositivo.

Nuestros resultados de simulación muestran diferencias que se consideran como menores entre los dos tipos de modelado (con polisilicio y sin polisilicio), sumando suficiente evidencia que sugiere que el postulado efectuado anteriormente es válido.

Adicionalmente a la verificación arriba mencionada, se aportan resultados correspondientes a la compuerta, los cuales eran inviables en el modelado anteriormente efectuado. Nuestros resultados sobre este particular muestran que no se alcanzan valores críticos de temperatura ni de tensión. En este sentido, la dinámica de falla observada se mantiene, en el sentido de que es la capa metálica la que primero falla debido a que se superan las tensiones máximas admisibles mientras que en la compuerta no se alcanzan valores de esfuerzo y temperatura próximos a los críticos al momento de producirse la condición crítica en la capa de metal.

## REFERENCIAS

- Baliga, B.J., 2010. *Advanced Power MOSFET Concepts*, Boston, MA: Springer US.
- Brenan, K. E., Campbell, S. L. y Petzold, L.R., 1989. *Numerical Solution of Initial-Value Problems in Differential-Algebraic Equations. 2da Ed.*,
- Brown, P. N., Hindmarsh, A. C., y Petzold, L.R., 1994. Using Krylov methods in the solution of large scale differential algebraic systems. *SIAM Journal Science Computer*, 15, pp.1467–1488.
- Calvel, P., Peyrotte, C., Baiget, A. and Stassinopoulos, E., 1991. Comparison of experimental measurements of power MOSFET SEBs in dynamic and static modes. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 38(6), pp.1310–1314.
- Deuflhard, P., 1974. A modified Newton method for the solution of ill-conditioned systems of nonlinear equations with application to multiple shooting. *Numerische Mathematik*, 22(4), pp.289–315.
- Feng, Y. & Wu, L., 2001. Analysis of interfacial thermal stresses of chip-substrate structure. *International Journal of Solids and Structures*, 38(9), pp.1551–1562.
- Fischer, T.A., 1987. Heavy-ion induced, gate rupture in power MOSFETs. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, (6), pp.1786–1791.
- Hohl, J.H. & Galloway, K.F., 1987. Analytical model for single Event Burnout of power MOSFETs. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 0(6), pp.1275–1280.
- Hohl, J.H.H., Johnson, G.H. & Johnson, G.H., 1989. Features of the triggering mechanism for Single Event Burnout of power MOSFETs. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 36(6), pp.2260–2266.
- Hu, S.M., 1991. Stress-related problems in silicon technology. *Journal of Applied Physics*, 70(6), p.R53.
- Kuboyama, S. et al., 1992. Mechanism for single-event burnout of power MOSFETs and its characterization technique. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 39(6), pp.1698–1703.
- MATWEB, 2010. Online Materials Information Resource - MatWeb.
- Nowacki, W., 1962. *Thermoelasticity*, Addison-Wesley Publishing Company.
- Oberg, D.L. & Wert, J.L., 1987. First nondestructive measurements of power MOSFET Single Event Burnout cross sections. *IEEE Trans. on Nuclear Science*, 34, pp.1736–1741.
- Peretti, G. et al., 2015. 3D Thermal and Mechanical Analysis of a Single Event Burnout. *IEEE*

- Transactions on Nuclear Science*, 62(4), pp.1879–1887.
- Reed, R.A. et al., 2003. Single-event effects ground testing and on-orbit rate prediction methods: the past, present, and future. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 50(3), pp.622–634.
- Romero, E., Demarco, G.L. & Tais, C.E., 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), pp.171–178.
- Stassinopoulos, E.G. et al., 1992. Charge generation by heavy ions in power mosfets, burnout space predictions, and dynamic SEB sensitivity. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 39(6), pp.1704–1711.
- Tais, C.E., Romero, E.A. & Demarco, G.L., 2009. Thermomechanical stresses analysis of a Single Event Burnout process. *IEEE Trans. Nuclear Science*, 56(3), pp.1521–1530.
- Titus, J.L. & Jamiolkowski, L.S., 1989. Development of cosmic ray hardened power MOSFETs. *IEEE Trans. on Nuclear Science*, 36(6), pp.2375–2382.
- Walker, D.G. et al., 2000. Thermal characterization of Single Event Burnout failure in semiconductor power devices. *Sixteenth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*, 21(23), pp.213–219.
- Waskiewicz, A.E. et al., 1986. Burnout of power MOS transistors with heavy ions of Californium-252. *IEEE Trans. on Nuclear Science*, 33(6), pp.1710–1713.
- Wrobel, T.F. et al., 1985. Current induced avalanche in epitaxial structures. *IEEE Trans. on Nuclear Science*, 32, pp.3991–3995.