

EFFECTOS TÉRMICOS EN ESTRUCTURAS MOS POLIGONALES BAJO CONDICIONES DE QUEMADO POR EVENTO UNICO

THERMAL EFFECTS IN POLYGONAL MOS STRUCTURES UNDER CONDITIONS OF SINGLE EVENT BURNOUT

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

^a 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

^b 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

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

Resumen. El Quemado por Evento Único (SEB, Single Event Burnout) es un proceso provocado por la interacción de un ion pesado con algunos dispositivos semiconductores tales como transistores de potencia DMOS. En un SEB, la interacción ion-dispositivo produce una fuerte concentración de corriente en una pequeña región del dispositivo. Esto provoca un aumento muy rápido de la temperatura por efecto Joule, que puede conducir a la fusión de alguna capa del transistor. Simular la evolución temporal del campo de temperaturas interna del dispositivo es importante para la implementación de estrategias de mitigación. En este trabajo, se adopta una topología de celda cuadrada, que dificulta la extrapolación de resultados previos. Las simulaciones muestran que la capa crítica que alcanza el punto de fusión depende de la densidad de potencia. Estos resultados difieren de los presentados previamente y confirman la influencia de la geometría del dispositivo en el análisis de los efectos provocados por el SEB.

Keywords: Radiation effects, power devices modeling, thermoelasticity.

Abstract. The Single Event Burnout (SEB) is a process caused by the interaction of a heavy ion with some semiconductor devices such as DMOS power transistors. In an SEB, the ion-device interaction produces an intense concentration of current in a small region of the device. The current causes a very rapid increase in temperature due to the Joule effect, which can lead to the fusion of some transistor layer. Simulating the temporal evolution of the internal temperature field of the device is important for the implementation of mitigation strategies. In this work, a square cell topology is adopted, which makes it difficult to extrapolate previous results. The simulations show that the critical layer that reaches the melting point depends on the power density. For some cases, it is metal while for others it is silicon. These results differ from those previously presented and confirm the influence of the geometry of the device in the analysis of the effects caused by the SEB.

1 INTRODUCCION

El quemado por evento único (SEB, Single Event Burnout) es un efecto destructivo que se produce en transistores MOS de potencia, normalmente bajo estado de no conducción y bloqueando tensiones inversas elevadas. Bajo estas circunstancias, la interacción del dispositivo con radiación ionizante puede disparar el transistor, desencadenando una secuencia de eventos que producen disipación de potencia en un volumen muy pequeño del mismo. Normalmente este volumen se reduce al de una celda MOS o menor aún. Esto ocasiona la falla catastrófica del dispositivo. Los mecanismos involucrados en el disparo del transistor y efectos subsecuentes pueden encontrarse en nuestros trabajos previos (Tais et al. 2009; Romero et al. 2011; Peretti et al. 2015). Si bien este efecto es dominante en medioambientes ricos en radiación ionizante, entre el cual debe destacarse el espacial, existen evidencias de que existen SEB a alturas relativamente bajas (Hands et al. 2011). Esto ha generado un gran interés en el desarrollo de mecanismos de mitigación que eviten el riesgo de que este fenómeno provoque la salida de servicio de sistemas de seguridad crítica. Sin embargo, para diseñar estos sistemas, es necesario comprender adecuadamente la dinámica de falla que se da en estos eventos. Esta es dependiente de las tecnologías y topologías utilizadas para la implementación de los dispositivos MOS, las cuales son muy diversas. Este hecho complica el estudio, siendo necesaria una investigación caso por caso.

El primer reporte de SEBs en transistores MOS se presenta en (Waskiewicz et al. 1986). Desde entonces, diferentes autores abordaron el problema desde diversas perspectivas. Los trabajos más relevantes pueden encontrarse en (Fischer 1987; Wrobel et al. 1986; Titus & Jamiolkowski 1989; Calvel, P., Peyrotte, C., Baiget, A. and Stassinopoulos 1991; Stassinopoulos et al. 1992; Reed et al. 2003; Kuboyama et al. 1992). Estos autores postulan como mecanismo de falla a la fusión de alguna de las capas del dispositivo. La consideración de las tensiones termoelásticas como mecanismo de falla probable se presenta en (Tais et al. 2009; Romero et al. 2011), realizando aproximaciones propuestas por otros autores (Walker et al. 2000). El modelo utilizado en estos estudios es posteriormente simplificado para hacer posible su estudio en 3D, para considerar posiciones más realistas de la fuente de calor (Peretti et al. 2015). Posteriores refinamientos al modelo permitieron extender estos estudios y obtener datos del comportamiento de la compuerta (Tais et al. 2017).

Los trabajos anteriores han sido realizados utilizando geometrías cilíndricas para el dominio físico. Estas aproximaciones resultan razonables para algunas topologías de transistores MOS de potencia, como los denominados de red atómica (Baliga 2010). Sin embargo, cuando se consideran disposiciones diferentes, como la rectangular o cuadrada, la aproximación resulta grosera siendo necesario un nuevo modelado y la consecuente evaluación. Adicionalmente, en los trabajos previos se ha reducido el dominio bajo estudio a una única celda. Esta consideración se basa en el supuesto de que el SEB tiene efectos muy localizados en la zona cercana a la que se inicia el evento. Sin embargo, cuando se consideran fuentes de disipación de potencia (que representan los efectos del SEB) en diferentes posiciones, la consideración de celda única podría resultar inconveniente.

En el presente trabajo se presentan resultados de un análisis térmico realizado sobre un MOS de layout cuadrado, considerando diferentes posiciones de la fuente de calor. El dominio físico considerado, a diferencia de trabajos anteriores, tiene en cuenta la celda sobre la que se produce el SEB y las vecinas, con el ánimo de obtener resultados más realistas.

2 DESCRIPCIÓN DEL TRANSISTOR BAJO ESTUDIO Y DOMINIO FÍSICO CONSIDERADO

2.1 Layout bajo estudio

Una celda elemental de transistor MOS vertical puede verse en la Figura 1, siendo posibles diferentes disposiciones físicas (layouts) que permiten lograr esta estructura. Las de red atómica, hexagonales y cuadradas, entre otras, son las más usuales. Hasta el presente se han utilizado para los estudios de SEB estructuras que pueden aproximarse por geometrías cilíndricas. En este trabajo se considerará un layout de celda cuadrada que requiere de un modelado diferente.

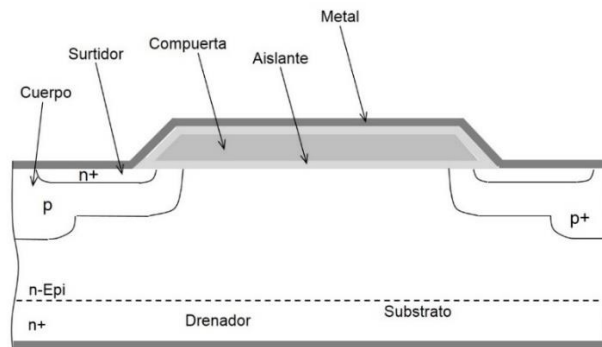


Figura 1: Celda elemental de un transistor MOS vertical

En la Figura 2a se muestra una vista en corte de la geometría cuadrada del dispositivo y la disposición de capas, que es importante para la interpretación de los resultados. También se muestra el dominio modelado (Figura 2 b), en el cual puede verse que se ha tenido en cuenta la celda en la que se produce el SEB y sus vecinas.

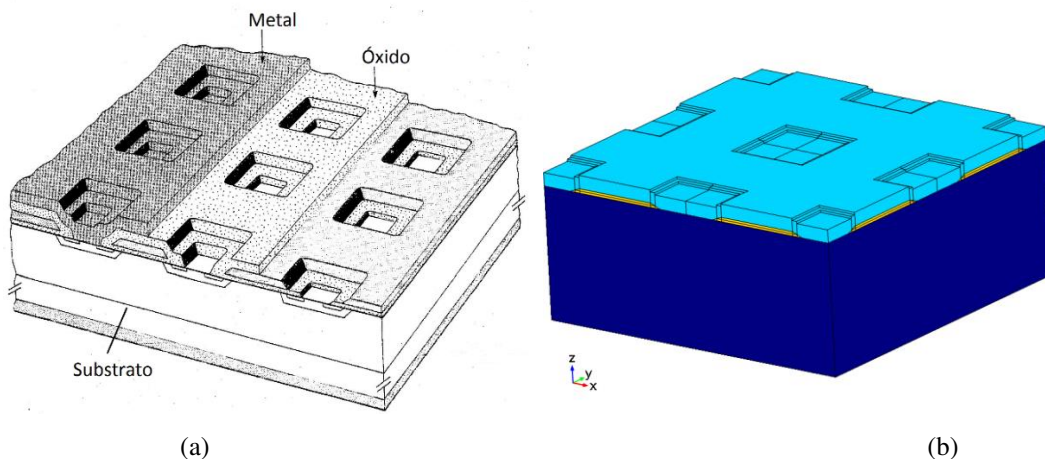


Figura 2: a) Geometría y disposición de capas del dispositivo. b) Dominio modelado

2.2 Fuente de generación de calor

El proceso SEB, tal como se describió antes, 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. En el estudio que se presenta en este trabajo, se supondrá que el SEB ocurre en una de las celdas que componen el dispositivo. Como en trabajos anteriores (Walker et al. 2000; Tais et al. 2009; Romero et al. 2011), 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. No se han efectuado aproximaciones a la disposición de la celda, la cual se mantuvo con geometría cuadrada. La Figura 3 muestra la estructura utilizada para el estudio, con los materiales constituyentes y dimensiones.

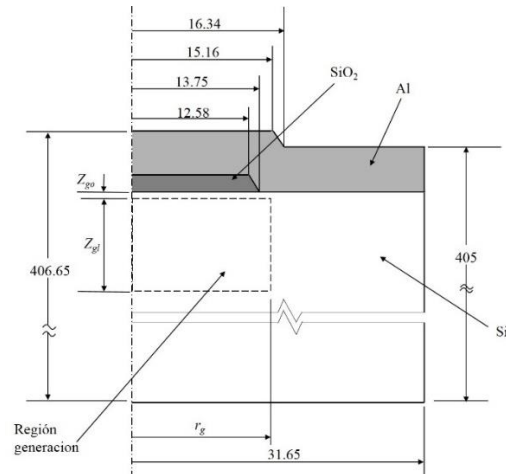


Figura 3: MOS utilizado en las simulaciones y características de la región de generación de calor (dimensiones en μm)

La fuente de generación de calor se muestra en la posición centrada por una cuestión de claridad, pero durante el estudio es desplazada a diferentes posiciones. 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 adoptan dos radios para la fuente de generación de calor, $10 \mu\text{m}$ y $15 \mu\text{m}$. Se asumen también dos potencias posibles 10W y 50W (Peretti et al. 2015). 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).

En la Figura 4 se ilustran las posiciones de la fuente de calor que se han considerado en este trabajo, con un número asignado para referenciarlas posteriormente.

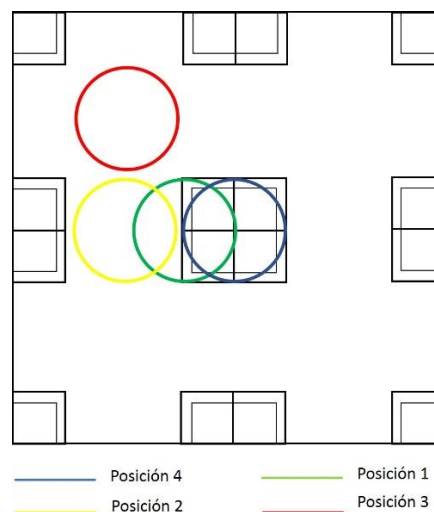


Figura 4: Posiciones de la fuente de calor consideradas en las simulaciones

3 MODELO FÍSICO Y ESQUEMA NUMÉRICO DE RESOLUCIÓN

La ecuación de conducción de calor es:

$$\rho c \dot{T} - k T_{,kk} = W \quad (1)$$

Donde $\dot{T} = dT/dt$, $T_{,kk} = \nabla^2(T)$, ρ es la densidad del material, c es la capacidad calorífica, k es la conductividad térmica, 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 .

La ecuación (1) es una ecuación diferencial no lineal parabólica (PDE) dados que sus coeficientes c y k son dependientes de la temperatura (MATWEB 2010). Su solución determina el campo de temperatura como función de la posición y el tiempo.

Se supone 300K como temperatura inicial. Las condiciones de borde establecen la superficie superior aislada mientras que la superficie inferior y laterales se mantienen a una temperatura constante de 300K. Estas condiciones son similares a las empleadas en Walker et al. (2000).

Por simplicidad se ha considerado que todos los materiales empleados en este trabajo son isotrópicos (Feng & Wu 2001).

Se define la falla térmica de un determinado material cuando se alcanza su correspondiente punto de fusión. La Tabla 1 muestra el punto de fusión de los materiales constituyentes.

Material	Punto de fusión [K]
Substrato [Si]	1700
Aislante [SiO ₂]	1900
Metal (Al)	930

Tabla 1: Punto de fusión de los materiales.

Para resolver (1) se utiliza software comercial (COMSOL MultiPhysics) basado en el método de elementos finitos. La discretización espacial se realiza con una malla triangular no estructurada con elementos tetraédricos de segundo orden. Para el análisis detallado de los efectos térmicos se utiliza la técnica de submodelado (Tais et al. 2017). En la Figura 5 se muestran las mallas correspondientes al modelo global y a los submodelos del metal y el óxido.

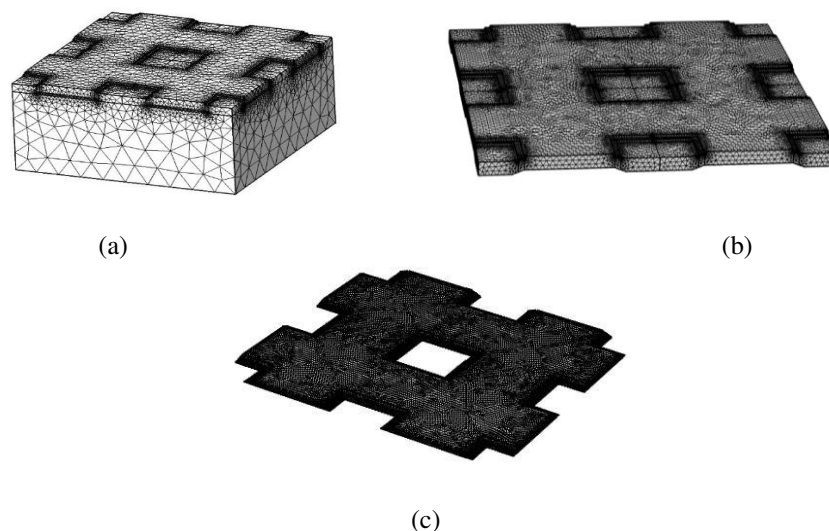


Figura 5: Discretización en elementos finitos del dominio en estudio. a) Dominio completo, b) Subdominio del metal y c) Subdominio del óxido

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. Para la resolución del sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias, el solver utiliza una fórmula de diferenciación hacia atrás de orden y paso variable con características adaptivas (Tais et al. 2009; Romero et al. 2011; Peretti et al. 2015).

4 RESULTADOS DE SIMULACIÓN

4.1 Fuente de calor de 10W

Como se mencionó anteriormente, se evaluaron dos densidades de potencia, manteniendo la potencia de la fuente de calor y tomando dos valores para $r_g = 10 \mu\text{m}$ y $r_g = 15 \mu\text{m}$.

Para $r_g = 10 \mu\text{m}$ y con la fuente ubicada en la posición 1, los resultados de evolución de temperatura máxima en los materiales constitutivos muestran que el silicio exhibe temperaturas por encima de los demás (Figura 6a).

Las posiciones 2 y 3 muestran comportamientos cualitativamente similares, motivo por el que las gráficas correspondientes a estos casos no son reportadas en este trabajo. Para estas posiciones de la fuente de calor (2 y 3) se observa un leve aumento de temperatura en la capa metálica. Se debe puntualizar que en estas posiciones la capa de óxido se interpone totalmente entre el silicio, donde se ubica la fuente de calor, y la capa metálica. Como consecuencia, es esperable un menor flujo de calor hacia el metal. Esta consideración parece confirmarse en la posición 4, en donde no existe capa de óxido entre el silicio y el metal. Para este caso, la máxima temperatura en el metal experimenta una elevación de temperatura que siempre se encuentra por sobre la observada en el óxido (Figura 6b).

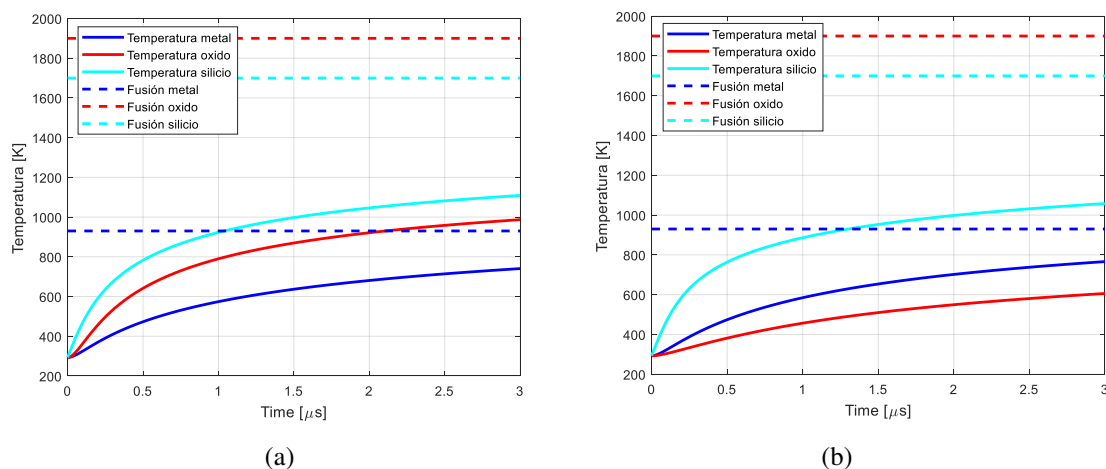


Figura 6: Evolución de la temperatura máxima para distintas posiciones de la fuente de generación, $r_g = 10 \mu\text{m}$. a) Posición 1, b) Posición 4

Cuando se aumenta el radio de la fuente de generación de calor a $15 \mu\text{m}$ se observan en la Figura 7 comportamientos similares al caso anterior. Como diferencia fundamental, se menciona que la menor densidad de potencia de la fuente de calor impacta en las temperaturas máximas observadas. Para este caso, se llegan a temperaturas menores que el caso previo. Si bien en la posición 4 se observa inicialmente una evolución temporal de la temperatura del óxido por arriba de la del metal, a tiempos medianamente largos se observa la prevalencia del segundo.

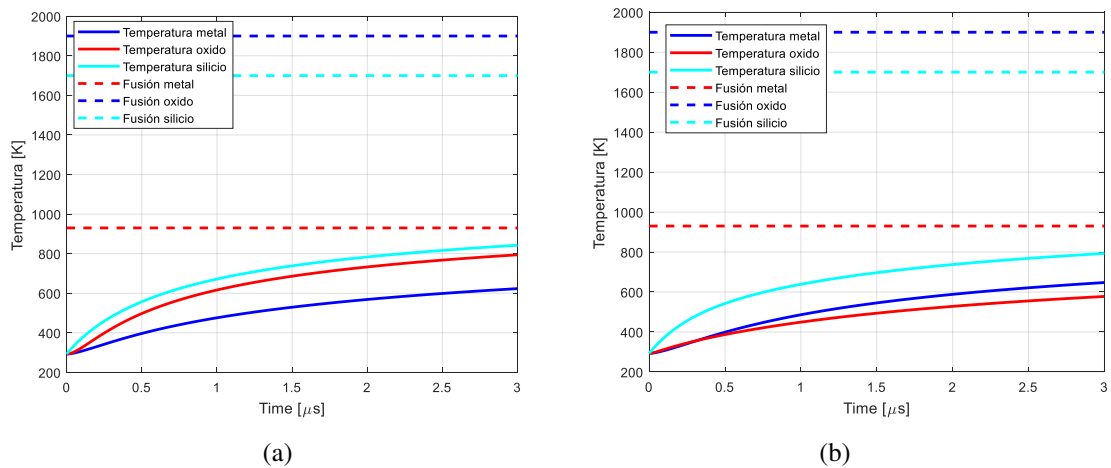


Figura 7: Evolución de la temperatura para distintas posiciones de la fuente de generación, $r_g = 15 \mu\text{m}$. a) Posición 1, b) Posición 4

Si bien los resultados sugieren que el silicio puede ser la capa crítica para los casos evaluados ya que su temperatura aumenta por encima de las demás, la disminución de la pendiente de las curvas y las diferentes temperaturas máximas admisibles para los diferentes materiales pueden conducir a una situación diferente para tiempos mayores que los considerados.

Para evaluar esta posibilidad, se toma el caso de $r_g = 15 \mu\text{m}$ y se evalúan las temperaturas en estado estacionario. Los resultados muestran que para ninguna de las posiciones estudiadas se alcanzan las temperaturas críticas para los materiales del dispositivo. Este estudio se repite para el caso de $r_g = 10 \mu\text{m}$, ya que es aquel que experimenta temperaturas con crecimientos mayores. Los resultados obtenidos en este último caso (Figura 8) muestran que para las posiciones 1 y 4 el metal alcanza temperaturas superiores a la de fusión, estando las otras capas a temperaturas muy por debajo de sus límites. Para las demás posiciones, ninguna de las capas alcanza sus valores admisibles, motivo por el que no se muestran en este trabajo. Como consecuencia, debe considerarse al metal como la capa crítica para el caso de fuente de 10W.

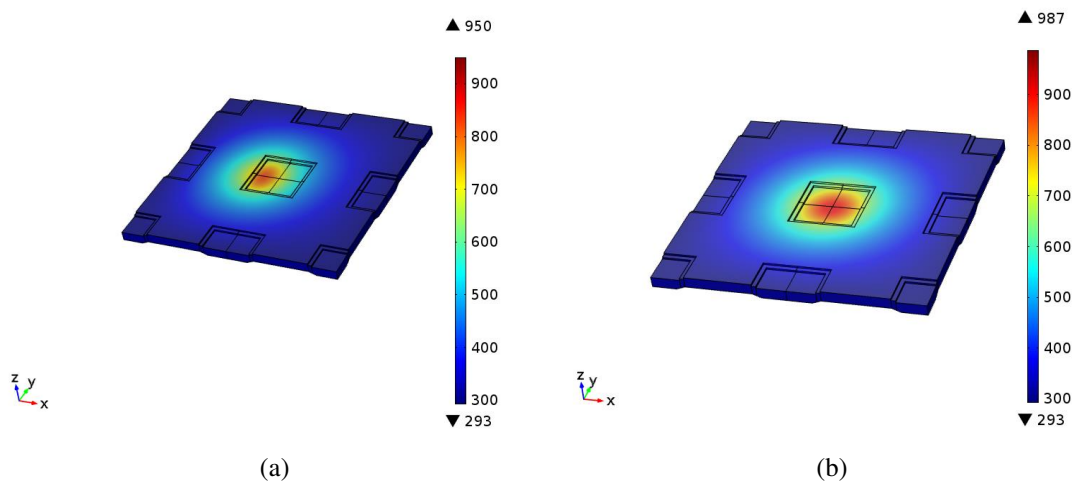


Figura 8: Distribución de temperaturas en estado estacionario en el metal, $r_g = 10 \mu\text{m}$. a) Posición 1, b) Posición 4

4.2 Fuente de calor de 50W

Para el caso de $r_g = 10 \mu\text{m}$, las curvas presentan un comportamiento cualitativamente similar al caso anterior. No obstante, el aumento del valor de potencia de la fuente impacta considerablemente en la evolución de la temperatura de las diferentes capas, alcanzándose valores mayores. Para todos los casos, se observa que la capa crítica es el silicio, que alcanza su fusión antes que los demás materiales estudiados. Por idénticos motivos a los casos anteriores se reportan solamente aquellos en los cuales la fuente ha sido ubicada en las posiciones 1 y 4 (Figuras 9 a y b respectivamente).

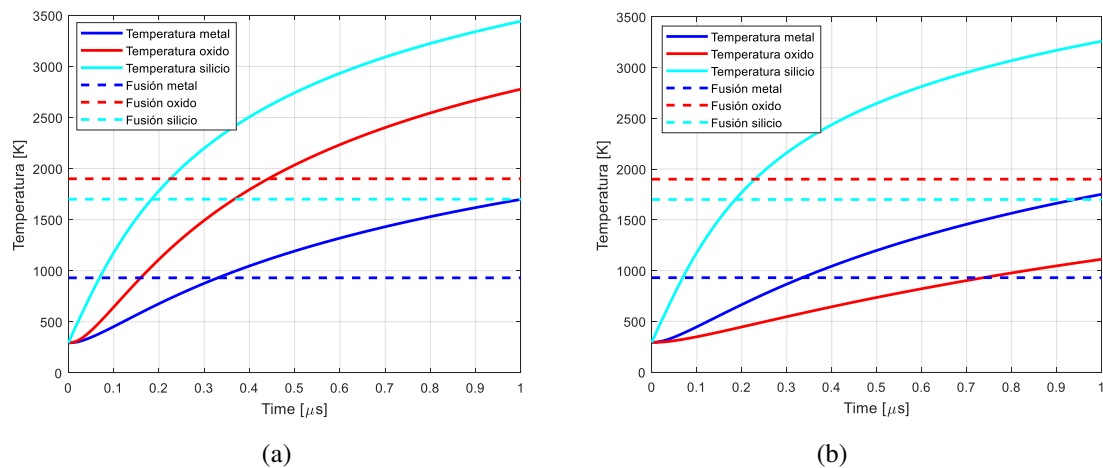


Figura 9: Evolución de la temperatura para distintas posiciones de la fuente de generación, $r_g = 10 \mu\text{m}$. a) Posición 1, b) Posición 4

Para el caso de $r_g = 15 \mu\text{m}$, se observa que la temperatura del metal en la posición 4 alcanza el punto de fusión antes que el silicio. Este resultado pone en evidencia la necesidad de modelar el dispositivo en 3D con una variedad de fuentes posibles. Se adopta el mismo criterio del caso anterior y se muestran en la Figura 10 solo los resultados para las posiciones 1 y 4.

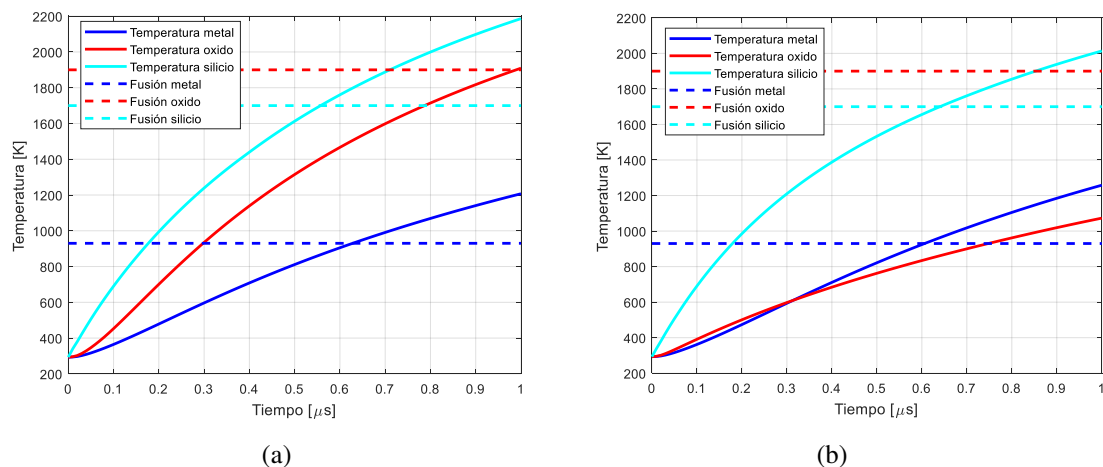


Figura 10: Evolución de la temperatura para distintas posiciones de la fuente de generación, $r_g = 15 \mu\text{m}$. a) Posición 1, b) Posición 4

5 CONCLUSIONES

Este trabajo aborda el modelado de los efectos térmicos provocados por un SEB en un transistor MOS de geometría cuadrada. Los resultados obtenidos a partir de una disposición completamente diferente de las previamente estudiadas, que incluye no solo a la celda en donde se produce el SEB sino en sus vecinas, constituye uno de los aportes de este trabajo.

Las simulaciones realizadas para diversas posiciones y diferentes densidades de potencia de la fuente de calor (que representa el efecto SEB) muestran que la capa crítica que alcanza el punto de fusión depende de la densidad de potencia. Se encuentra que en algunos casos es el metal mientras que para otros es el silicio. Estos resultados difieren de los presentados previamente por los autores del trabajo y confirman la influencia de la geometría del dispositivo en el análisis de los efectos provocados por el SEB.

REFERENCIAS

- Baliga, B.J., 2010. *Advanced Power MOSFET Concepts*, Boston, MA: Springer US.
- 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.
- 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.
- Hands, A. et al., 2011. Single event effects in power MOSFETs due to atmospheric and thermal neutrons. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 58(6 PART 1), pp.2687–2694.
- 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.
- 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., Peretti, G. & Romero, E.A., 2017. Impacto de la consideración de la compuerta en los efectos termoelásticos observados en transistores de potencia durante un proceso de quemado por evento único. , XXXV, pp.7–10.
- Tais, C.E., Romero, E.A. & Demarco, G.L., 2009. Thermomechanical stresses analysis of a single event burnout process. *IEEE Transactions on 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., 1986. Current induced avalanche in epitaxial structures. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 32(6), pp.3991–3995. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4334056>.