Estudio del efecto de altas dosis de radiación en detectores de silicio fabricados sobre substratos FZ, DOFZ y MCZ

C. Fleta, G. Pellegrini, M. Lozano, F. Campabadal, J.M. Rafí y M. Ullán

IMB-CNM (CSIC), Campus UAB, 08193-Bellaterra, Barcelona; e-mail: Celeste.Fleta@cnm.es.

I. INTRODUCCIÓN

Los detectores radiación de silicio se usan como trazadores en experimentos de física de altas energías gracias a su excelente resolución espacial y a su rapidez de respuesta. Estos dispositivos han de trabajar en un entorno de alta radiación, que puede afectar negativamente a su funcionamiento al cabo de un tiempo. Por ejemplo, los detectores del trazador interno del experimento ATLAS en el CERN habrán de soportar una fluencia total de hadrones cargados de 10¹⁵ cm⁻² ^[1], y el aumento de la luminosidad en un orden de magnitud previsto para el LHC aumentaría esta fluencia hasta 10¹⁶ cm⁻² ^[2].

El daño por radiación que más afecta a los detectores de silicio es el llamado daño por desplazamiento: la radiación incidente desplaza a los átomos de sus lugares en la red cristalina, creando niveles aceptores que hacen que cambie el dopaje efectivo del material y en consecuencia modifican el voltaje de depleción total del detector. Estudios recientes ^[3] han demostrado que una alta (> 10^{17} cm⁻³) concentración de oxígeno intersticial en la red del silicio mejora de forma significativa su resistencia a este efecto.

El material que más se usa en la fabricación de detectores de radiación es el silicio Float Zone (FZ), ya que su elevada resistividad permite obtener la depleción total del dispositivo a voltajes razonablemente bajos. Por desgracia, su concentración de oxígeno es del orden de 10¹⁵ cm⁻³, demasiado baja. Esta concentración puede aumentarse hasta 10¹⁷ cm⁻³ por medio de un proceso de difusión de oxígeno a alta temperatura, y el material resultante se conoce como *Diffusion Oxygenated Float Zone silicon* (DOFZ). Por otro lado, el silicio crecido mediante la técnica Czochralski (CZ), que es el estándar de la industria para producir monocristales, es mucho más barato que el FZ pero tiene la desventaja de una baja resistividad. Solo recientemente la introducción en la industria del método CZ asistido

mediante campo magnético (MCZ) ha hecho posible obtener obleas de silicio Czochralski de alta resistividad aptas para la fabricación de detectores de radiación.

II. EXPERIMENTAL

Con el objetivo de comparar su respuesta a elevadas dosis de radiación, se fabricaron en las instalaciones del IMB-CNM detectores de radiación P-in-N de tipo pad en los tres materiales descritos: FZ, DOFZ y MCZ. El contenido en oxígeno de cada tipo de substrato se midió mediante la técnica SIMS (*Secondary Ion Mass Spectroscopy*), y los perfiles obtenidos se pueden ver en la Figura 1. El valor promedio para cada material se



Figura 1. Análisis SIMS de los tres substratos. Se puede ver el perfil de difusión del oxígeno en el silicio FZ oxígenado

encuentra en la Tabla 1. En esta misma tabla se muestra la resistividad media del material, medida con la técnica de cuatro puntas, así como el dopaje efectivo (N_{eff}) de las obleas, extraído de las curvas de Thurber a partir del valor de la resistividad. En todos los casos se trata de obleas de silicio de orientación <100> y 300 µm de espesor, dopadas tipo N con fósforo.

Tabla 1. Características de los substratos

Substrato	Concentración de oxígeno (cm ⁻³)	Resistividad (kΩ·cm)	Dopaje efectivo (cm ⁻³)	
FZ	8.6×10^{15}	4.5 ± 0.6	$(9 \pm 1) \times 10^{11}$	
DOFZ	1.7×10^{17}	2.5 ± 0.1	$(1.64 \pm 0.07) \times 10^{12}$	
MCZ	4.6×10^{17}	1.05 ± 0.09	$(3.9 \pm 0.4) \times 10^{12}$	

El voltaje de depleción total (V_{FD}) de los dispositivos se extrajo de sus características capacidad-tensión (C-V) por el método estándar de cruzar dos líneas rectas en la gráfica logC-logV. A partir de este parámetro es posible calcular el dopaje efectivo mediante la ecuación (1).

$$N_{eff} = V_{FD} \cdot \frac{2\varepsilon_{Si}}{ad^2} \tag{1}$$

Donde ϵ_{Si} es la permitividad del silicio, q la carga elemental y d el espesor de la oblea. Los valores de N_{eff} calculados con esta técnica coinciden con los que se obtuvieron a partir de las medidas de la resistividad de las obleas (Tabla 1), lo que demuestra que la fabricación de los detectores no afectó a la resistividad del substrato.

Parte de los detectores se irradió con diferentes fluencias de protones de 24 GeV hasta 10^{16} cm⁻². Las irradiaciones se llevaron a cabo en las instalaciones del CERN Proton Synchrotron, a temperatura ambiente y con los dispositivos sin polarizar. La Figura 2 muestra el cambio en V_{FD}, obtenido a partir

de las curvas C-V, en función de la fluencia. La inversión de los substratos FZ y DOFZ se produce a una fluencia aproximada de 3×10¹³ protones/cm⁻², aunque el comportamiento del material oxigenado es algo mejor ya que la variación de Neff se produce más lentamente que en el silicio FZ. Finalmente, los detectores fabricados en silicio MCZ no sufren inversión del substrato, aunque sí un incremento continuo de V_{FD}. Se trata, pues, de un material muy prometedor para la fabricación de detectores resistentes a dosis de radiación tan elevadas como las previstas en el futuro Super-LHC.



Figura 2. Dopaje efectivo y VFD de los detectores en función de la fluencia de protones de24 GeV.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado parcialmente por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología bajo el proyecto FPA2003-03878-C02-02.

Referencias

- ¹ Technical report CERN/LHCC/97-17, CERN, 1997.
- ² Technical report CERN/LHCC-RD-002, CERN, 2003.
- ³ G. Lindstrom et al, Nucl. Instr. and Meth. A, vol. 466, pp. 308-326 (2001).

Caracterización de detectores de micropistas de silicio N-sobre-N fabricados en el IMB-CNM

C. Fleta¹, G. Pellegrini¹, M. Lozano¹, F. Campabadal¹, J.M. Rafi¹, M. Ullán¹, G. Casse² y P.P. Allport²

¹ IMB-CNM (CSIC), Campus UAB, 08193-Bellaterra, Barcelona; e-mail: <u>Celeste.Fleta@cnm.es</u>.
² Oliver Lodge Laboratory, University of Liverpool, UK

I. INTRODUCCIÓN

La tecnología N-sobre-N para detectores de radiación de micropistas, consistente en la implantación de pistas N+ sobre un substrato N, es más compleja que la P-sobre-N o la N-sobre-P, ya que es necesario definir el implante P⁺ para el contacto del dorso. Sin embargo se espera que la respuesta a altas dosis de radiación de la estructura N-sobre-N sea la mejor de las tres ya que en un detector de este tipo, tras la inversión del substrato N debida a la irradiación, la zona de carga espacial crece desde el lado de las micropistas, lo que permite obtener una buena eficiencia de colección de las cargas incluso sin un vaciamiento total ^[1].

Un lote de detectores de micropistas de estructura N-sobre-N se ha fabricado en la sala blanca del IMB-CNM. Con el objetivo de comparar su funcionamiento y estudiar su resistencia a la radiación, se utilizaron tres substratos diferentes: silicio Float Zone estándar (FZ), oxigenado (DOFZ), y el crecido mediante el método Czochralski magnético (MCZ).

II. DISEÑO Y FABRICACIÓN

El número total de niveles de máscara utilizados en la fabricación de los dispositivos es de diez. El diseño fue realizado por la Universidad de Liverpool en colaboración con el IMB-CNM, y los detectores fueron fabricados en la sala blanca del IMB-CNM con tecnología propia. Cada oblea contiene nueve detectores de micropistas con áreas 3×2 y 3×1 cm², además de diferentes estructuras de test. Los detectores constan de 128 pistas, con un pitch de 120 µm en el caso de los detectores grandes y 60 µm para los pequeños. El aislamiento entre las pistas N^+ se consigue mediante una implantación P (*p-spray*) en la cara superior de la oblea. Las micropistas se polarizan a través de unas resistencias de polisilicio conectadas a un anillo de polarización que rodea al detector. En cada pista hay un condensador de metal integrado, formado por una capa delgada de SiO_2 y un electrodo de Al/Cu para el acoplo capacitivo de la señal. Las líneas de transmisión de la señal están fabricadas en un segundo nivel de metal que está aislado del resto del dispositivo mediante una capa de SiO₂, y que permite que la lectura de la señal sea independiente de la geometría de las micropistas. Todo el conjunto está rodeado por ocho anillos de guarda. La Figura 1 muestra una sección tranversal del dispositivo. En la Figura 2 se puede ver una fotografía de uno de los detectores fabricados, en la que se distingue claramente la estructura de doble





Figura 1. Corte transversal de un detector de micropistas N-sobre-N

Figura 2. Fotografia de uno de los detectores fabricados en el IMB-CNM

metal.

III. CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA

Se realizó una caracterización eléctrica de todos los dispositivos consistente en la obtención de las características capacidad-tensión (C-V) y corriente-tensión (I-V) en inversa, a una temperatura controlada de 20 °C y en la ausencia de luz. Los anillos de guarda de los detectores no se polarizaron durante las medidas.

El voltaje de vaciamiento total, obtenido a partir de la característica C-V en inversa, es $V_{FD} = (57 \pm 4)$ V para los detectores fabricados sobre las obleas FZ, $V_{FD} = (53 \pm 3)$ V para las DOFZ y $V_{FD} = (330 \pm 6)$ V para las MCZ. Estos valores corresponden a unas resistividades $\rho = 4.5\pm0.3$, 4.9 ± 0.3 , y 0.90 ± 0.01 k $\Omega \cdot cm$, respectivamente, que coinciden con las suministradas por los fabricantes de las obleas. Por tanto, se puede concluir que el proceso de fabricación de los detectores no indujo la creación de donadores térmicos, ni siquiera en las muestras con la mayor concentración de oxígeno.

Los detectores fabricados en silicio DOFZ presentan tensiones de ruptura bajas, muchos de ellos sin alcanzar los 10 V. La causa de este comportamiento puede estar en el proceso de oxigenación de las obleas, pero todavía está por determinar.

Las Figuras 3 y 4 muestran las características I-V en inversa de los detectores fabricados sobre substratos FZ y MCZ, donde se han incluido los límites fijados para los detectores de silicio de ATLAS a modo de referencia. Las tensiones de ruptura son en la mayoría de los casos superiores al voltaje de vaciamiento total. Las corrientes de fugas son bajas, y alrededor del 50 % de los detectores FZ y el 40% de los MCZ está por debajo de los límites ATLAS. Además, estas cifras habrían de mejorar con la polarización de los anillos de guarda.



Figura 3. Características I-V en inversa para los Figura 4. Características I-V en inversa para los detectores fabricados en silicio FZ detectores fabricados en silicio MCZ

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado parcialmente por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología bajo el proyecto FPA2003-03878-C02-02.

Referencias

¹ The LHCb Collaboration, LHCb-VELO technical design report. Technical report CERN/LHCC/01-11, CERN, 2001.