

Tecnología de detectores
de partículas de silicio
resistentes a la radiación

Memoria presentada por
María Celeste Fleta Corral
para optar al grado de
Doctora en Física.

Barcelona, julio de 2006

Capítulo 5

Alternativas tecnológicas para la fabricación de los detectores

En el capítulo anterior se ha estudiado el comportamiento eléctrico y la respuesta a la radiación de diferentes substratos de silicio procesados en la forma de detectores de estructura P-sobre-N, los más simples y más fáciles de fabricar. Sin embargo, existen otras alternativas tecnológicas para la fabricación de detectores de radiación: la estructura N-sobre-P y la N-sobre-N. Cada una de ellas tiene sus ventajas y sus inconvenientes.

Este capítulo está dedicado al estudio comparativo de la tecnologías P-sobre-N, N-sobre-P y N-sobre-N para la fabricación de detectores de radiación de silicio que hayan de trabajar como trazadores en entornos de muy alta radiación. El estudio se hizo sobre diodos *pad* sencillos fabricados en la sala blanca del IMB-CNM. Aunque existen varias referencias que discuten los méritos relativos de las tres tecnologías [97, 98, 99, 100], en este trabajo es la primera vez que se presenta una comparación directa de detectores con los tres tipos de estructuras que han sido fabricados con idénticos parámetros tecnológicos.

En la primera parte del capítulo se describen las características de los tres tipos de estructuras y se discuten las dificultades tecnológicas asociadas a la fabricación de cada una de ellas. En la segunda sección se introducen los dispositivos utilizados en el estudio y los parámetros de la irradiación. Seguidamente se analiza el comportamiento eléctrico antes de la irradiación de los dispositivos fabricados, y se estudia su degradación por la radiación de protones de alta energía. Finalmente se comparan todas las opciones tecnológicas que se han estudiado a lo largo del trabajo y se proponen las mejores opciones para los futuros detectores de trazas de sLHC.

Capítulo 5. Alternativas tecnológicas para la fabricación de los detectores

5.1. Tecnologías

En esta sección se describen las características principales de las tecnologías P-sobre-N, N-sobre-P y N-sobre-N de detectores de radiación, y sus relativas ventajas y desventajas.

5.1.1. P-sobre-N

Los detectores de micropistas de estructura P-sobre-N constan de pistas P^+ implantadas sobre un sustrato N, y el contacto óhmico del dorso se consigue mediante una implantación N^+ . La figura 5.1 muestra un esquema de uno de estos dispositivos. La tecnología P-sobre-N es la más sencilla y por tanto la más barata, ya que como máximo se necesitan seis niveles de máscara (tabla 5.1). CMS [101] y ATLAS [1, 2] han elegido esta opción tecnológica para los detectores de micropistas de silicio de su detector de trazas, fundamentalmente por razones económicas, ya que ambos experimentos requieren una gran superficie de detectores de micropistas.

Uno de los inconvenientes de los sensores P-sobre-N es que la señal está formada por huecos, por lo que la velocidad de lectura es baja. Además, son los detectores que presentan una menor resistencia al daño de radiación por desplazamiento: como se comprobó en la sección §4.5.1 del capítulo anterior, el sustrato N se invierte a una fluencia de neutrones de 1 MeV de aproximadamente $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, lo que produce la migración de la unión al dorso del dispositivo. Si el dopaje efectivo del sustrato llega a ser tan alto que se ha de operar el detector sin un vaciamiento completo, se degradan la eficiencia de colección de carga y la resolución espacial, ya que en la región no vaciada actúa como una capa aislante y la señal se induce en varias pistas a la vez. Este efecto se puede mitigar en parte con el uso de silicio con un alto contenido de oxígeno intersticial, pero aún así los detectores P-sobre-N son los menos adecuados para trabajar en experimentos donde se expongan a altas dosis de radiación de hadrones cargados.

5.1.2. N-sobre-P

En los detectores N-sobre-P las micropistas N^+ están implantadas sobre un sustrato de silicio tipo P, y el contacto del dorso es P^+ . Una sección de este tipo de estructuras se muestra en la figura 5.2.

La tecnología N-sobre-P está menos extendida que la P-sobre-N, en parte por su mayor complejidad tecnológica y en parte porque hasta hace poco las obleas P de alta resistividad eran menos comunes que las N, pero estudios recientes indican que este tipo de sustratos tiene unas características muy prometedoras para la fabricación de detectores de radiación. En primer lugar, en el amplificador se colectan electrones en lugar de huecos, lo que supone una ventaja ya que gracias a su mayor velocidad de difusión en saturación la

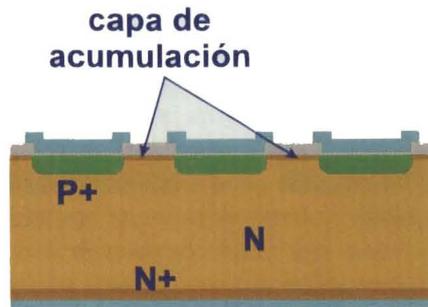


Figura 5.1: Esquema de un detector P-sobre-N

Nivel	Tecnología		
	P-sobre-N	N-sobre-P	N-sobre-N
Implantación uniones	Sí	Sí	Sí
Implantación <i>p-stops</i>	No	Opcional	Opcional
Polisilicio baja resistividad	Sí	Sí	Sí
Polisilicio alta resistividad	Sí	Sí	Sí
Contactos	Sí	Sí	Sí
Metal	Sí	Sí	Sí
Pasivación	Sí	Sí	Sí
Implantación dorso	Sin máscara	Sin máscara	Sí
Contactos dorso	Sin máscara	Sin máscara	Sí
Metal dorso	Sin máscara	Sin máscara	Sí
Via	Opcional	Opcional	Opcional
Metal 2	Opcional	Opcional	Opcional

Tabla 5.1: Niveles de máscara utilizados en cada tecnología para la fabricación de detectores de micropistas.

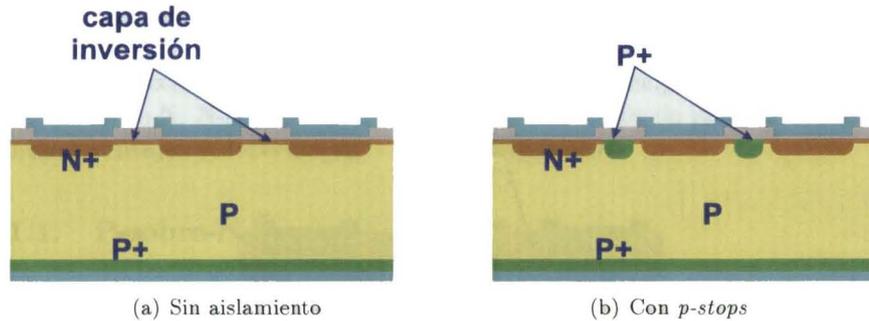


Figura 5.2: Esquema de un detector N-sobre-P: (a) sin aislamiento entre las micropistas; (b) con aislamiento mediante *p-stops*.

señal es más rápida y la probabilidad de atrapamiento menor. Por otro lado, el sustrato P no sufre inversión, lo que evita la migración de la unión al dorso y permite operar con eficiencia incluso en condiciones de vaciamiento incompleto. Estudios recientes han demostrado que la eficiencia de colección de carga en detectores N-sobre-P tras dosis de radiación muy elevadas es muy superior a la de detectores P-sobre-N de la misma geometría, incluso oxigenados [102, 103, 104] y no muestra efectos de *annealing* perjudicial [99].

Desde el punto de vista de la tecnología, los detectores N-sobre-P son más complejos que los P-sobre-N: estos dispositivos necesitan un aislamiento extra de la superficie del silicio debido a la carga fija positiva y a los estados de interfase presentes en el óxido de silicio, que inducen la creación de una capa de electrones en la interfaz Si/SiO₂. La densidad de carga positiva en el óxido aumenta con la irradiación pero está presente incluso en los óxidos no irradiados [50]. El efecto neto, en un detector P-sobre-N, es una capa de acumulación de electrones entre los electrodos P⁺ (figura 5.1) que no afecta a su funcionamiento. No obstante, en un detector N-sobre-P la capa de inversión de electrones disminuye el tamaño de la región aislante entre electrodos, aumentando la capacidad entre las pistas e incluso llegando a cortocircuitar electrodos contiguos, como se muestra en la figura 5.2(a). Los métodos de aislamiento se analizarán en detalle en el capítulo siguiente, pero en la figura 5.2(b) se muestra una de las soluciones más extendidas, los *p-stops*, que son áreas P⁺ implantadas entre las pistas y definidas mediante una etapa fotolitográfica. Para fabricar detectores N-sobre-P con aislamiento mediante *p-stops* se necesitan siete niveles de máscara (tabla 5.1)).

5.1.3. N-sobre-N

La figura 5.3 muestra el esquema de un detector de tipo N-sobre-N, que consta de micropistas N⁺ implantadas sobre un sustrato N y una difusión

P^+ para el contacto del dorso. Esta estructura supone una solución ingeniosa al problema de inversión del sustrato por efecto de la radiación: antes de la inversión la zona vaciada crece desde la unión P^+N del dorso, pero tras la inversión, con el sustrato dopado tipo P, el detector se vacía desde el lado de las micropistas, lo que permite una eficiente colección de carga incluso sin vaciamiento total. Además, como en el caso de los N-sobre-P, son los electrones los que forman la señal en los electrodos, por lo que la velocidad de la señal es alta y el atrapamiento menos probable, algo especialmente importante cuando la estructura cristalina del silicio está muy dañada por la radiación y la densidad de trampas es elevada. Detectores N-sobre-N irradiados a dosis altas han demostrado tener una mejor eficiencia de colección de carga que dispositivos iguales pero con estructura P-sobre-N [97, 105].

La tecnología N-sobre-N es la más compleja de las tres presentadas. Al igual que en los sensores N-sobre-P, es necesario aislar las micropistas N para evitar que se cortocircuiten por la capa de electrones inducida en la superficie. Además, hay que procesar las obleas por las dos caras para definir el implante del dorso, ya que la unión crece de este lado antes de la inversión. Ésto añade tres niveles de máscara al proceso, como se ve en la tabla 5.1, y aumenta el coste de la fabricación de los dispositivos con respecto a los procesados por una sola cara. Además, el hecho de que la unión P-N cambie de lado tras la irradiación hace que ambas caras del detector tengan que ser robustas frente a campos eléctricos elevados, lo que restringe el rendimiento del proceso de fabricación y aumenta todavía más el coste.

A pesar de las dificultades asociadas a esta tecnología, la estructura N-sobre-N es la elegida para los detectores de micropistas de LHCb-VELO dentro del experimento LHCb [98] y para los detectores de píxel del detector interno de ATLAS [14] y de CMS [106]. Todos estos experimentos tienen en común niveles de radiación muy elevados.

Un tipo especial de detectores N-sobre-N son los detectores de doble cara, usados por ejemplo en BaBar [107] y CDF II [108]. Estos dispositivos tienen micropistas en ambas caras que corren en direcciones diferentes para proporcionar dos coordenadas del paso de las partículas, por lo que se pueden ver como una combinación de un detector P-sobre-N y un N-sobre-N. El uso de detectores de doble cara reduce a la mitad la cantidad de silicio con respecto a utilizar dos detectores pegados en ángulo por el dorso, como en el SCT de ATLAS, lo que reduce la dispersión de las partículas. Otra ventaja de los detectores de doble cara es que el proceso de fotolitografía permite ajustar con mucha precisión el ángulo entre las pistas de los dos lados del sensor. Sin embargo, estos sensores sufren en las micropistas del lado P de los mismos efectos de disminución de la eficiencia de colección de carga y de la resolución espacial con la irradiación que los detectores P-sobre-N, además de problemas de indefinición en caso de alta ocupación.

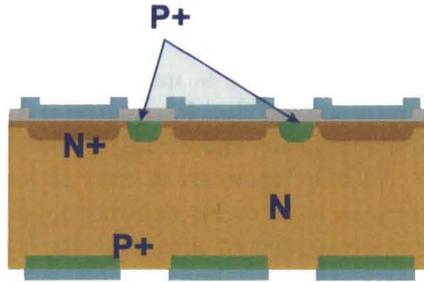


Figura 5.3: Esquema de un detector N-sobre-N con aislamiento de las micropistas mediante *p-stops*.

5.2. Estudio comparativo en detectores *pad*

Una vez vistas las dificultades tecnológicas asociadas a la fabricación de detectores de micropistas de estructura P-sobre-N, N-sobre-P y N-sobre-N, pasamos a analizar la degradación por la radiación de cada tecnología.

Al igual que en el capítulo anterior, los parámetros objeto de estudio son la variación del dopaje efectivo y de la tensión de vaciamiento completo, y el aumento de la corriente en inversa. Los dispositivos estudiados son detectores *pad* simples por ser los más fáciles de caracterizar y porque su estructura sencilla permite centrarse en el comportamiento del diodo y del material.

5.2.1. Dispositivos

Los diodos P-sobre-N, N-sobre-P y N-sobre-N se fabricaron en obleas de silicio *Float Zone* estándar y oxigenado suministradas por Topsil. La orientación de las obleas es $\langle 100 \rangle$, tienen un espesor de $280 \pm 15 \mu\text{m}$ y un diámetro de 10 cm, y su resistividad nominal se encuentra en el rango 1 – 5 $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$. Las obleas N son idénticas a las caracterizadas en la sección §4.2 del capítulo anterior, aunque las usadas en la fabricación de los detectores N-sobre-N se pulieron por las dos caras. En cuanto a las obleas P, están pulidas por una sola cara y el intervalo de valores de la resistividad nominal corresponde a un dopaje efectivo con boro $N_{eff} = (7.8 \pm 5.2) \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$. Todas las obleas fueron sometidas al mismo proceso de oxigenación en la sala blanca del IMB-CNM, por lo que es de esperar que el perfil de oxígeno de las obleas P oxigenadas coincida con el de las N, mostrado en la figura 4.3.

Los diodos son estructuras tipo *pad* de $5 \times 5 \text{ mm}^2$ tipo ROSE como las que se describen en la sección §4.3, aunque se fabricaron con un juego de máscaras diferente que incluye detectores de micropistas. Los detectores N-sobre-P y N-sobre-N tienen anillos de *p-stop* para aislar la superficie del silicio: el primero rodea al anillo de guarda y tiene una anchura de $160 \mu\text{m}$, el

5.2. Estudio comparativo en detectores *pad*

segundo está situado entre el anillo de guarda y el diodo central y su anchura es $80\ \mu\text{m}$. La separación entre las implantaciones N^+ y las P^+ es de $10\ \mu\text{m}$ en todos los casos. Los anillos de *p-stop*, al igual que el de guarda y el diodo central, tienen las esquinas redondeadas para evitar la presencia de campos eléctricos elevados que precipitarían la ruptura por avalancha del detector. Estos diodos incluyen nivel de pasivación, que está desplazado $10\ \mu\text{m}$ respecto al del metal. La figura 5.4 muestra un detalle de la superposición de los niveles de máscara en uno de los detectores.

El juego de máscaras fue diseñado de forma conjunta por la Universidad de Liverpool y el IMB-CNM y está optimizado para la fabricación de detectores N-sobre-P, aunque también sirve para procesar P-sobre-N si no se utiliza el nivel del *p-stop*. En este caso también se utilizó para fabricar los detectores N-sobre-N aunque los dispositivos resultantes tienen limitaciones, ya que el juego no incluye los niveles necesarios para el procesado del dorso. El diseño de la oblea incluye, además de los diodos *pad*, diversas estructuras de test y detectores de micropistas de diferentes geometrías y áreas, todos con aislamiento mediante *p-stops*. La figura 5.5 muestra el diseño completo de la oblea. El dispositivo central es un detector de micropistas de gran área. Los diodos *pad* utilizados en el presente trabajo, ocho por oblea, se encuentran cerca de los bordes. La tabla 5.2 resume las características principales de los niveles de máscara.

Se probaron varias dosis para la implantación de boro del *p-stop*, elegidas tras un proceso de simulación previo: 10^{12} , 3.2×10^{12} , 10^{13} y $10^{14}\ \text{cm}^{-2}$. La energía de los iones es $50\ \text{keV}$, y el espesor del óxido de implantación es $36.5\ \text{nm}$. En este trabajo solamente presentarán los resultados obtenidos con los dispositivos fabricados con las dos dosis más altas de *p-stop*, ya que los *p-stops* implantados con las otras dos no aíslan correctamente la superficie del silicio, como se comprobó en [5].

Aunque los dispositivos fabricados son diodos tipo *pad* de estructura sencilla, forman parte de obleas que se usaron para fabricar detectores de micropistas, y por tanto la carga térmica del proceso de fabricación es la equivalente al procesado completo de un detector de micropistas con acople capacitivo y polarización mediante resistencias de polisilicio, que se explicará con detalle en el capítulo siguiente (§6.2.3). No obstante, la simulación del proceso de fabricación con DIOS-ISE demuestra que los perfiles finales de dopantes dependen exclusivamente de las características de las implantaciones iónicas y de las etapas térmicas que definen los espesores de óxido, que son comunes al procesado de los detectores *pad* simples. Así, los perfiles de dopantes obtenidos por simulación para los detectores P-sobre-N fabricados con el proceso completo son iguales a los de los fabricados con el proceso simplificado para diodos *pad* y que se mostraron en el capítulo anterior (figuras 4.10 y 4.12). Por su parte, los perfiles correspondientes a los detectores N-sobre-P y N-sobre-N y obtenidos con DIOS-ISE se pueden ver en las figuras 5.6 y 5.7, respectivamente.

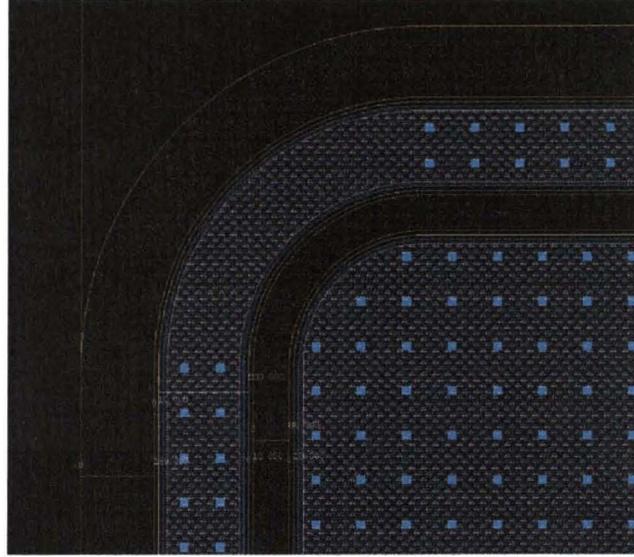


Figura 5.4: Detalle de la superposición de los niveles de máscara en un detector *pad* N-sobre-P.

Los detectores se irradiaron con protones de 24 GeV del acelerador PS del CERN, a temperatura ambiente y sin polarizar, hasta una fluencia máxima de 1.02×10^{15} p/cm², tal como se explica en §3.4. Tras la irradiación los dispositivos se almacenaron a -35° C para evitar el *annealing* incontrolado, e inmediatamente antes de de la caracterización se sometieron al recocido estándar de 4 minutos a 80° C.

Por completitud, en el análisis comparativo de la resistencia a la radiación de los detectores se han incluido los diodos *pad* P-sobre-N fabricados en silicio Czochralski magnético cuya caracterización se presentó en la sección §4.5 del capítulo anterior. La tabla 5.3 resume las características de todos los detectores y substratos utilizados.

5.2.2. Caracterización de los detectores sin irradiar

La tensión de vaciamiento completo antes de la irradiación de los diodos *pad* P-sobre-N fabricados de forma conjunta a los detectores de micropistas es 78 V para los diodos FZ y 63 V para los DOFZ. El valor de la corriente inversa en $V_{FD}+20$ V, corregida a 20° C, es 2 nA/cm² para el substrato FZ y 318 nA/cm² para el DOFZ. En todos los casos, la tensión de ruptura de los dispositivos caracterizados es del orden de los 600 V, muy por encima de la tensión de vaciamiento completo. Estos resultados son comparables a las que se obtuvieron para dispositivos semejantes fabricados con el juego de

5.2. Estudio comparativo en detectores *pad*

Máscara	Descripción	Campo
N-DIFF	Área activa y anillos de guarda	Oscuro
P-DIFF	<i>P-stop</i>	Oscuro
RES-CON	Polisilicio baja resistividad	Oscuro
POLY	Polisilicio alta resistividad	Claro
WINDOW	Contactos	Oscuro
METAL	Metal	Claro
PASSIV	Pasivación	Oscuro

Tabla 5.2: Juego de máscaras utilizado para fabricar los detectores P-sobre-N, N-sobre-P y N-sobre-N

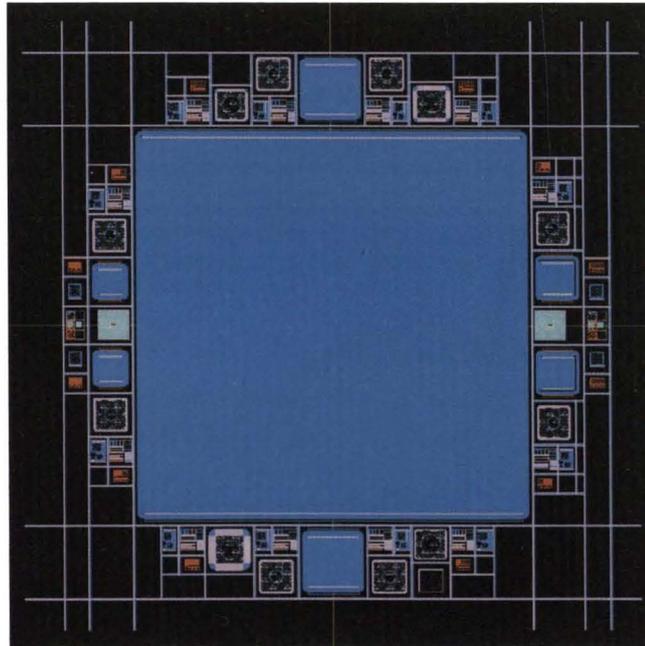


Figura 5.5: Diseño de la oblea completa.

Capítulo 5. Alternativas tecnológicas para la fabricación de los detectores

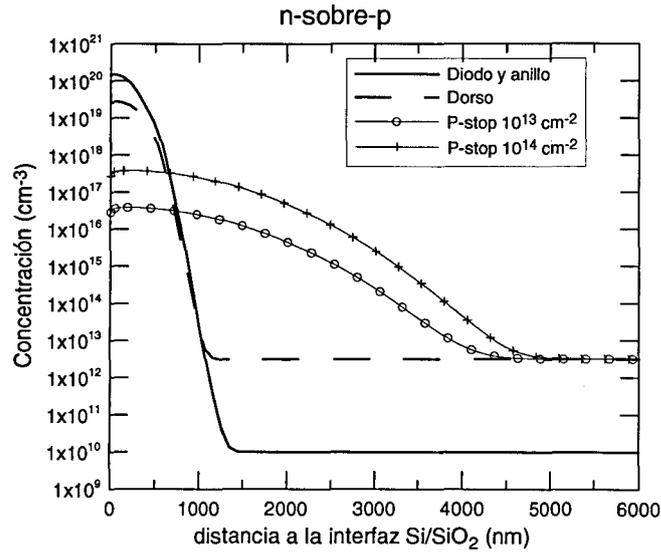


Figura 5.6: Perfiles de dopantes en los detectores *pad* N-sobre-P.

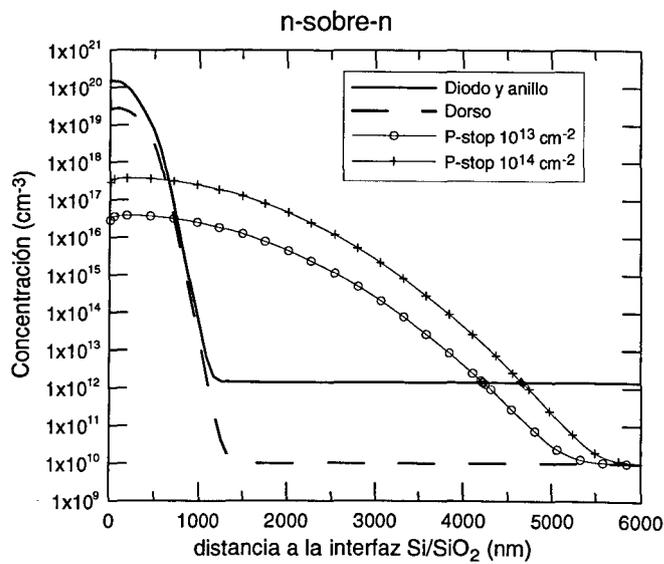


Figura 5.7: Perfiles de dopantes en los detectores *pad* N-sobre-N.

5.2. Estudio comparativo en detectores *pad*

Tecnología	<i>p-stop</i> (cm ⁻²)	Substrato
P-sobre-N	–	FZ, DOFZ, MCZ
N-sobre-P	10 ¹³	FZ, DOFZ
	10 ¹⁴	FZ, DOFZ
N-sobre-N	10 ¹³	FZ, DOFZ
	10 ¹⁴	FZ

Tabla 5.3: Diodos *pad* fabricados.

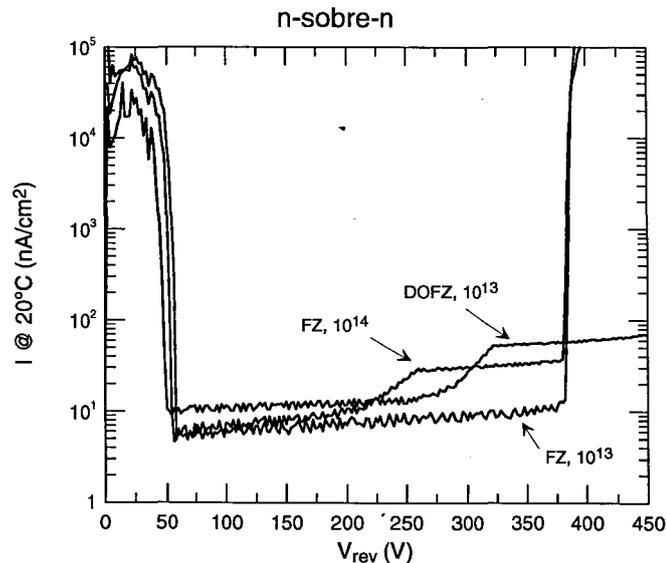


Figura 5.8: Características corriente-tensión de los detectores *pad* N-sobre-N sin irradiar. El tipo de substrato y la dosis de implantación del *p-stop*, en cm⁻², se indican al lado de cada curva.

máscaras ROSE (§4.4, tablas 4.4 y 4.5), a pesar de que han pasado por procesos de fabricación diferentes, lo que confirma que las etapas exclusivas a los detectores de micropistas (depósito, implantación y grabado del polisilicio, pasivación) apenas influyen en las características eléctricas de los detectores, que estarían determinadas por las etapas comunes a los detectores *pad*, esto es, por las implantaciones y etapas térmicas que definen las difusiones y los espesores de óxido.

Las curvas corriente-tensión de los detectores *pad* N-sobre-N no irradia-

Capítulo 5. Alternativas tecnológicas para la fabricación de los detectores

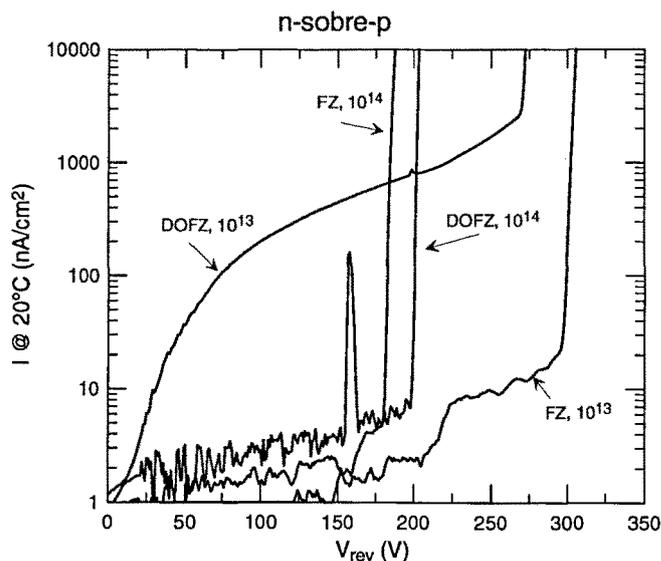


Figura 5.9: Características corriente-tensión de los detectores *pad* N-sobre-P sin irradiar. El tipo de sustrato y la dosis de implantación del *p-stop*, en cm^{-2} , se indican al lado de cada curva.

dos se muestran en la figura 5.8. Los dispositivos presentan una elevada corriente de fugas, del orden de los 0.1 mA/cm^2 , a tensiones bajas, pero alrededor de los 50 V la corriente decrece a valores menores de 10 nA/cm^2 . Este comportamiento extraño se debe a que en los dispositivos N-sobre-N la unión está en el dorso, y en los detectores fabricados las implantaciones del diodo central y el anillo de guarda en el dorso no están delimitadas, por lo que cuando comienza el vaciamiento hay un camino conductivo directo entre los contactos de las implantaciones N^+ y el del dorso por los bordes del chip. Cuando el anillo de guarda alcanza el vaciamiento completo, a unos 50 V , aísla completamente el volumen activo del detector de los lados del chip y la corriente decrece a valores que son similares a los de detectores P-sobre-N. La tensión de ruptura es en todos los casos superior a 300 V , lo que da un amplio margen de seguridad para el funcionamiento de los diodos como detectores. Es de esperar que este efecto desaparezca tras la inversión del silicio con la irradiación.

Los detectores N-sobre-P antes de la irradiación presentan problemas asociados a los *p-stops*. En la figura 5.9 se puede ver una muestra de las características corriente-tensión en inversa de estos dispositivos. Su tensión de ruptura se encuentra en el intervalo $150\text{--}300 \text{ V}$, siendo los detectores fabri-

5.2. Estudio comparativo en detectores *pad*

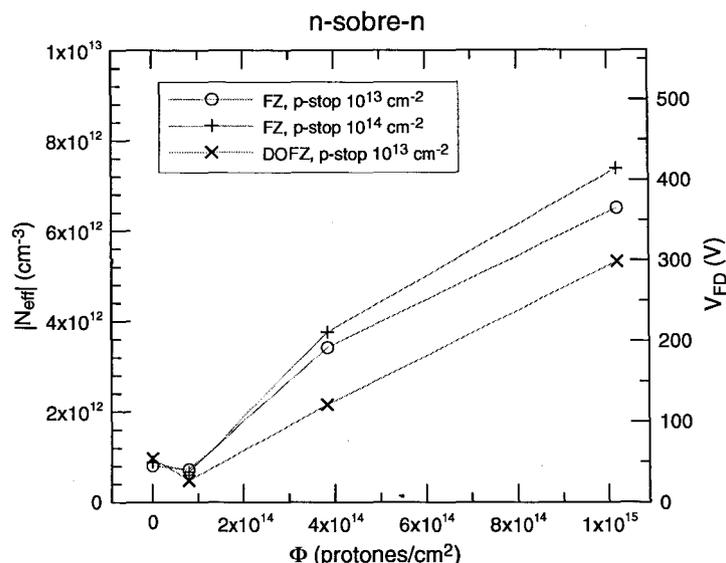


Figura 5.10: Tensión de vaciamiento completo y densidad de carga espacial efectiva en función de la fluencia de irradiación para los detectores *pad* N-sobre-N. V_{FD} calculado para detectores de 280 μm de espesor.

cados con la mayor dosis de *p-stop*, 10^{14} cm^{-2} , los que rompen a tensiones más bajas. La ruptura se produce sin que se haya estabilizado la corriente, lo que indica que no se ha llegado al vaciamiento completo, algo que también se pone de manifiesto en las curvas de capacidad. Este comportamiento se debe a que la caída de potencial entre la implantación del *p-stop* y el dorso es muy baja porque la corriente que circula por el diodo también es baja, de modo que el *p-stop* se comporta como una tierra virtual que impide la expansión del campo eléctrico de la unión y causa la ruptura temprana del diodo. Este efecto desaparece tras la irradiación al aumentar los niveles de corriente, y los diodos ya pueden desertizarse por completo. El valor teórico de la tensión de vaciamiento completo antes de irradiar, calculado a partir del dopaje efectivo del sustrato, es de unos 200 V.

5.2.3. Caracterización de los detectores irradiados

Los diodos *pad* P-sobre-N irradiados que se fabricaron con el proceso completo de los detectores de micropistas muestran el mismo comportamiento que los que se fabricaron con el juego de máscaras ROSE y cuyas características se analizaron en la sección §4.5 del capítulo anterior. De hecho, las medidas de V_{FD} e I_{rev} correspondientes a estos dispositivos ya están incluí-

Capítulo 5. Alternativas tecnológicas para la fabricación de los detectores

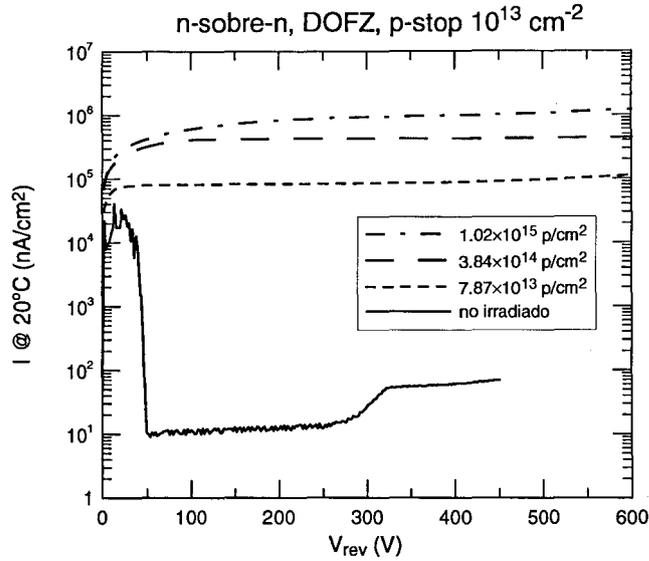


Figura 5.11: Características corriente-tensión de los detectores *pad* N-sobre-N fabricados sobre sustrato DOFZ con implantación *p-stop* de 10^{13} cm^{-2} irradiados a diferentes fluencias.

Tecnología	N-sobre-P		N-sobre-N		
<i>p-stop</i> (cm^{-2})	10^{13}		10^{13}		10^{14}
Substrato	FZ	DOFZ	FZ	DOFZ	FZ
α_{eq} (10^{-17} A/cm)	6.5 ± 0.1	6.2 ± 0.0	5.7 ± 0.1	4.0 ± 0.2	6.1 ± 0.1
β_{eq} (10^{-3} cm^{-1})	4.0 ± 0.4	3.2 ± 0.4	9.6 ± 1.5	8.3 ± 0.2	11.1 ± 1.7

Tecnología	P-sobre-N		
<i>p-stop</i> (cm^{-2})	–	–	–
Substrato	FZ	DOFZ	MCZ
α_{eq} (10^{-17} A/cm)	4.29 ± 0.03	4.32 ± 0.03	4.2 ± 0.2
β_{eq} (10^{-3} cm^{-1})	13.2 ± 0.3	11.9 ± 0.4	10.5 ± 0.4

Tabla 5.4: Parámetros α_{eq} y β_{eq} para todos los detectores *pad* caracterizados.

5.2. Estudio comparativo en detectores *pad*

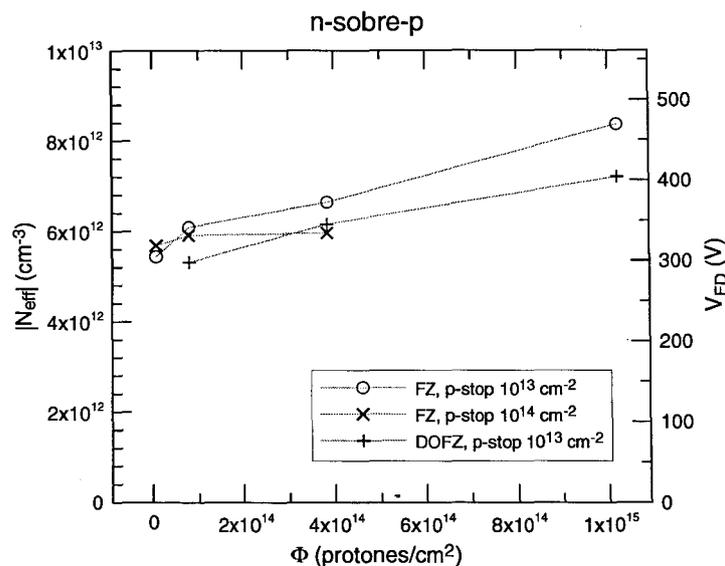


Figura 5.12: Tensión de vaciamiento completo y densidad de carga espacial efectiva en función de la fluencia de irradiación para los detectores *pad* N-sobre-P. V_{FD} calculado para detectores de 280 μm de espesor.

das en las gráficas 4.21 y 4.23, sin que se aprecien diferencias significativas entre los diodos fabricados con uno u otro proceso. Esto demuestra que la respuesta a la radiación de los detectores, al igual que su comportamiento sin irradiar, depende en exclusiva de las etapas que definen las difusiones y, los espesores de óxido, que fueron iguales en todos los dispositivos, y no de las etapas exclusivas de los detectores de micropistas.

Los valores de los parámetros del daño por radiación, β_{eq} y α_{eq} , correspondientes a una irradiación con neutrones de 1 MeV, se encuentran en la tabla 5.4. En ella se han incluido los correspondientes a los diodos *pad* P-sobre-N fabricados en silicio MCZ cuya caracterización se mostró también en el capítulo anterior.

La evolución de la tensión de vaciamiento completo y del dopaje efectivo con la fluencia de irradiación de los detectores N-sobre-N se puede ver en la figura 5.10, donde los valores de V_{FD} han sido calculados a partir de medidas C-V y corregidos a 20° C según la ecuación 3.12. Los valores iniciales de N_{eff} están de acuerdo con las especificaciones del fabricante de las obleas, aunque como se ya observó en los diodos P-sobre-N, el sustrato oxigenado parte con un dopaje inicial ligeramente superior al del estándar, lo que puede deberse a una introducción de impurezas durante el proceso de oxigenación. La irra-

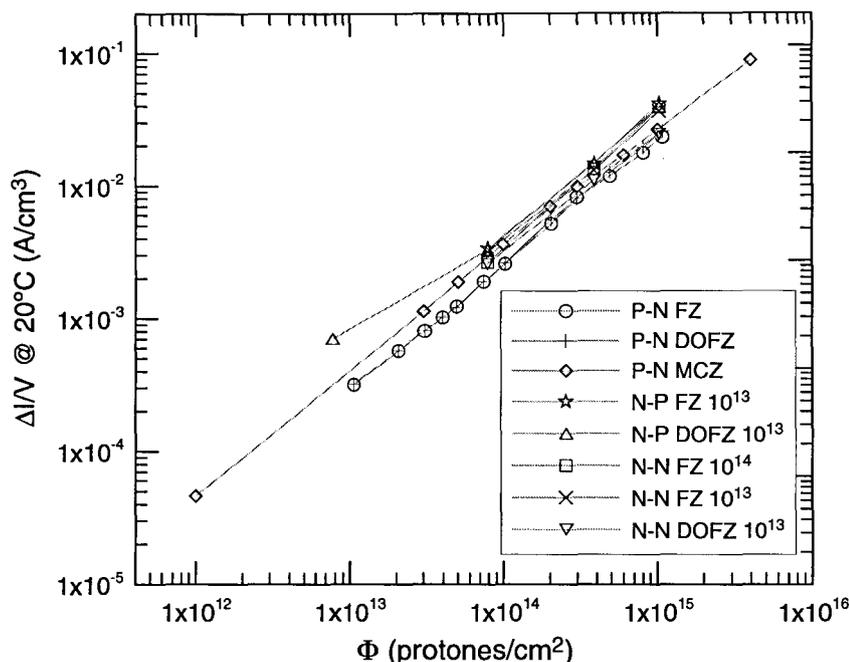


Figura 5.13: Incremento de la corriente de fugas inversa con la fluencia para los diodos *pad* fabricados en todas las tecnologías y substratos e irradiados con protones de 24 GeV.

diación con protones de alta energía produce la eliminación de los donadores originales del silicio N a fluencias bajas hasta llegar a la inversión. Ésta se da a una fluencia de protones de 24 GeV de $3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, según se comprueba en las características de los detectores P-sobre-N de la sección §4.5.1. Tras la inversión predomina la generación de aceptores que hace aumentar el dopaje del substrato, que es ahora tipo P.

El parámetro β que caracteriza el ritmo de introducción de la carga espacial negativa tras la inversión se ha calculado para los detectores N-sobre-N a partir de un ajuste lineal de tres últimos puntos de cada curva de la figura 5.10, ya que incluso con la fluencia de irradiación más baja, $7.87 \times 10^{13} \text{ p/cm}^2$, el silicio está invertido y los diodos tienen estructura N-sobre-P, con la unión en la cara superior en lugar de en el dorso. Tras la inversión la componente superficial de la corriente de fugas que se observaba en los detectores sin irradiar desaparece, como muestra la figura 5.11 para los diodos N-sobre-N fabricados en silicio oxigenado. Los valores de β_{eq} , el equivalente de β para una irradiación con neutrones de 1 MeV, se encuentran en la tabla 5.4.

5.2. Estudio comparativo en detectores *pad*

En cuanto a los detectores N-sobre-P irradiados, todos los fabricados en silicio oxigenado con una dosis de *p-stop* de 10^{14} cm^{-2} , y parte de los fabricados en silicio estándar con la misma dosis, rompen a una tensión inferior o cercana a la de desertización, por lo que no ha sido posible extraer su tensión de vaciamiento completo. La figura 5.12 muestra los valores de V_{FD} a 20° C y de N_{eff} del resto de dispositivos. El efecto de la irradiación en el silicio tipo P es igual al del silicio N tras la inversión, esto es, un aumento continuo de la magnitud del dopaje efectivo debido a la introducción de estados aceptores. Los valores del parámetro β_{eq} para los detectores fabricados con dosis de *p-stop* 10^{13} cm^{-2} se muestran en la tabla 5.4. Ha sido imposible calcular β_{eq} para los dispositivos con la dosis mayor de *p-stop* porque no disponemos de suficientes puntos. Al igual que en el caso de los substratos N, el substrato tipo P oxigenado tiene un β_{eq} menor que el del estándar, es decir que la oxigenación del silicio P también disminuye la tasa de la variación del dopaje efectivo con la fluencia de protones.

Comparación de todas las tecnologías y substratos.

El comportamiento de la corriente de fugas con la irradiación es muy similar para todos los dispositivos estudiados. En la figura 5.13 se puede ver que el valor de la densidad volumétrica de corriente para cada dosis de irradiación es prácticamente independiente del tipo de estructura y substrato. La pendiente de las curvas, es decir, la constante α , que caracteriza el daño inducido por la irradiación, es independiente de si el silicio se encuentra o no invertido y también es muy similar para todos los dispositivos estudiados. Los valores del parámetro α_{eq} para todos los tipos de dispositivo se muestran en la tabla 5.4. Todos ellos son consistentes con el rango comúnmente aceptado para α_{eq} , $(4-9) \times 10^{-17}$ A/cm [52], lo que confirma que α_{eq} , además de ser independiente de las propiedades del silicio con el que están fabricados los detectores (resistividad, concentración de impurezas, tipo de conducción), también es independiente de la tecnología.

El único parámetro del daño por radiación sobre el que se puede ejercer algún tipo de control es β , que caracteriza la variación del dopaje efectivo del silicio con la fluencia. En la figura 5.14 se pueden comparar todos los β_{eq} obtenidos.

Los detectores P-sobre-N y N-sobre-N fabricados en silicio FZ tienen unos valores de β_{eq} comparables dentro de los errores, y lo mismo sucede con los fabricados en silicio DOFZ, siendo estos valores algo más bajos. Se trata de un resultado lógico si se tiene en cuenta que este parámetro caracteriza el ritmo de introducción de aceptores en el substrato con la irradiación, que debería ser independiente de la estructura del detector. La ventaja de los detectores N-sobre-N sobre los P-sobre-N reside principalmente en su mejor eficiencia de colección de carga tras la irradiación [97], pero por desgracia en el momento de realizar este estudio todavía no disponíamos del equipo

Capítulo 5. Alternativas tecnológicas para la fabricación de los detectores

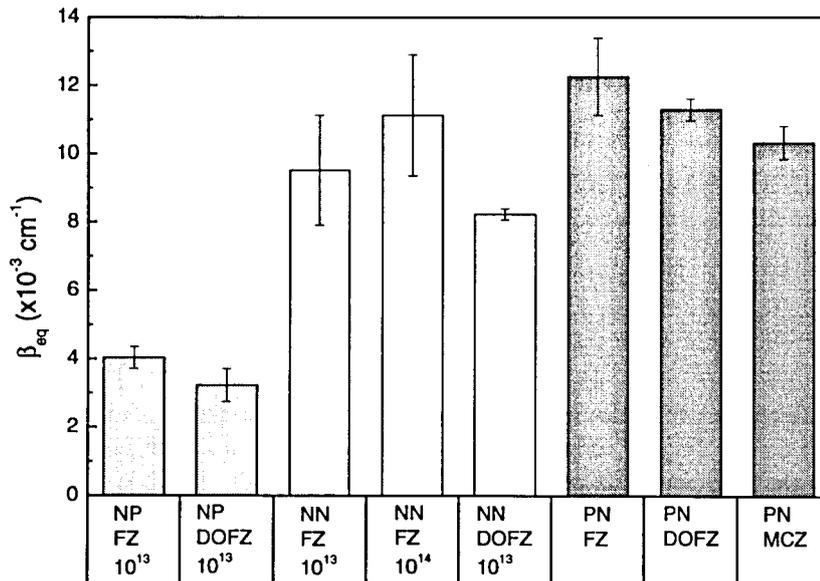


Figura 5.14: Valores de β_{eq} obtenidos para todas las tecnologías y tipos de sustrato estudiados.

necesario para esta caracterización.

El comportamiento en cuanto a β de los detectores fabricados sobre sustrato P es claramente superior al del resto: el ritmo de la variación del dopaje efectivo con la fluencia del silicio FZ P es aproximadamente un tercio del que tiene el silicio FZ N, y menos de la mitad que para el silicio MCZ N. La reducción de β_{eq} es aún mayor en el caso del sustrato P oxigenado.

No obstante, a pesar de la ventaja que supone un β_{eq} bajo para dosis de radiación elevadas, el silicio tipo P es el que tiene mayores tensiones de vaciamiento completo en las etapas intermedias de la irradiación ya que su dopaje efectivo no hace sino aumentar, a diferencia de los sustratos N que tienen una primera etapa en la que el valor absoluto del dopaje decrece. En consecuencia, para asegurar tensiones de trabajo razonables durante toda la vida de los detectores de estructura N-sobre-P es imprescindible que la resistividad inicial del silicio sea lo más alta posible. Para dosis de radiación elevadas, del orden de los 10^{15} p/cm^2 (o, en neutrones de 1 MeV, $6 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$), la superioridad del silicio P es indudable.

Valor óptimo del *p-stop*.

Del análisis de las características de los detectores N-sobre-P sin irradiar e irradiados se deduce que una dosis del *p-stop* de 10^{14} cm^{-2} es demasia-

5.2. Estudio comparativo en detectores *pad*

do alta y crea una distribución de campo eléctrico que provoca la ruptura temprana de los dispositivos. Por otro lado, como se demostró experimentalmente en [5], la dosis $3.2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ no es suficiente para garantizar un buen aislamiento de las pistas en detectores de micropistas sin irradiar. El valor óptimo para la dosis de implantación del *p-stop*, para la tecnología N-sobre-P desarrollada en el IMB-CNM, es por tanto 10^{13} cm^{-2} . Con este *p-stop* se consigue un buen aislamiento de la superficie del silicio incluso en los detectores irradiados y el mejor comportamiento eléctrico posible —aunque insatisfactorio— de los no irradiados.

En el caso de los detectores N-sobre-N, esta diferencia de comportamiento entre los que tienen una dosis de *p-stop* de 10^{13} y una de 10^{14} cm^{-2} no está tan clara aunque de los niveles de corriente de los dispositivos irradiados se desprende que ambas son suficientes para evitar el cortocircuito entre las implantaciones N^+ del diodo. No obstante, desde el punto de vista del comportamiento eléctrico es preferible elegir la dosis más baja posible para reducir el valor del campo eléctrico en los límites del *p-stop*. Por tanto, al igual que para las tecnología N-sobre-P, el valor óptimo para la dosis de implantación del *p-stop* en detectores N-sobre-N es 10^{13} cm^{-2} .

5.2.4. *Annealing* del silicio P.

Como complemento del estudio de *annealing* a $80 \text{ }^\circ\text{C}$ del silicio tipo N que se detalla en §4.5.3, se llevó a cabo el mismo análisis para los detectores N-sobre-P, aunque sólo para los fabricados en silicio FZ estándar e irradiados a la fluencia $3 \times 10^{14} \text{ p/cm}^2$.

Las curvas de *annealing* del silicio P, junto con las correspondientes a los detectores P-sobre-N fabricados en substratos FZ estándar y oxigenado y Czochralski e irradiados a la misma fluencia, se muestran en las figuras 5.15 a 5.17. Los valores de V_{FD} se han normalizado para muestras de $280 \text{ } \mu\text{m}$ de espesor.

Como se puede comprobar en la figura 5.15, el silicio FZ tipo P no cambia de tipo con el tiempo a $80 \text{ }^\circ\text{C}$. Tampoco parece tener el periodo inicial de *annealing* beneficioso, en el que V_{FD} disminuye, que sí tienen los substratos N FZ invertidos. Globalmente, el comportamiento del substrato P durante todo el tiempo de recocido parece obedecer a los mismos mecanismos físicos que el del silicio N en su etapa de recocido inverso, con una continua introducción de aceptores que satura a tiempos largos, como se ve en la fig. 5.16.

El aumento continuo de la tensión de vaciamiento completo del silicio P con el recocido, unido al mayor dopaje efectivo inicial, hacen que este material alcance valores de V_{FD} muy elevados a tiempos largos, algo que hay que tener en cuenta si se quiere utilizar en experimentos que requieran periodos muy prolongados a alta temperatura¹. El silicio Czochralski magné-

¹Conviene recordar que los periodos de mantenimiento previstos en ATLAS son de 2 semanas a $20 \text{ }^\circ\text{C}$, que equivalen a un tiempo de recocido a $80 \text{ }^\circ\text{C}$ de sólo 4 minutos. Los

Capítulo 5. Alternativas tecnológicas para la fabricación de los detectores

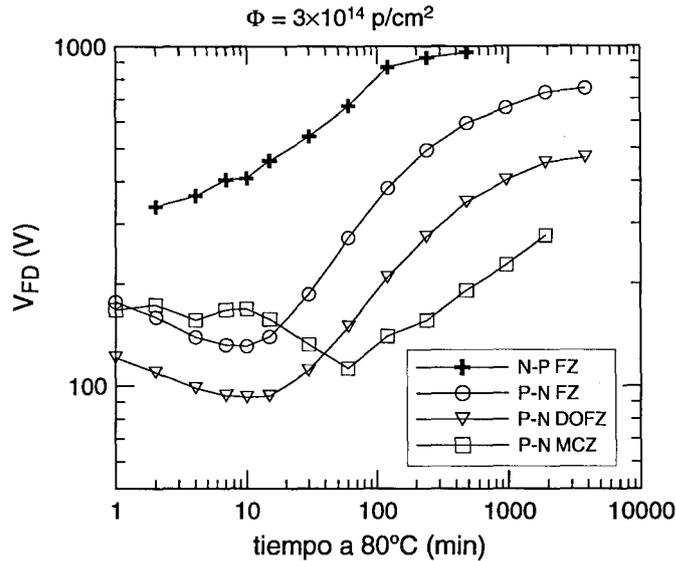


Figura 5.15: Tensión de de vaciamiento completo en función del tiempo de *annealing* a 80° C de detectores irradiados a una fluencia de $3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$. V_{FD} normalizado para detectores de 280 μm de espesor.

tico es superior para aplicaciones de estas características gracias a su mayor estabilidad.

5.3. Conclusiones

En este capítulo se han estudiado las características y la respuesta a la radiación de detectores fabricados en tecnologías P-sobre-N, N-sobre-P y N-sobre-N, siendo la primera vez que se hace una comparación directa de las tres estructuras en dispositivos fabricados en la mismas instalaciones con los mismos parámetros tecnológicos.

Los dispositivos fabricados y caracterizados son diodos tipo *pad* pero tienen una carga térmica equivalente al proceso de fabricación completo de un detector de micropistas. Como substratos se utilizaron obleas tipo P y N de silicio *Float Zone* estándar y oxigenado, y también obleas N de silicio Czochralski magnético.

El aislamiento de la superficie en los detectores N-sobre-P y N-sobre-N se hizo mediante la implantación de un anillo de *p-stop* entre las difusiones N^+ del diodo central y el anillo de guarda. Se ha encontrado que la dosis

estudios de *annealing* se han hecho para intervalos de tiempo extremadamente largos.

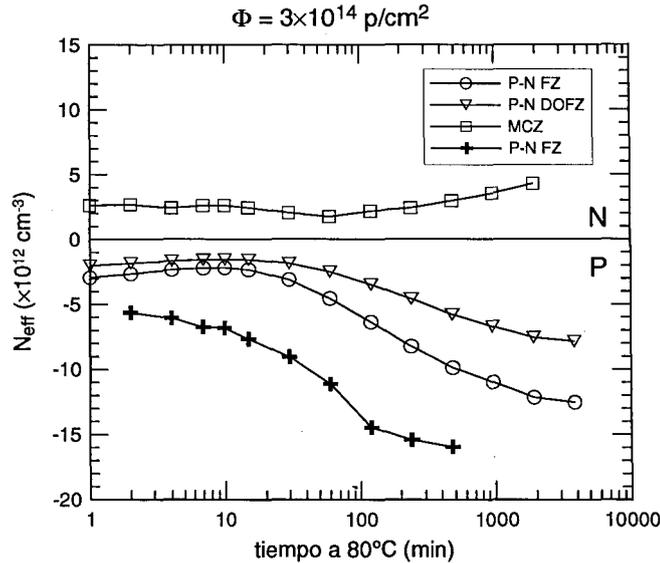


Figura 5.16: Dopaje efectivo en función del tiempo de *annealing* a 80° C de detectores irradiados a una fluencia de $3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$. V_{FD} normalizado para detectores de 280 μm de espesor.

de la implantación de boro que da los mejores resultados en ambas tecnologías es 10^{13} cm^{-2} , que presenta una concentración de boro en superficie de $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$: en un trabajo anterior ([5]) se vio que dosis tan bajas como $3.2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ no garantizan un aislamiento correcto, mientras que en este estudio se ha comprobado que la dosis de 10^{14} cm^{-2} causa la ruptura por avalancha temprana, al menos en los dispositivos N-sobre-P. En el capítulo siguiente se presentará un análisis más pormenorizado de las diversas opciones de aislamiento y un estudio de optimización de la tecnología para detectores N-sobre-P.

Las irradiaciones se hicieron con protones de 24 GeV del CERN-PS hasta la fluencia de 10^{15} p/cm^2 . Los detectores irradiados hasta esta fluencia máxima continúan funcionando adecuadamente.

El comportamiento de los detectores P-sobre-N antes y después de la irradiación es correcto y tanto los niveles de corriente como la tensión de vaciamiento completo son semejantes a los que tienen detectores obtenidos con un proceso de fabricación simple de diodos *pad*. Por tanto, las etapas exclusivas a los detectores de micropistas apenas influyen en el comportamiento eléctrico y en la resistencia a la radiación de los dispositivos, que estarían determinados únicamente por las características del sustrato y por las etapas térmicas que definen los perfiles de dopantes y los espesores de

Capítulo 5. Alternativas tecnológicas para la fabricación de los detectores

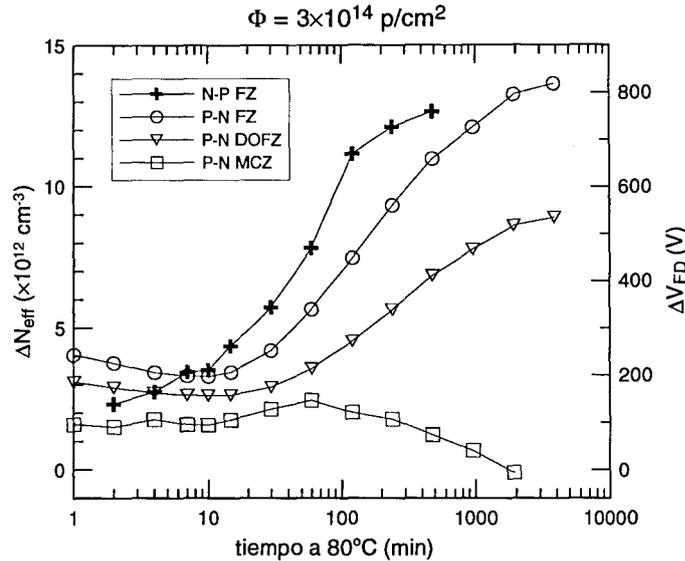


Figura 5.17: Diferencia del dopaje efectivo y de la tensión de vaciamiento completo respecto a los valores antes de la irradiación en función del tiempo de *annealing* a 80° C de detectores irradiados a una fluencia de $3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$. V_{FD} normalizado para detectores de 280 μm de espesor.

óxido.

Antes de la irradiación, los detectores N-sobre-P presentan problemas asociados a los *p-stops*: no alcanzan el vaciamiento completo porque el *p-stop* impide la expansión de la zona vaciada al actuar como una tierra virtual. Este efecto desaparece con los niveles de corriente más altos tras la irradiación, pero un inconveniente grave para la utilización de este tipo de dispositivos.

Los detectores N-sobre-N no se procesaron por el dorso por lo que no funcionan adecuadamente antes de la inversión del sustrato. Presentan corrientes de fugas extremadamente altas debido a la conducción por los bordes hasta que alcanzan el vaciamiento completo, momento en que el anillo de guarda aísla el volumen activo del detector y la corriente decrece a valores normales. En todo caso, este comportamiento es debido a un proceso de fabricación incompleto y no al tipo de estructura.

El valor del parámetro α , que caracteriza el incremento de la corriente inversa con la dosis de irradiación, es constante sobre varios órdenes de magnitud de la fluencia y es similar para todas las tecnologías y tipos de sustrato estudiados, incluido el silicio P, y está de acuerdo con los resultados obtenidos por otros grupos de investigación. El aumento de la corriente de fugas con la irradiación parece un efecto sobre el que no se puede ac-

tuar, y solo es posible minimizar su impacto sobre el funcionamiento de los experimentos operando los detectores a baja temperatura.

Las medidas de la tensión de vaciamiento completo de los detectores fabricados en substrato P e irradiados muestran que la irradiación con protones no produce la inversión del silicio, sino un aumento continuo de la concentración de aceptores: a diferencia de los substratos N para los que en las primeras etapas de la irradiación V_{FD} decrece, en el silicio P V_{FD} aumenta constantemente con la fluencia de irradiación. Por consiguiente, para asegurar tensiones de operación razonables durante toda la vida de los dispositivos N-sobre-P, es importante que la resistividad del silicio de partida sea lo más alta posible. Sin embargo, la resistencia a la radiación del silicio P es de lejos la mejor de todos los substratos estudiados: el ritmo de la introducción de aceptores, dado por el parámetro β , del silicio P estándar es menos de la mitad del que tiene el silicio N Czochralski. β es aún menor en el caso del silicio P oxigenado.

Estudios preliminares del *annealing* del silicio P muestran que su concentración de aceptores aumenta continuamente con el tiempo de recocido de forma similar a los substratos FZ y DOFZ N invertidos. El comportamiento del silicio Czochralski N es superior en este aspecto ya que el valor de su dopaje efectivo apenas cambia con el tiempo, aunque esta ventaja sólo es relevante en el caso de que la aplicación requiera tiempos extremadamente largos a alta temperatura.

A la gran resistencia a la radiación del silicio P FZ hay que unir el hecho de que el silicio P no sufre inversión y la unión no cambia de lado, lo que permite al detector operar eficientemente incluso en condiciones de vaciamiento incompleto. Además, la señal está formada por electrones, lo que supone una ventaja cuando el silicio está muy dañado y el atrapamiento de carga pasa a ser el factor que limita el buen funcionamiento de los dispositivos. Las medidas de la eficiencia de colección de carga de los detectores de micropistas N-sobre-P oxigenados pertenecientes a las mismas obleas que los diodos *pad* estudiados en este capítulo, que fueron llevadas a cabo por la Universidad de Liverpool, han demostrado que tras una irradiación de protones de 24 GeV de $7.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ la carga colectada es mayor de $6500 e^-$, que da una relación señal-ruido suficiente para que el detector siga siendo plenamente operativo [104]. Esta fluencia es equivalente a la de sLHC a 8 cm del punto de interacción tras una luminosidad integrada de 2500 fb^{-1} , como se ve en la fig. 1.6. Además, también se ha comprobado que las propiedades de colección de carga de estos dispositivos no se deterioran tras recocidos a alta temperatura equivalentes a varios años a temperatura ambiente [99].

Los factores anteriores hacen que los detectores N-sobre-P sean la mejor opción para la construcción de los trazadores de silicio que se utilizarán en los experimentos del futuro sLHC, y así lo ha entendido la comunidad científica [13, 28]. Hay que destacar que los resultados obtenidos en los detectores fabricados en el IMB-CNM y presentados en este capítulo han contribuido

Capítulo 5. Alternativas tecnológicas para la fabricación de los detectores

significativamente a esta conclusión.

Trabajos futuros deberían incluir un estudio en profundidad del silicio Czochralski P, hasta ahora poco estudiado porque es difícil de obtener con la calidad adecuada, pero con características muy prometedoras [95, 109]. Asimismo, también es necesario optimizar la tecnología de fabricación de los detectores N-sobre-P. Uno de estos aspectos tecnológicos es el aislamiento de la superficie del silicio entre las micropistas: como se ha visto, los detectores N-sobre-P aislados con *p-stops* no funcionan correctamente antes de la irradiación y sufren rupturas tempranas. Esta cuestión será el tema central del siguiente capítulo.

Capítulo 6

Optimización del aislamiento mediante *p-spray* en detectores de micropistas N-sobre-P

Las prometedoras características de los detectores N-sobre-P, que hemos visto en el capítulo anterior, han despertado el interés de la comunidad científica para el uso de este tipo de estructuras en entornos de alta radiación como el futuro sLHC [28]. Sin embargo, estos dispositivos todavía necesitan cierto desarrollo tecnológico. Una cuestión importante es conseguir un buen aislamiento en la superficie del silicio entre las micropistas sin que afecte al comportamiento eléctrico del dispositivo durante toda su vida útil. El aislamiento es necesario ya que las cargas positivas presentes en el SiO₂ inducen la creación de una capa de inversión de electrones en la interfaz óxido-silicio capaz de cortocircuitar las micropistas. La carga positiva aumenta con la irradiación pero está presente incluso en los óxidos no irradiados [50].

Una solución consiste en definir regiones flotantes tipo P o *p-stops*, rodeando las pistas tipo N. Los *p-stops* interrumpen la capa de inversión de electrones en la superficie y aíslan las micropistas, como se ve en la figura 6.1(a). Esta tecnología, utilizada en los detectores N-sobre-N de BaBar [107] y CDF II [108], tiene el inconveniente de añadir un nivel de máscara al proceso de fabricación que aumenta su complejidad y coste. Otro problema más importante son las microdescargas [110], pulsos de ruido aleatorios que se producen en regiones de campo eléctrico elevado del borde de los *p-stops* cuando la tensión de polarización excede de un cierto umbral [111, 112]. Las microdescargas son visibles en la corriente de fugas y en el ruido electrónico y suponen un límite a la tensión de operación de los dispositivos [98]. Desde la comunidad científica se han propuesto modificaciones a los *p-stops* que funcionan mejor que el *p-stop* convencional, pero que resultan bastante más complejas desde el punto de vista de la tecnología [112].

Una opción más sencilla es el *p-spray*, que consiste en una implantación

Capítulo 6. Optimización del aislamiento en N-sobre-P

de tipo P uniforme sobre toda la superficie de la oblea que se realiza al principio del proceso de fabricación (figura 6.1(b)) y que compensa la capa de electrones inducida por las cargas del óxido. Numerosos estudios han demostrado que el comportamiento eléctrico tras la irradiación de detectores con aislamiento mediante *p-spray* es claramente superior al de los aislados con *p-stops* [49, 55, 113, 114, 115]. El uso del *p-spray* en lugar del *p-stop* permite además reducir la distancia entre las pistas aumentando la resolución espacial del detector. Sin embargo, para asegurar un aislamiento correcto y evitar la ruptura temprana del dispositivo es necesario calibrar con cuidado el perfil de la implantación. Los detectores de la región píxel de CMS, de estructura N-sobre-N, están aislados mediante la técnica del *p-spray* [106, 115].

Una tercera opción, propuesta recientemente [116], es el *p-spray* moderado, que combina el *p-stop* convencional con un *p-spray* ligero (figura 6.1(c)).

En este capítulo se presenta un estudio de optimización del aislamiento mediante *p-spray* para la fabricación de detectores de micropistas de estructura N-sobre-P. En la primera sección se muestran los resultados del proceso de simulación llevado a cabo para encontrar la combinación de parámetros de la implantación *p-spray* que asegura un buen comportamiento eléctrico de los detectores. Las mejores opciones tecnológicas según la simulación se usaron en la fabricación de una serie de detectores de micropistas y otros dispositivos de test en la sala blanca del IMB-CNM; los resultados de la fabricación y de su caracterización eléctrica, así como la el acuerdo con las predicciones del simulador, se presentan en las secciones posteriores.

En la última parte del capítulo, y como ampliación del estudio anterior, se muestra un estudio de simulación de la fabricación y de las propiedades eléctricas de detectores de micropistas N-sobre-P con aislamiento mediante *p-spray* moderado.

Este trabajo se hizo en el marco de la actividad científica de la colaboración RD50 del CERN [23], para la que el IMB-CNM desarrolló una tecnología de fabricación de detectores de micropistas N-sobre-P con aislamiento mediante *p-spray*. El capítulo comprende el estudio previo de optimización de *p-spray* que se llevó a cabo para encontrar los parámetros de la implantación que garantizaran las mejores propiedades eléctricas de los detectores.

6.1. Optimización del *p-spray* mediante simulación

La simulación tecnológica y eléctrica de los dispositivos se llevó a cabo mediante programas del paquete ISE-TCAD 9.0 [90]. El software DIOS-ISE 9.0.6 [117] se utilizó para la simulación tecnológica del proceso de fabricación, y los parámetros eléctricos de los dispositivos se obtuvieron con DESSIS-ISE 9.0.3 [118].

6.1. Optimización del *p-spray* mediante simulación

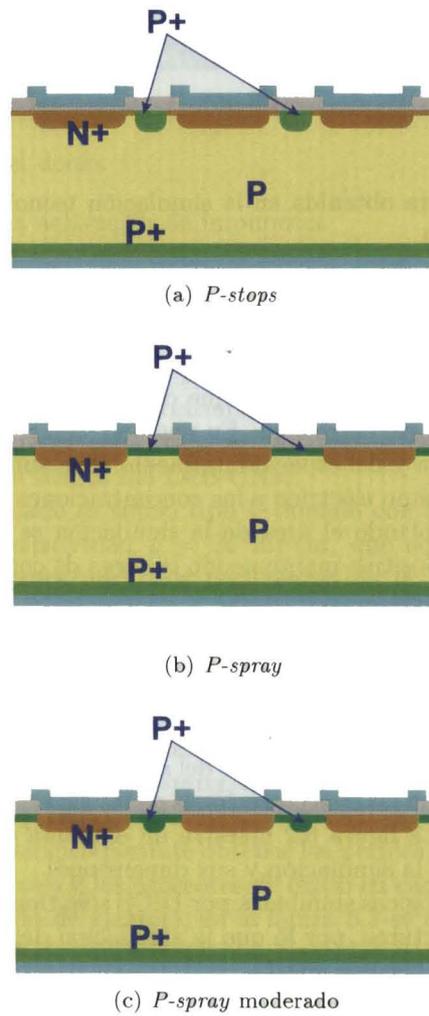


Figura 6.1: Esquema de los diversos métodos de aislamiento en un detector N-sobre-P: (a) *p-stops*; (b) *pspray*; (c) *p-spray moderado*.

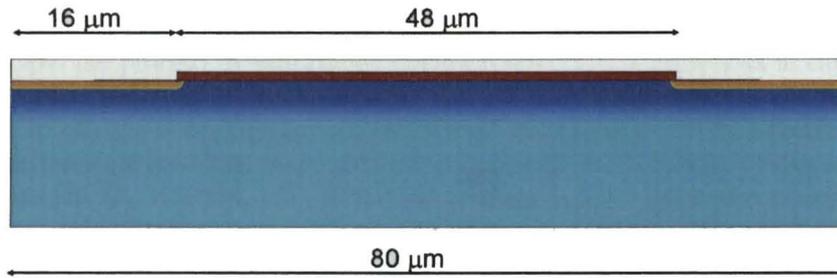


Figura 6.2: Estructura obtenida en la simulación tecnológica de la cara superior del dispositivo.

6.1.1. Simulación tecnológica

La estructura simulada en DIOS es una sección del detector perpendicular a la dirección de las micropistas, que comprende la mitad de dos pistas consecutivas y el espacio entre ellas. En realidad, con representar sólo la mitad de una micropista y del espacio intermedio sería suficiente para estudiar la distribución de campo eléctrico y las concentraciones de electrones y huecos; sin embargo doblando el área de la simulación se consigue una mejor visualización del dispositivo manteniendo la carga de computación dentro de unos límites razonables.

Las dimensiones de la estructura son las del juego de máscaras que posteriormente se utilizará para la fabricación de los detectores N-sobre-P y que fue diseñado por la colaboración RD50 junto con el IMB-CNM. La anchura de la implantación de la micropista es $32\ \mu\text{m}$ y la distancia entre los centros de dos pistas vecinas $80\ \mu\text{m}$. El espesor del sustrato simulado es $15\ \mu\text{m}$, más que suficiente para que las concentraciones de las especies dopantes alcancen un valor constante. La figura 6.2 muestra un esquema de la estructura que se obtiene al final de la simulación y sus dimensiones.

Las etapas tecnológicas simuladas por DIOS sólo tienen efecto en la parte superior de las estructuras, por lo que la simulación del proceso en el dorso del dispositivo ha de hacerse aparte.

A continuación se muestra la secuencia de etapas simuladas, extraídas del proceso de fabricación completo que se detallará más adelante (§6.2.3).

1. Crecimiento del óxido de *gettering*.
2. Decapado del óxido.
3. Crecimiento del óxido de implantación del *p-spray*, tiempo variable.
4. Implantación del *p-spray*, boro, energía y dosis variables.
5. Crecimiento del óxido máscara para la implantación de las pistas.

6.1. Optimización del *p-spray* mediante simulación

6. Fotolito para la definición de las pistas.
7. Grabado de óxido con máscara de resina y decapado del dorso.
8. Decapado de la resina en ácido.
9. Crecimiento del óxido para la implantación de las pistas y el dorso.
10. Implantación de las pistas.
11. Implantación del dorso.
12. Recocido para la activación de impurezas.
13. Recocido del metal.

Las etapas dedicadas a la definición de las resistencias de polisilicio y del metal no se simularon porque no afectan a los perfiles de dopantes, a los espesores de óxido, ni al comportamiento eléctrico de los detectores. Los parámetros tecnológicos de cada etapa se tomaron de los procesos reales que tienen lugar en la sala blanca del IMB-CNM.

El sustrato simulado es silicio tipo P dopado con boro, de orientación $\langle 100 \rangle$ y con una resistividad $\rho = 30 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$, que equivale a un dopaje $N_{eff} = 4.3 \times 10^{11} \text{ átomos/cm}^3$. Los parámetros de la implantación del *p-spray* se eligieron en un amplio rango de energías (25 a 150 keV) y dosis de implantación (10^{12} a $8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$), dentro de las especificaciones técnicas del implantador iónico de la sala blanca del IMB-CNM. El espesor del óxido delgado a través del cual se hace la implantación se fijó en 150 nm. Este valor ya se había utilizado anteriormente para la fabricación de detectores de micropistas N-sobre-N con *p-spray*, que mostraron un comportamiento eléctrico satisfactorio [119].

El simulador tecnológico permite obtener los perfiles unidimensionales de dopantes y otras especies y los espesores de óxido en cada punto del proceso de fabricación. A modo de ejemplo, en la figura 6.3 se muestran los perfiles de *p-spray* resultantes de varias implantaciones. Un aumento de la dosis de la implantación no cambia la forma del perfil, pero aumenta los valores de la concentración de forma proporcional a la relación entre las dosis. Un aumento en la energía de la implantación apenas influye en la concentración máxima de dopantes, pero da lugar a perfiles más profundos.

6.1.2. Simulación eléctrica

La estructura de la figura 6.2 que se obtuvo mediante la simulación tecnológica del proceso de fabricación se hubo de modificar para conseguir el dispositivo completo para la simulación eléctrica. Este proceso se llevó a cabo con el programa MDRAW, que también pertenece al paquete ISE-TCAD.

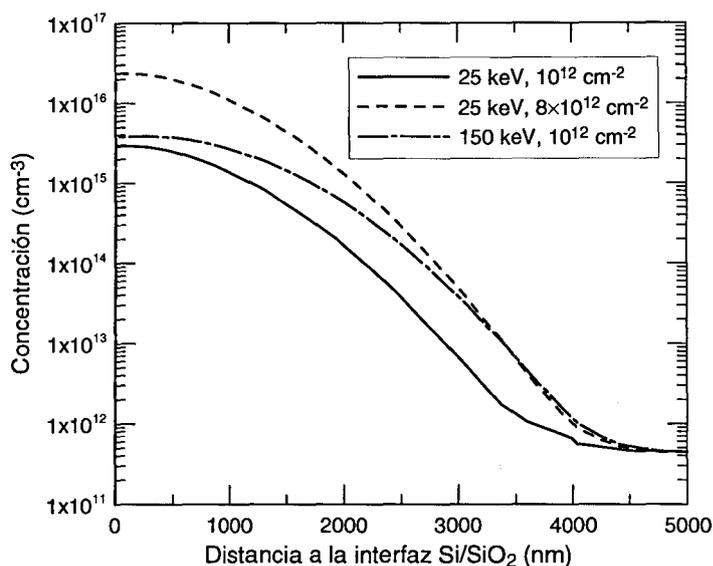


Figura 6.3: Perfiles de boro obtenidos por simulación del dispositivo con diferentes implantaciones de *p-spray*.

En primer lugar se aumentó el espesor del sustrato hasta las 300 μm . Posteriormente se introdujo el perfil de dopaje del dorso, obtenido mediante la simulación del proceso de fabricación en el reverso de la oblea. Finalmente se definieron los contactos de metal en cada una de las pistas y el dorso.

La simulación eléctrica se hizo con DESSIS-ISE suponiendo una densidad de cargas en el óxido no irradiado $Q_{ox} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, del orden de la que se obtiene habitualmente en los óxidos procesados en la sala blanca del IMB-CNM. El efecto de la irradiación se modeló aumentando Q_{ox} hasta 10^{12} cm^{-2} , sin modificar el dopaje efectivo del sustrato ni las vidas medias de los portadores. Con esto es suficiente para determinar la capacidad del *p-spray* para compensar la capa de inversión de electrones en la interfaz Si/SiO₂ de los dispositivos irradiados a frecuencias superiores a la de saturación del óxido, unos pocos kGy [49]. Por otro lado, este modelo representa correctamente el estado de los detectores en el caso de experimentos en el que la radiación es de rayos X o γ , que apenas causan daño por desplazamiento.

El simulador DESSIS-ISE se utilizó para predecir las características corriente-tensión y la tensión de ruptura de los dispositivos simulados, además de las concentraciones de portadores en la interfaz Si/SiO₂. Los modelos físicos introducidos en la simulación incluyen los que describen la dependencia de la movilidad de los portadores en función de factores como el dopaje, la dispersión portador-portador (*carrier-carrier scattering*) y la saturación

6.1. Optimización del *p-spray* mediante simulación

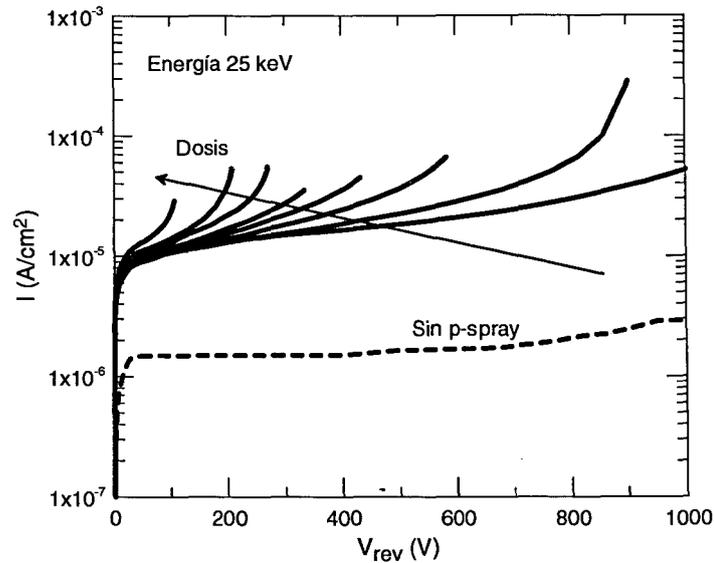


Figura 6.4: Curvas I-V simuladas para los detectores N-sobre-P no irradiados. La línea de puntos corresponde a un dispositivo sin *p-spray*, y las líneas continuas a dispositivos con una implantación de *p-spray* de energía 25 keV y dosis comprendidas entre 10^{12} y $8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$.

a campos altos. También se incluyen diversos modelos para la recombinación de portadores en niveles profundos del silicio, banda a banda y en la interfaz Si/SiO₂, así como para la generación de pares por avalancha. Las simulaciones se hicieron suponiendo una temperatura de 20° C.

Curvas I-V y tensión de ruptura

Las características corriente-tensión de los detectores simulados se obtuvieron aplicando una rampa de tensiones en el contacto del dorso y manteniendo a 0 V los contactos de las micropistas.

Un ejemplo de las curvas obtenidas se puede ver en la figura 6.4, donde se representan los valores absolutos de la densidad de corriente medida en el contacto de una de las pistas en función de la tensión en el dorso. El *p-spray* de los dispositivos simulados se consiguió con una implantación de energía 25 keV y dosis variable entre 10^{12} y $8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. La densidad de cargas en el óxido es de 10^{11} cm^{-2} , la correspondiente a un óxido no irradiado. Se observa que a mayor dosis implantada como *p-spray* mayor es la corriente en inversa y menor la tensión de ruptura de los dispositivos.

La ruptura se produce cuando los portadores de carga ganan suficiente

Capítulo 6. Optimización del aislamiento en N-sobre-P

energía con el campo eléctrico para provocar ionización por impacto en la red cristalina. Los pares electrón-hueco así creados pueden participar en más colisiones y a su vez crear más pares. Esta multiplicación de portadores va acompañada de mecanismos que obstaculizan el desarrollo de la avalancha, como efectos de recombinación o pérdidas de energía por colisiones o por excitación de átomos. En consecuencia, la ruptura por avalancha es un proceso de umbral y se establece sólo si el campo eléctrico excede de un cierto valor y además existe la posibilidad de aceleración de las cargas, es decir, una amplia región de carga espacial. Si esta amplitud es mayor que el camino libre medio entre dos ionizaciones por impacto se produce la multiplicación de las cargas, que puede dar lugar a la ruptura.

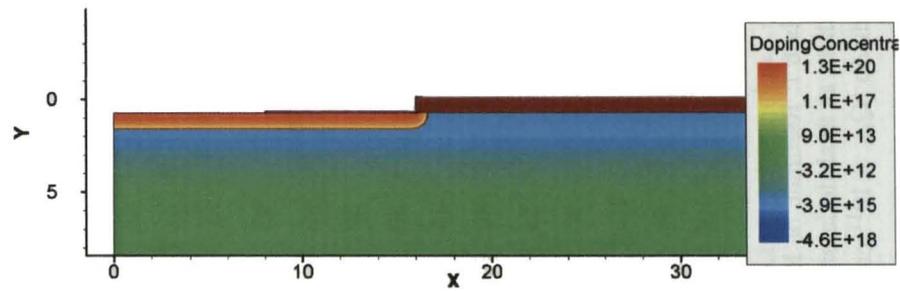
En la figura 6.5(a) se muestra la distribución de dopantes en un dispositivo simulado con una implantación de *p-spray* de 45 keV y 10^{12} cm⁻², y en la fig. 6.5(b) se puede ver la distribución de campo eléctrico en el momento de la ruptura del mismo dispositivo. El valor máximo del campo eléctrico es 5.7×10^5 V/cm y se da en la unión entre la implantación N⁺ de la micropista y el *p-spray*, donde el gradiente de la concentración de dopantes es más alto. Asimismo, en la figura 6.5(c) se muestran los valores de la integral de ionización de electrones en el mismo dispositivo: en el momento en que este parámetro o su equivalente para huecos es igual a uno la generación de nuevos pares por ionización se autosostiene y se produce la ruptura por avalancha de la unión.

La figura 6.6 muestra la tensión de ruptura V_{BD} en función de la carga total introducida en el dispositivo final por la implantación del *p-spray*. Las energías de implantación simuladas van de los 25 a los 150 keV, y las dosis, de 10^{12} a 8×10^{12} cm⁻². La dependencia de V_{BD} es con la carga total implantada, que depende de la energía y la dosis de la implantación en su conjunto, y no con la profundidad del perfil, dada por la energía de implantación, al menos en el rango de energías considerado. Se puede observar una disminución drástica de la tensión de ruptura con el aumento de la densidad de carga implantada como *p-spray*. Es un resultado lógico: a mayor concentración de *p-spray*, mayor es el gradiente de la concentración de dopantes en la unión P-N de las micropistas, y en consecuencia mayor será el campo eléctrico en la región para iguales condiciones de polarización.

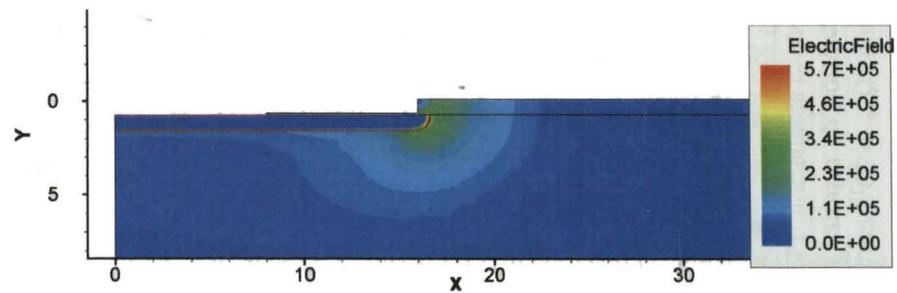
Los valores de la carga implantada como *p-spray* en el dispositivo, calculados en la simulación tecnológica, y las correspondientes tensiones de ruptura obtenidas en la simulación eléctrica, para varios parámetros de la implantación, se pueden ver en la tabla 6.1.

En detectores reales el valor máximo del campo eléctrico puede verse aumentado por la presencia de defectos cristalinos o picos localizados de dopantes debidos a defectos litográficos, por lo que su tensión de ruptura suele ser más baja que la predicha por la simulación.

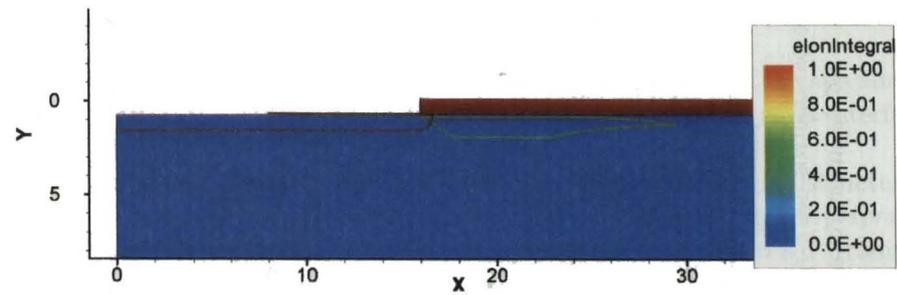
6.1. Optimización del *p-spray* mediante simulación



(a) Concentración de dopantes



(b) Campo eléctrico



(c) Ionización por impacto de electrones

Figura 6.5: (a) Distribución de dopantes; (b) campo eléctrico; (c) integral de ionización por impacto de electrones en un detector N-sobre-P en el momento de la ruptura por avalancha. El dispositivo simulado tiene una implantación de *p-spray* de energía 45 keV y 10^{12} cm^{-2} y una densidad de cargas en el óxido de 10^{11} cm^{-2} .

E (keV)	Dosis (cm ⁻²)	Carga implantada (cm ⁻²)	V _{BD} (V)	¿Inversión en la superficie?	
				No irradiado	Irradiado
-	-	0	>1000	Sí	Sí
25	10 ¹²	3.01×10 ¹¹	1180	No	Sí
25	2×10 ¹²	6.02×10 ¹¹	580	No	Sí
25	5×10 ¹²	1.50×10 ¹²	210	No	Sí
25	8×10 ¹²	2.41×10 ¹²	110	No	Sí
30	10 ¹²	3.56×10 ¹¹	>1000	No	Sí
35	10 ¹²	3.84×10 ¹¹	960	No	Sí
45	10 ¹²	4.09×10 ¹¹	910	No	Sí
60	10 ¹²	4.32×10 ¹¹	860	No	Sí
75	10 ¹²	4.52×10 ¹¹	836	No	Sí
90	10 ¹²	4.68×10 ¹¹	814	No	Sí
150	10 ¹²	5.23×10 ¹¹	711	No	Sí
45	5×10 ¹²	2.04×10 ¹²	129	No	Sí
100	3×10 ¹²	1.44×10 ¹²	211	No	Sí

Tabla 6.1: Resumen de los resultados de la simulación. Para cada par de parámetros del *p-spray* se muestra la carga total en el silicio al final de la simulación, la tensión de ruptura y la existencia o no de inversión en la superficie para un óxido no irradiado ($Q_{ox} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$) o irradiado ($Q_{ox} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$).

6.1. Optimización del *p-spray* mediante simulación

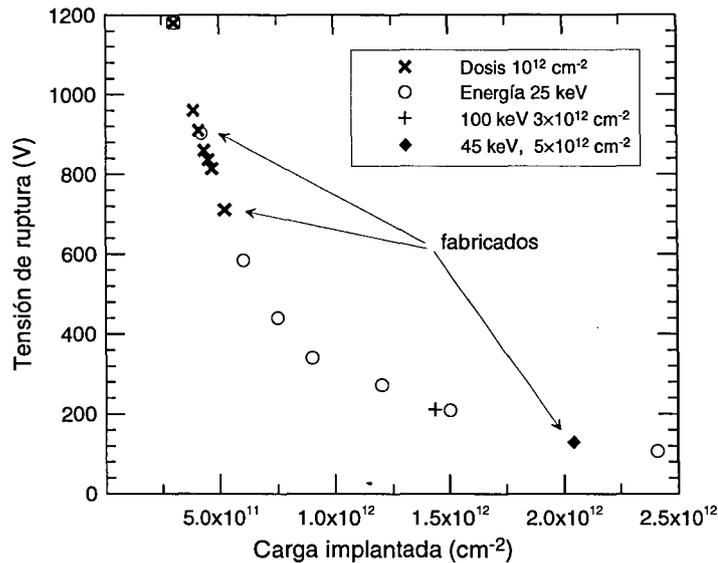


Figura 6.6: Dependencia de la tensión de ruptura con la carga total implantada como *p-spray* en dispositivos no irradiados. Las energías y dosis señaladas son las que se utilizaron en la fabricación de los dispositivos de test.

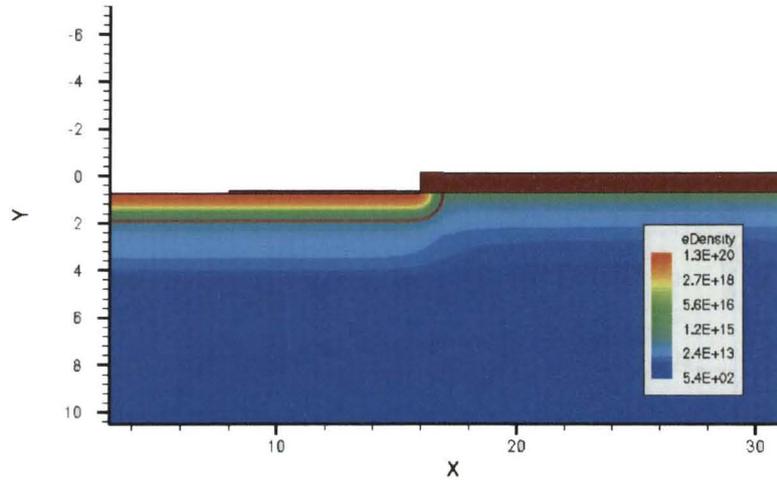
Inversión en la superficie

El simulador DESSIS-ISE se utilizó también para evaluar la capacidad del *p-spray* para compensar la capa de inversión de electrones en la interfaz Si/SiO₂ inducida por las cargas en el óxido.

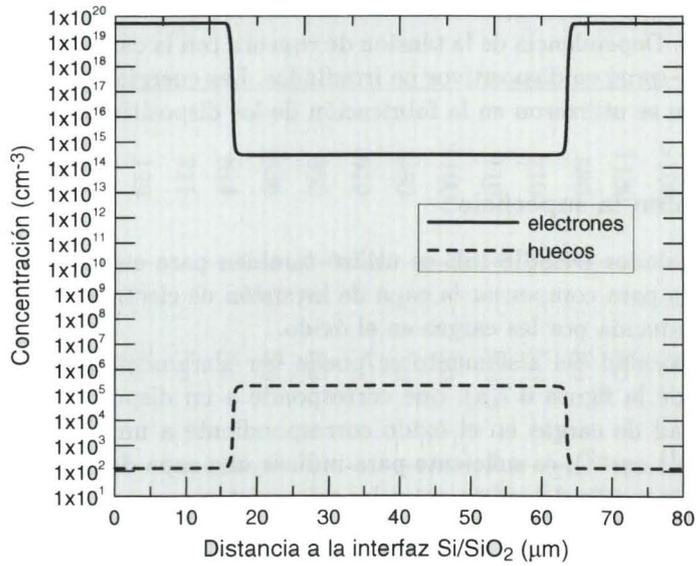
La necesidad del aislamiento se puede ver claramente en la estructura simulada de la figura 6.7(a), que corresponde a un dispositivo sin *p-spray*. La densidad de cargas en el óxido correspondiente a un óxido sin irradiar ($Q_{ox} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$), es suficiente para inducir una capa de inversión de electrones en la región del silicio entre las micropistas.

La figura 6.7(b) muestra los perfiles unidimensionales de portadores entre dos micropistas consecutivas en este mismo dispositivo, a una distancia de 300 nm de la interfaz Si/SiO₂. La superficie del silicio está fuertemente invertida y se comporta como una prolongación de las pistas, que se encuentran efectivamente cortocircuitadas.

Se puede hacer un cálculo rápido para estimar la concentración de carga que hay que implantar con el *p-spray* si se quiere evitar la inversión en la superficie del silicio. En la figura 6.8 se puede ver el diagrama de bandas del silicio P en la interfaz Si/SiO₂. En ausencia de polarización, la presencia de la carga positiva en el óxido curva hacia abajo las bandas del silicio, estando



(a) Densidad de electrones en el dispositivo



(b) Perfiles de portadores a 0.3 μm de la interfaz Si/SiO₂

Figura 6.7: (a) Densidad de electrones y (b) perfiles de electrones y huecos a 0.3 μm de la interfaz Si/SiO₂ en un detector N-sobre-P sin aislamiento, con un óxido no irradiado ($Q_{ox} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$) y sin polarizar.

6.1. Optimización del *p-spray* mediante simulación

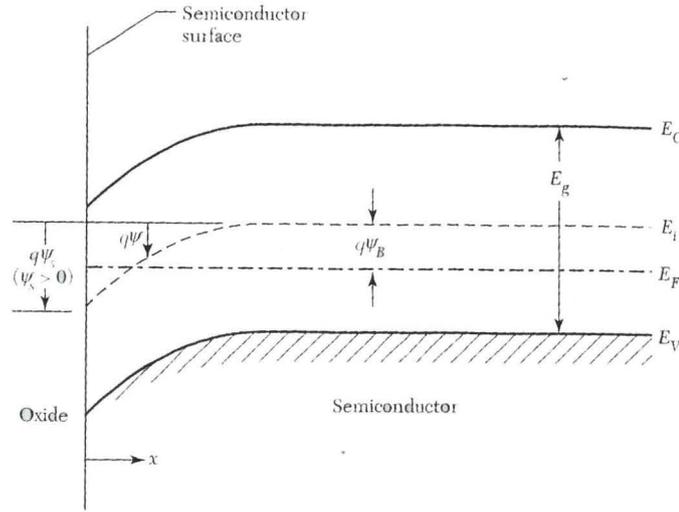


Figura 6.8: Diagrama de bandas del silicio P en la interfaz Si/SiO₂.

la curvatura caracterizada por el potencial de superficie Ψ_S . Se considera que el semiconductor está fuertemente invertido cuando $\Psi_S > 2\Psi_B$, siendo $q\Psi_B$ la distancia entre el nivel de Fermi y el nivel intrínseco:

$$\Psi_B = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{N_a}{n_i} \right) \quad (6.1)$$

donde k_B es la constante de Boltzmann, N_a el dopaje del substrato P y n_i la densidad intrínseca de portadores.

Por otro lado el potencial asociado a las cargas, ΔV , se reparte entre el óxido y el semiconductor, de modo que:

$$\Delta V = \Psi_s + V_{ox} \quad (6.2)$$

Por tanto, la condición de inversión fuerte de la superficie del silicio es:

$$\Delta V - V_{ox} > \frac{2k_B T}{q} \ln \left(\frac{N_a}{n_i} \right) \quad (6.3)$$

donde

$$\Delta V = \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} \quad (6.4)$$

siendo Q_{ox} la carga en el óxido y C_{ox} la capacidad del óxido, ambas por unidad de área.

Capítulo 6. Optimización del aislamiento en N-sobre-P

Finalmente, V_{ox} es el potencial que cae en el óxido debido a la acumulación de carga en la superficie del silicio:

$$V_{ox} = E_{ox}d = \frac{|Q_s|}{\epsilon_0\epsilon_{ox}}d = \frac{|Q_s|}{C_{ox}} = \frac{qN_aW}{C_{ox}} = \frac{\sqrt{2q\epsilon_0\epsilon_{Si}N_a\Psi_B}}{C_{ox}} \quad (6.5)$$

siendo E_{ox} el campo eléctrico en el óxido, Q_s la carga por unidad de área en el semiconductor y W la anchura de la zona desertizada.

La resolución de la inecuación (6.3) da el valor mínimo de N_a necesario para que no se produzca la inversión. En el caso de un óxido sin irradiar, con $Q_{ox} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, basta con $N_a > 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$. Para un óxido irradiado en el que $Q_{ox} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ es necesaria una concentración $N_a > 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$.

En una primera aproximación, supondremos que N_a es el valor de la concentración del *p-spray* cerca de la superficie del silicio. Según los resultados anteriores, para evitar la inversión de la superficie de un detector sin irradiar es suficiente con un *p-spray* ligero como el que se consigue con una implantación de energía 25 keV y dosis 10^{12} cm^{-2} y cuyo perfil se puede ver en la figura 6.3. El resultado de la simulación de un dispositivo de estas características se muestra la figura 6.9. Los perfiles transversales de portadores en el punto medio entre las pistas demuestran que ha desaparecido el canal de electrones de la superficie del silicio, lo que confirma la validez de los cálculos anteriores.

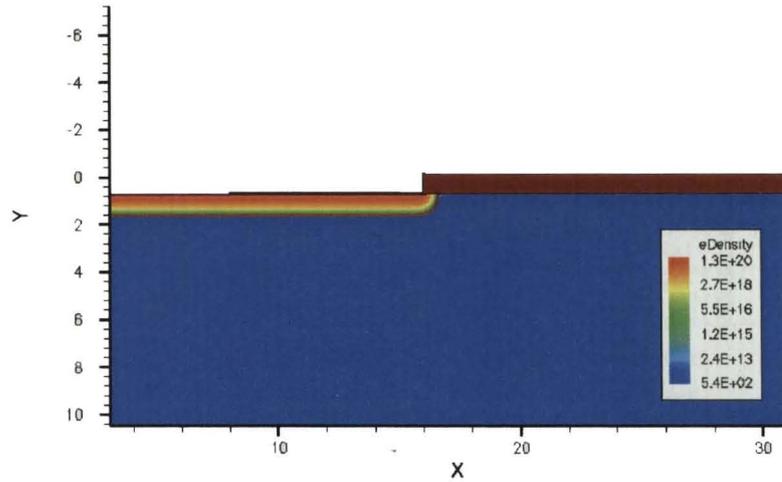
Por el contrario, según la ecuación (6.3), ninguno de los *p-sprays* que se han simulado, hasta una dosis máxima de implantación de boro de $8 \times 10^{12} \text{ átomos/cm}^2$, sería capaz de aislar por completo las micropistas de un detector irradiado hasta la saturación del óxido. El perfil del *p-spray* correspondiente a esta implantación máxima se encuentra también en la figura 6.3. El valor máximo de la concentración resultante, $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$, es un orden de magnitud menor que el mínimo necesario, $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$.

La distribución de portadores en un dispositivo con este *p-spray* se ha simulado para tensión de polarización de 100 V, muy por encima de la de vaciamiento completo, ya que la polarización del detector a tensiones superiores a V_{FD} mejora substancialmente el aislamiento entre las pistas P [120]. Aun así, las concentraciones de portadores en la proximidad de la superficie del dispositivo, que están en la figura 6.10, demuestran que en estas condiciones todavía existe un canal continuo de electrones entre las micropistas. Conviene recordar que la concentración de carga implantada en este *p-spray* es tan alta que la tensión de ruptura del dispositivo simulado es sólo de 110 V, un valor inaceptable en la mayoría de los casos.

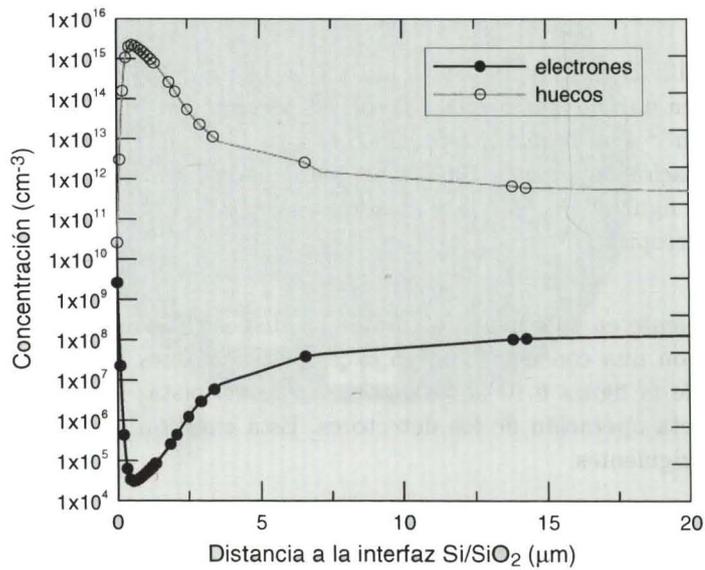
Está claro que para evitar la presencia de la capa de inversión de electrones en la superficie del silicio en dispositivos irradiados son necesarias concentraciones muy elevadas de *p-spray*. Por desgracia, la tensión de ruptura decrece con la carga implantada y es necesario llegar a una solución de compromiso entre un V_{BD} razonable y un aislamiento adecuado de las pistas.

Por otro lado, también es necesario evaluar la influencia de la calidad

6.1. Optimización del *p-spray* mediante simulación



(a) Densidad de electrones en el dispositivo



(b) Perfiles transversales de portadores en el punto medio entre las pistas

Figura 6.9: (a) Densidad de electrones y (b) perfiles de electrones y huecos en el punto medio entre las pistas, en un detector N-sobre-P con un *p-spray* de energía 25 keV y dosis 10^{12} cm^{-2} , con un óxido no irradiado ($Q_{ox} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$) y sin polarizar.

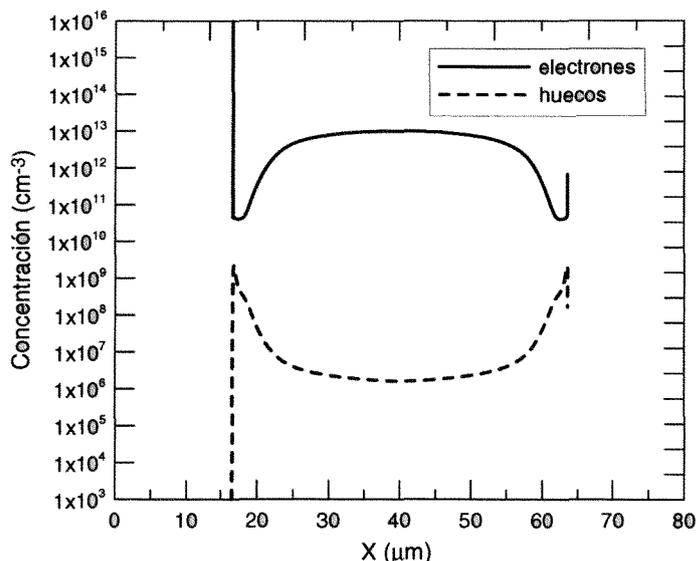


Figura 6.10: Densidad de electrones en el silicio a $0.1 \mu\text{m}$ de la interfaz Si/SiO₂, en un detector N-sobre-P con un *p-spray* de energía 25 keV y dosis $8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, con un óxido irradiado ($Q_{ox} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) y con una tensión de polarización inversa de 100 V. La coordenada horizontal X es la misma que en las figuras 6.5, 6.7 y 6.9, siendo $x = 0$ y $x = 80$ los puntos medios de sendas micropistas.

del aislamiento en el funcionamiento de los dispositivos reales, ya que puede que aún con una concentración en exceso de electrones libres en superficie como la de la figura 6.10 la resistencia entre las pistas sea suficiente para una correcta operación de los detectores. Esta cuestión se estudiará en las secciones siguientes.

6.2. Dispositivos fabricados

6.2.1. Descripción

Con el objetivo de verificar la validez de los resultados de la simulación tecnológica y eléctrica se procesaron varios lotes de test de detectores N-sobre-P con diferentes implantaciones de *p-spray*.

El juego de máscaras que se usó para la fabricación fue diseñado por la colaboración RD50 [23] con la participación del IMB-CNM, e incluye las máscaras necesarias para el procesado de doble cara de detectores tipo N-sobre-N, con un solo nivel de metal y pasivación, aunque no incluye la que

6.2. Dispositivos fabricados

Nivel	Campo	Descripción
P-DIFF	Oscuro	Área activa y anillos de guarda
RES-CON	Oscuro	Polisilicio de baja resistividad
POLY	Claro	Polisilicio de alta resistividad
WINDOW	Oscuro	Contactos
METAL	Claro	Metal
PASSIV	Oscuro	Pasivación
BACK-DIF	Oscuro	Difusión del dorso (N-sobre-N)
BACK-WIN	Oscuro	Contactos del dorso (N-sobre-N)
BACK-MET	Claro	Metal del dorso (N-sobre-N)

Tabla 6.2: Niveles del juego de máscaras RD50.

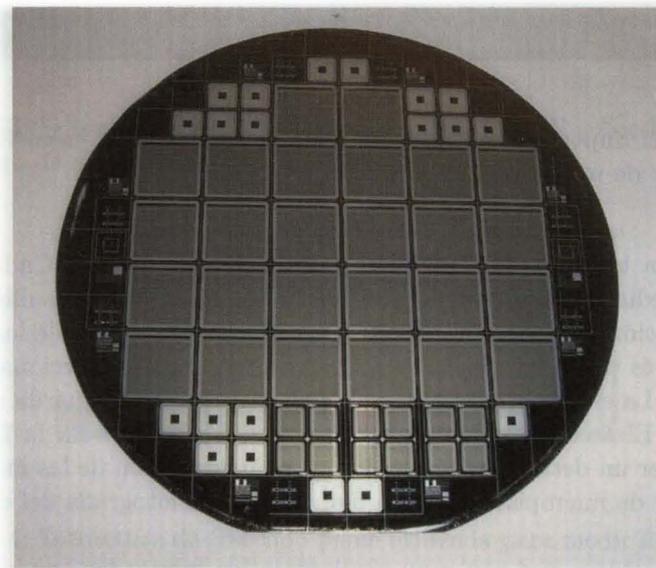


Figura 6.11: Fotografía de una oblea fabricada con el juego de máscaras de la colaboración RD50.

define los *p-stops*. En la tabla 6.2 se resumen las características de los niveles disponibles en el juego.

Cada oblea contiene 26 detectores de micropistas, 20 pads, 12 tipo píxel y 8 juegos de estructuras de test para medir diversos parámetros del proceso de fabricación. La fotografía de una oblea completa fabricada se puede ver en la figura 6.11.

Los detectores de micropistas constan de 128 pistas de una anchura de



Figura 6.12: Superposición de los niveles de máscara del juego RD50 para un detector de micropistas N-sobre-P.

$32 \mu\text{m}$, una longitud de $10472 \mu\text{m}$, y un *pitch* de $80 \mu\text{m}$. Cada pista se polariza mediante una resistencia de polisilicio conectada a un anillo de metal de polarización que rodea al detector. La lectura de la señal de las pistas se hace a través de un condensador MOS integrado que proporciona el acople capacitivo. La estructura está rodeada por ocho anillos de guarda con placas de campo. El área activa del detector es $1.06 \times 1.06 \text{ cm}^2$. En la figura 6.12 se puede ver un detalle del resultado de la superposición de las máscaras en un detector de micropistas, y en la figura 6.13 una fotografía del dispositivo fabricado.

Los detectores *pad* son muy similares a los fabricados con el juego de máscaras ROSE y que se describen en §4.3. Su forma es cuadrada con las esquinas redondeadas y tienen un agujero en la metalización para permitir la inyección de luz. El área activa mide $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ y está rodeada por ocho anillos de guarda.

Simultáneamente a las obleas de los detectores N-sobre-P y con la misma secuencia de pasos se procesaron varias obleas adicionales con dispositivos de test para medir la carga en el óxido y la resistencia entre pistas. Las estructuras de test usadas para la medida de las cargas en el óxido son simples capacidades MOS. La resistencia entre pistas no se puede medir directamente en un detector, ya que se encuentra en paralelo con la suma de las resistencias de polarización de polisilicio de cada pista, y para obtenerla se diseñaron estructuras tipo peine como la que se puede ver en la figura

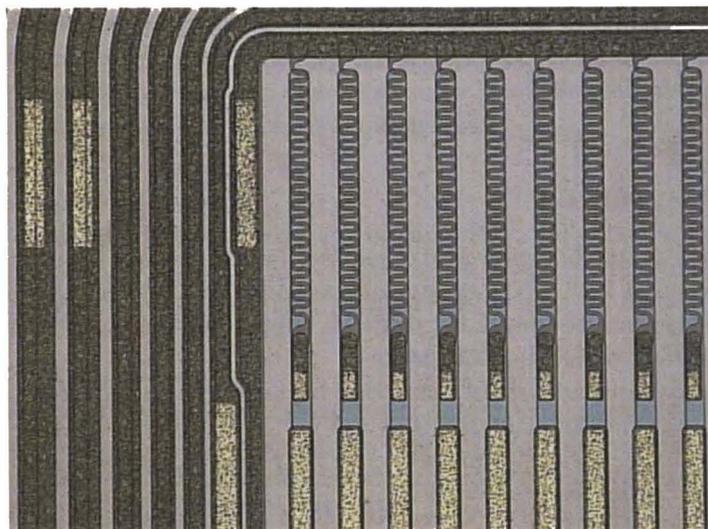


Figura 6.13: Fotografía de un detector de micropistas N-sobre-P fabricado con el juego de máscaras de la colaboración RD50.

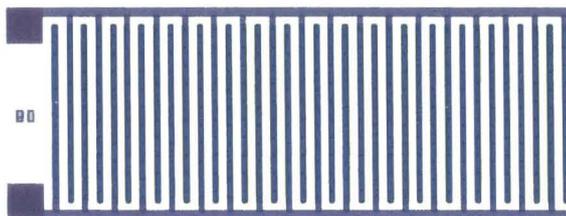


Figura 6.14: Estructura de test tipo peine utilizada para medir la resistencia entre pistas.

6.14. El *pitch* de las estructuras peine es 50, 80 ó 100 μm , y la longitud total de cada una 99, 62 y 50 mm, respectivamente.

6.2.2. Parámetros del *p-spray*

Se hicieron tres runs para determinar el acuerdo entre los resultados de la simulación y los de la fabricación. Desgraciadamente, las obleas utilizadas en los dos primeros pertenecían a un lote con defectos de cristalización en el silicio, y en ellas la implantación del *p-spray* resultó escasamente efectiva y muy inhomogénea. En este estudio nos limitaremos a presentar los resultados del tercer run de calibración, para el que se utilizaron obleas diferentes, y en

Capítulo 6. Optimización del aislamiento en N-sobre-P

el que los parámetros del *p-spray* fueron:

- 45 keV, 10^{12} cm⁻².
- 45 keV, 5×10^{12} cm⁻².
- 150 keV, 10^{12} cm⁻².

La dosis de implantación de 10^{12} cm⁻² es la mínima para la que el implantador iónico del IMB-CNM es capaz de asegurar una buena homogeneidad. En todos los casos el espesor del óxido de implantación de fue 150 nm, igual que el utilizado para las simulaciones.

Según los resultados de la simulación las tensiones de ruptura correspondientes a cada implantación son 910, 129 y 711 V, respectivamente. Las tres garantizan un perfecto aislamiento entre las pistas en detectores no irradiados, aunque no en los irradiados.

6.2.3. Proceso de fabricación

Las obleas utilizadas son *Float Zone* tipo P, con orientación $\langle 100 \rangle$, de Siltronic. Su espesor es 300 ± 15 μm y su resistividad nominal 30 k Ω -cm, aunque el resultado de la medida con cuatro puntas sobre una oblea sin procesar es (20 ± 1) k Ω -cm, que corresponde a un dopaje efectivo con boro de $(6.5 \pm 0.3) \times 10^{11}$ cm⁻³.

A continuación se detalla la secuencia de pasos del proceso de fabricación de un detector de micropistas N-sobre-P con aislamiento mediante *p-spray*. A partir de la etapa 10 se representan dos cortes del dispositivo:

- A la izquierda: un corte longitudinal en el sentido de las micropistas sobre la resistencia de polisilicio que conecta el anillo de polarización con el comienzo de la micropista.
- A la derecha: un corte transversal de una micropista.

1. Inicio del run.

2. Limpieza general simple.

Antes de cualquier etapa térmica hay que someter a las obleas a una limpieza para eliminar restos orgánicos o metálicos que puedan contaminar los hornos.

En esta etapa la limpieza se hace con una mezcla de H₂SO₄ (95-97 %) y H₂O₂ (30 %) en proporción 2:1.

3. Oxidación húmeda de 800 nm a 1050° C.

Esta oxidación sirve para mejorar las características de la oblea antes del procesado, ya que en ella se consume la capa superficial del silicio, que podría contener defectos o impurezas.

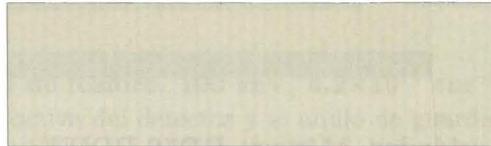
4. Decapado del óxido.

El óxido se decapa por completo en Sioetch[®], una solución tamponada de NH₄F (25 %) y HF (6 %), de Merck KGaA. Este producto es el utilizado en todas las etapas de grabado húmedo del óxido.

5. Limpieza general.

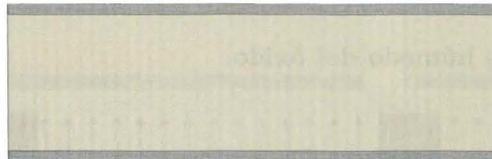
En esta etapa, además de los restos orgánicos o metálicos, se elimina también la capa de óxido nativo que pudiera haber crecido en la superficie de la oblea. En este caso la composición de la mezcla es H₂SO₄ (95–97 %), H₂O₂ (30 %) y HF (5 %).

Tras estas etapas previas el estado de la superficie de la oblea es el adecuado para comenzar la fabricación de los dispositivos



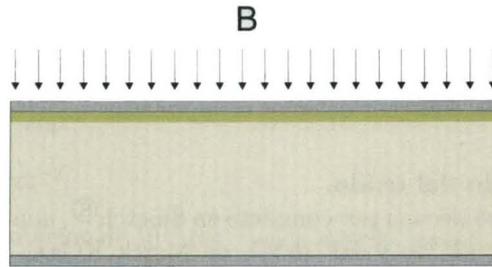
6. Oxidación seca de 150 nm a 1050° C.

Este óxido sirve para optimizar el perfil de la implantación del *p-spray*. Realizar las implantaciones a través de un óxido delgado resulta en un perfil más homogéneo, ya que el SiO₂, al tratarse de un material amorfo, disminuye la probabilidad de canalización de los iones en la red cristalina del silicio al dispersarlos en direcciones aleatorias



7. Implantación de boro.

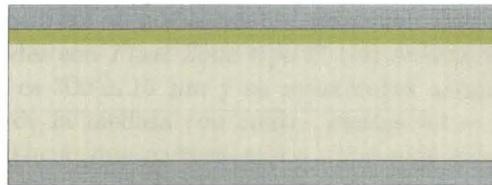
Implantación del *p-spray*. Energía y dosis variables.



8. Limpieza general simple.

9. Oxidación húmeda de 750 nm a 1100° C.

Esta capa gruesa de óxido constituye el óxido de campo de los detectores, y además sirve de máscara para las implantaciones iónicas que se realizarán a continuación.



10. Fotolito estándar. Máscara RD50-PDIFF.

Definición de las regiones N⁺ de las obleas: micropistas y anillos de guarda.



11. Grabado húmedo del óxido.



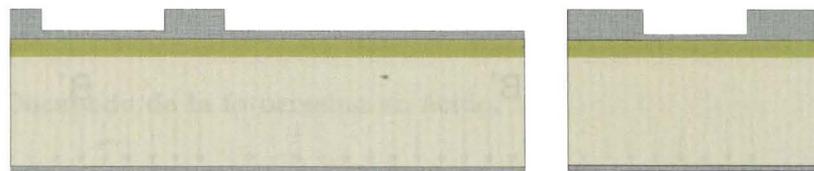
12. Decapado de la fotorresina en ácido.



13. Limpieza general.

14. Oxidación seca de 36.5 nm a 950° C.

Este óxido delgado sirve para optimizar las implantaciones iónicas que se harán a continuación.

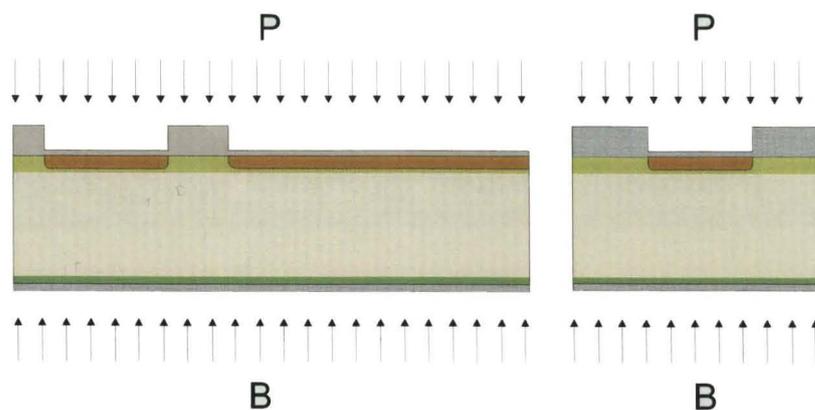


15. Implantación de fósforo. 100 keV, $4.2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$.

Define el área activa del detector y el anillo de guarda. El ángulo del haz de iones en las implantaciones es 7° .

16. Implantación de boro, 50 keV, 10^{15} cm^{-2} .

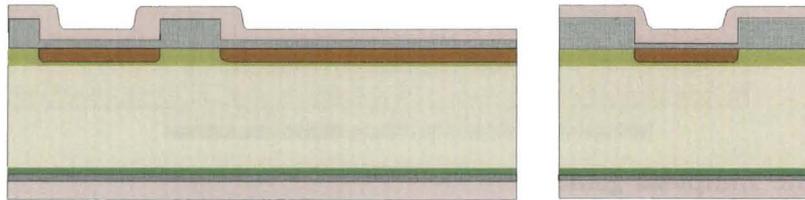
Para conseguir el contacto óhmico del silicio con el metal del dorso.



17. Limpieza general simple.

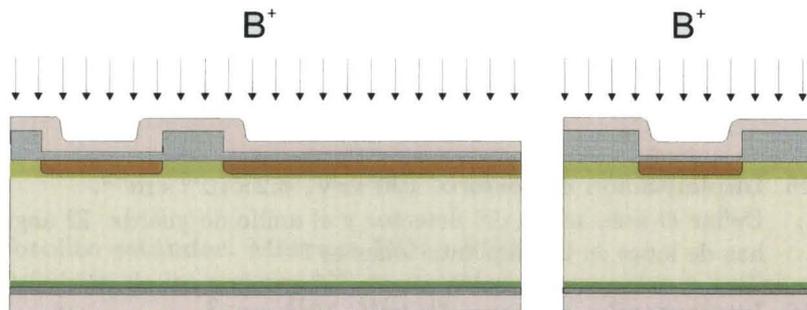
18. **Depósito de polisilicio.**

Depósito de una capa de polisilicio sin dopar de 600 nm en un horno LPCVD.



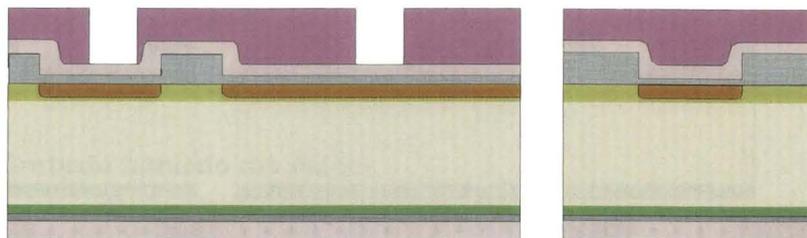
19. **Implantación de boro, 100 keV, $1.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$.**

Dopado del polisilicio para ajustar la resistencia de la capa en la que se definirán las resistencias de polarización de los detectores de micropistas.



20. **Fotolito estándar. Máscara RD50-RES-CON.**

Definición de las zonas P⁺ de baja resistividad del polisilicio para conseguir un buen contacto con el metal.



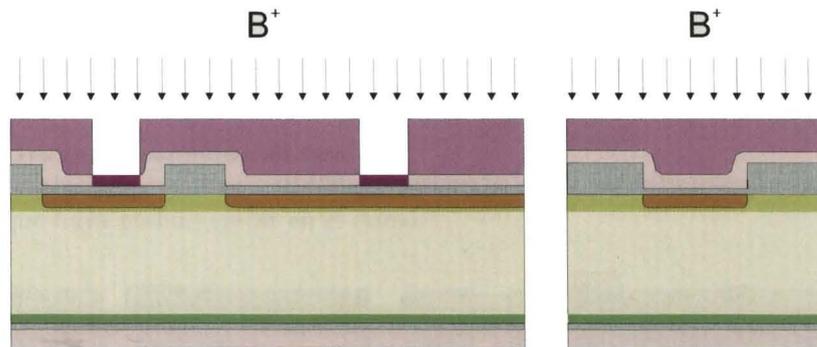
21. **Recocido de la fotorresina.**

Para endurecerla frente a la etapa de implantación que sigue. La resina actúa como máscara para la implantación, y si se degradase se perdería resolución en el contacto polisilicio-metal.

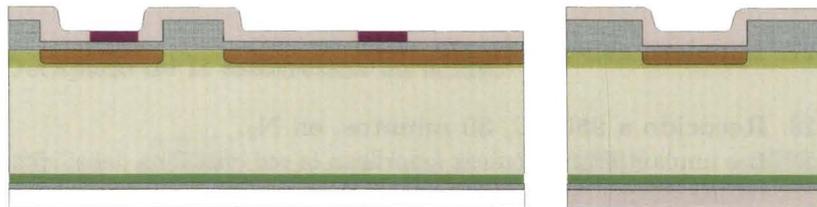
6.2. Dispositivos fabricados

22. Implantación de boro, 50 keV, 10^{15} cm^{-2} .

Zonas de baja resistividad del polisilicio que procurarán el contacto con el metal.

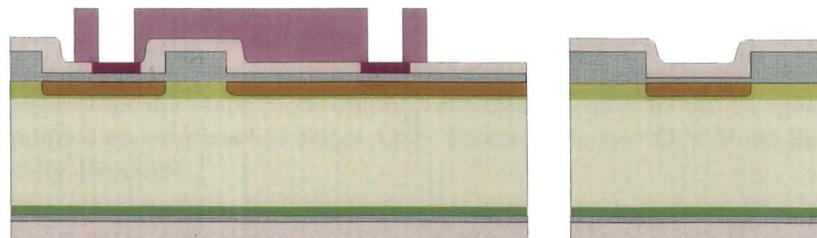


23. Decapado de la fotorresina en ácido.



24. Fitolito estándar. Máscara RD50-POLY.

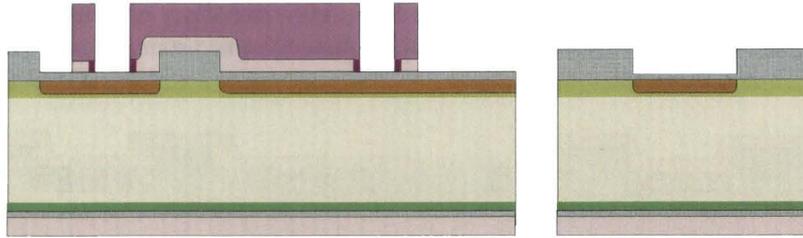
Definición de las resistencias de polarización de polisilicio.



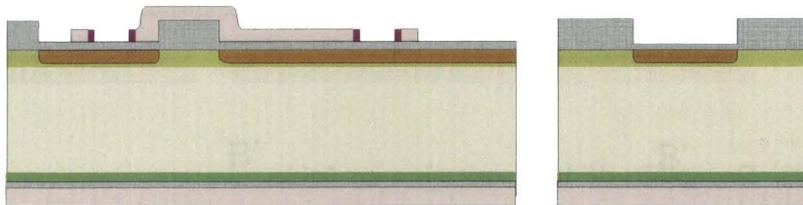
25. Grabado del polisilicio.

Grabado seco en un equipo RIE.

Capítulo 6. Optimización del aislamiento en N-sobre-P



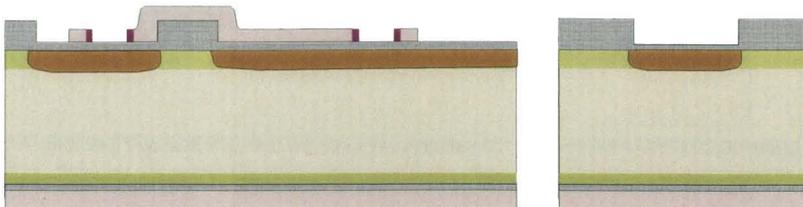
26. Decapado de la fotorresina en ácido.



27. Limpieza general simple.

28. Recocido a 950° C, 30 minutos, en N₂.

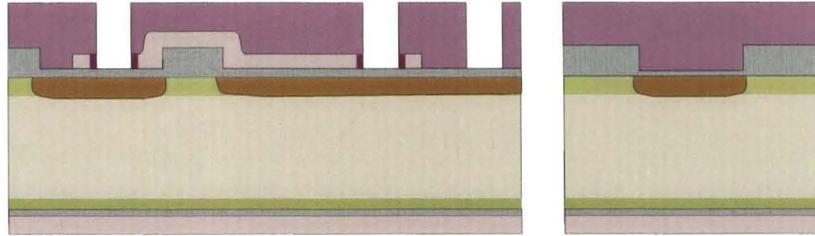
Las implantaciones iónicas amorfizan la red cristalina del silicio, lo que resulta en una degradación de los parámetros del semiconductor, como la vida media de los portadores o la movilidad. Además, parte de los iones implantados no ocupa posiciones sustitucionales. El recocido sirve para recrystalizar la red del silicio y activar los iones haciendo que pasen a ocupar posiciones sustitucionales y a actuar como aceptores o donadores.



29. Fotolito estándar. Máscara RD50-WINDOW.

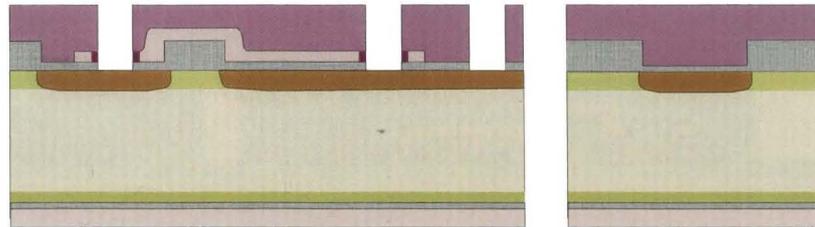
Define los contactos del silicio y el polisilicio con el metal.

6.2. Dispositivos fabricados

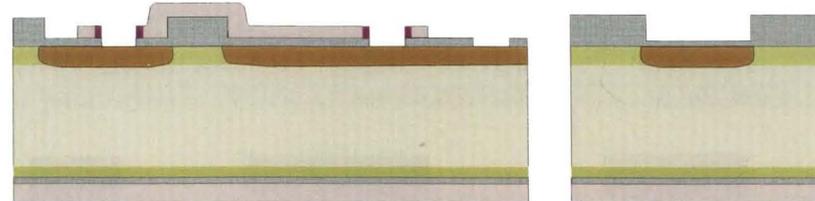


30. Grabado húmedo del óxido.

Se abren los contactos en el anverso de la oblea, y se decapa el óxido que haya podido crecer en el dorso.



31. Decapado de la fotorresina en ácido.



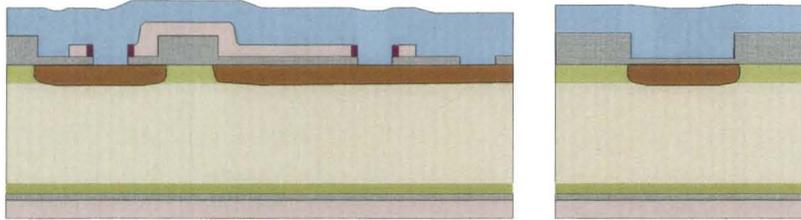
32. Limpieza previa a la metalización.

Este paso se realiza justo antes de la metalización para limpiar la superficie de la oblea de la capa de óxido nativo que puede haber crecido desde la última etapa y que anularía el contacto con el metal. El agente químico en este caso es Super Q[®], desarrollado por Olin Hunt Specialty Products.

Tras esta limpieza, las etapas de metalización se han de realizar sin interrupción para evitar que la superficie de la oblea se oxide de nuevo.

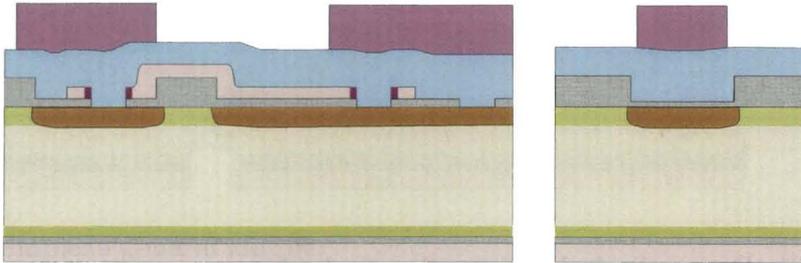
33. Metalización del anverso.

Depósito en el anverso de la oblea de 1.5 μm de Al/0.5%Cu mediante *sputtering*.



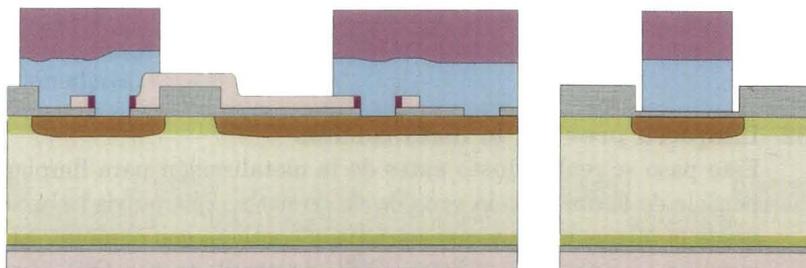
34. Fitolito. Máscara RD50-METAL.

Esta etapa fotolitográfica es diferente de las anteriores ya que se realiza sobre metal en lugar de sobre óxido. El ataque húmedo del metal es muy agresivo, por lo que se depositan $2\ \mu\text{m}$ de fotorresina y se la somete a un recocido para endurecerla antes del grabado.



35. Grabado del aluminio.

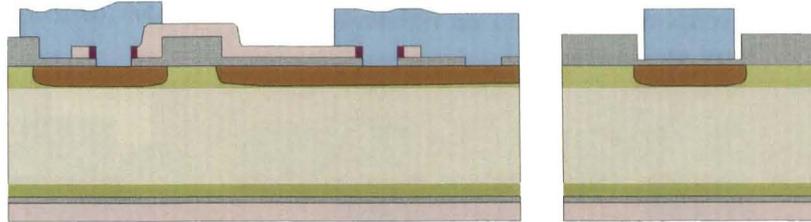
Los agentes químicos en esta etapa son: DAE[®] (Defreckling Aluminium Etch), de Olin Hunt Specialty Products, HNO_3 (70%) y HF (49%).



36. Decapado de resina en disolvente.

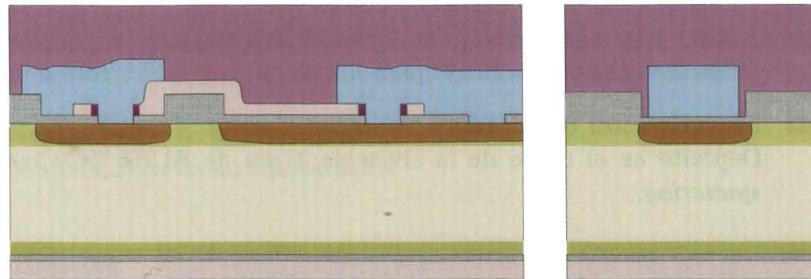
La presencia del metal impide utilizar ácido para el decapado de la resina, por lo que en esta etapa se utiliza acetona en ultrasonidos. Lo habitual es que esta etapa no sea suficiente para eliminar totalmente la resina endurecida, y es necesario completar el grabado mediante un ataque RIE.

6.2. Dispositivos fabricados



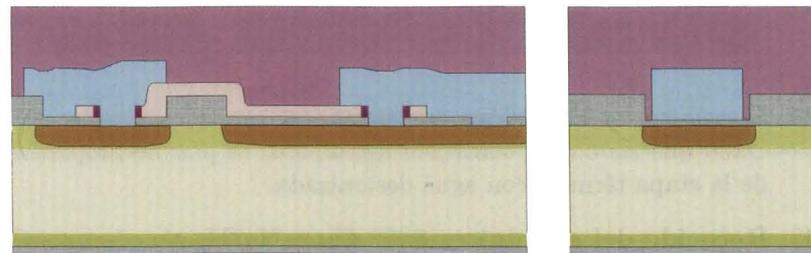
37. Depósito de 1.2 μm de resina.

Protección del anverso con resina ante el grabado del dorso.



38. Grabado de polisilicio del dorso.

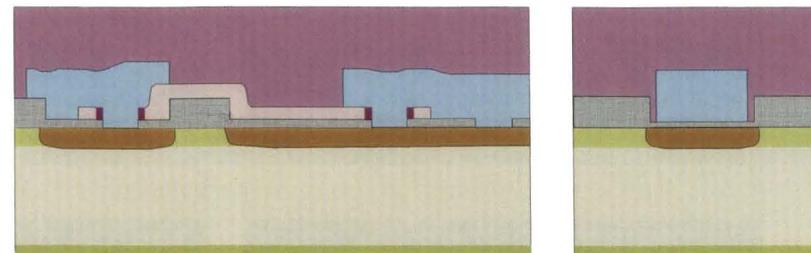
Grabado seco en un equipo RIE.



39. Recocido de la resina.

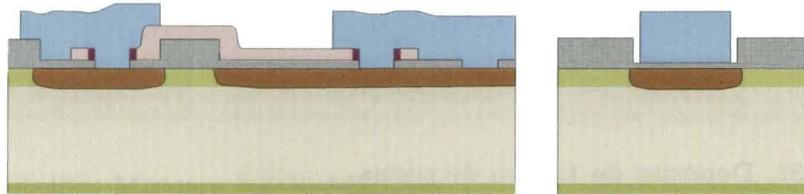
Endurecimiento de la resina frente al grabado húmedo que sigue.

40. Grabado húmedo del óxido.



41. **Decapado de resina en disolvente.**

Igual que la etapa 36.

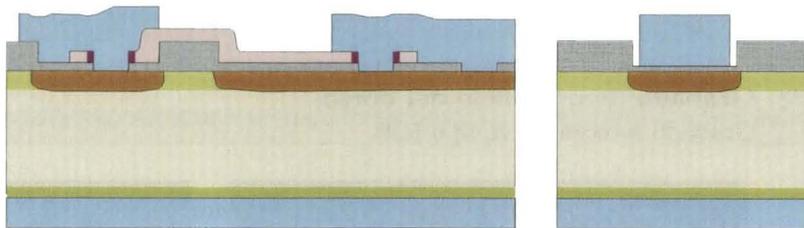


42. **Limpieza (*sputter etching*) del dorso.**

Antes de la metalización del dorso, el haz de iones del *sputtering* se dirige directamente sobre él para limpiarlo de posibles contaminantes.

43. **Metalización del dorso.**

Depósito en el dorso de la oblea de 1 μm de Al/0.5%Cu mediante *sputtering*.



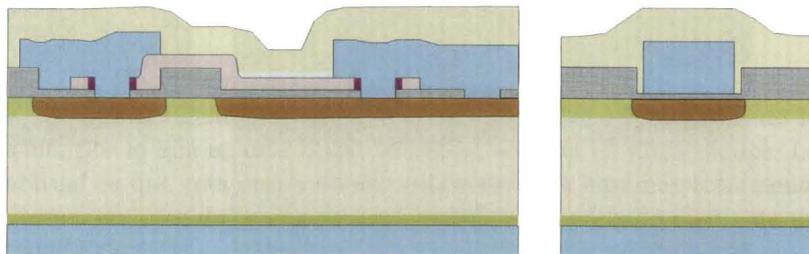
44. **Limpieza de las obleas con agua.**

Dado que las obleas contienen metal, sólo es posible limpiarlas antes de la etapa térmica con agua desionizada.

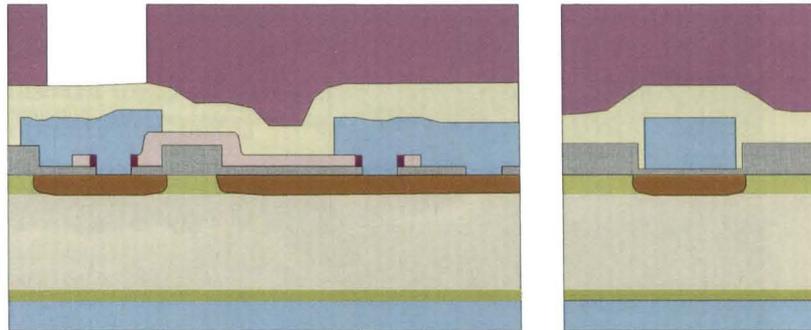
45. **Recocido del aluminio a 350° C en N₂/H₂.**

46. **Depósito de la pasivación.**

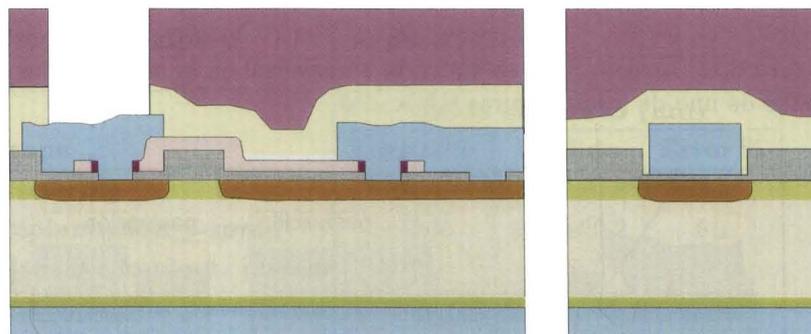
Se depositan por PECVD 400 nm de óxido de silicio, seguidos de 700 nm de nitruro de silicio, para proteger los dispositivos de los agentes ambientales que pudieran degradar su funcionamiento.



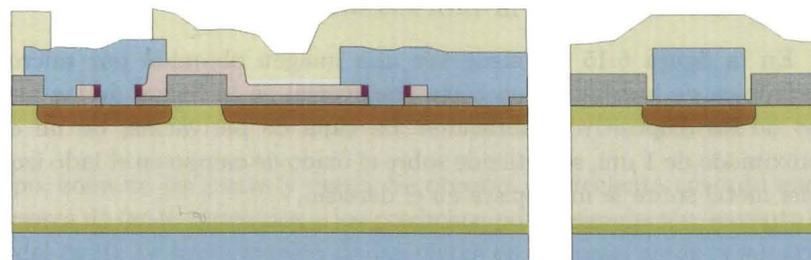
47. Fotolito. Máscara RD50-PASSIV.



48. Grabado de la pasivación.
Grabado seco en un equipo RIE.



49. Decapado de resina en disolvente.
Igual que la etapa 36.



50. Final del run

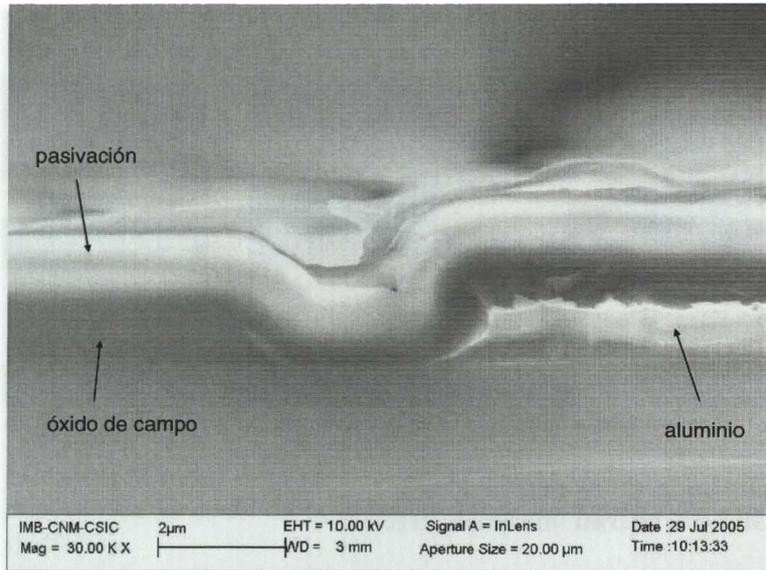
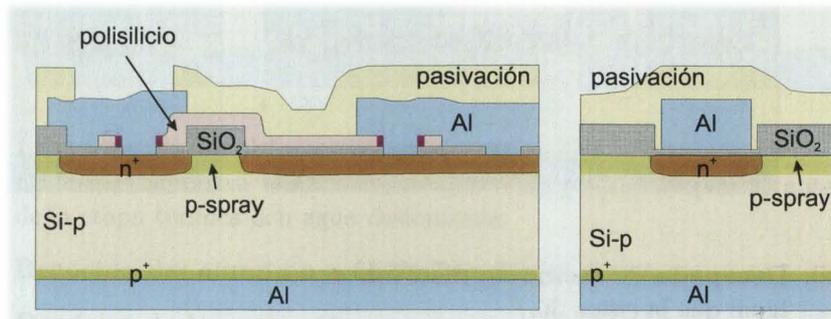


Figura 6.15: Imagen SEM de un corte transversal en la región de las micro-pistas de uno de los detectores fabricados.



6.2.4. Resultado de la fabricación

En la figura 6.15 se puede ver una imagen obtenida por microscopía electrónica de barrido de un corte transversal en la región de las pistas de uno de los dispositivos fabricados. La capa de pasivación, de un espesor aproximado de $1 \mu\text{m}$, se extiende sobre el óxido de campo en el lado izquierdo y del metal sobre la micropista en el derecho.

Espesores de óxido

La tabla 6.3 muestra los espesores de óxido, simulados y medidos por interferometría, que se obtienen después de cada etapa térmica en el óxido

6.2. Dispositivos fabricados

Etapa	Óxido de campo (nm)		
	Simulado	Medido	Error %
<i>Gettering</i>	746.3	730.7±0.8	2.1
Implantación <i>p-spray</i>	149.4	142.2±0.2	5.1
Máscara implant. pistas	825.1	827.9±0.4	0.3
Implantación pistas	832.0	828.6±0.9	0.4
Activación impurezas	835.4	831±3	0.6
Recocido metal	835.4	-	-

Etapa	Óxido sobre las pistas (nm)		
	Simulado	Medido	Error %
<i>Gettering</i>	746.3	730.7±0.8	2.1
Implantación <i>p-spray</i>	149.4	142.2±0.2	5.1
Máscara implant. pistas	825.1	827.9±0.4	0.3
Implantación pistas	40.0	30.5±0.6	31.1
Activación impurezas	89.3	72.1±0.6	23.9
Recocido metal	89.3	-	-

Etapa	Óxido del dorso (nm)		
	Simulado	Medido	Error %
<i>Gettering</i>	746.3	730.7±0.8	2.1
Implantación <i>p-spray</i>	149.4	142.2±0.2	5.1
Máscara implant. pistas	822.1	-	-
Implantación pistas	42.4	-	-
Activación impurezas	60.5	-	-
Recocido metal	0	-	-

Tabla 6.3: Espesores de óxido obtenidos por simulación después de cada etapa térmica y valores reales del proceso de fabricación.

de campo, zona de las pistas y dorso. Se observa el excelente acuerdo entre los espesores de óxido obtenidos y los predichos por la simulación, excepto en el caso del óxido de implantación de las pistas en el que el error es superior al 30 %. No obstante, como se verá en el siguiente apartado, este error no supone una gran diferencia entre el perfil resultante de la implantación y el esperado por simulación.

Capítulo 6. Optimización del aislamiento en N-sobre-P

<i>P-spray</i>	Carga implantada (cm^{-2})		Diferencia
	Simulado	Medido	
45 keV, 10^{12} cm^{-2}	4.1×10^{11}	7.2×10^{10}	-82%
45 keV, $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$	2.0×10^{12}	4.8×10^{11}	-77%
150 keV, 10^{12} cm^{-2}	5.2×10^{11}	2.3×10^{11}	-55%

Tabla 6.4: Carga total implantada por el *p-spray*, simulada y estimada a partir de los perfiles de spreading resistance.

Perfiles de dopantes

Los perfiles de las implantaciones obtenidos en el proceso de fabricación se midieron para determinar si existe una pérdida de carga con respecto a los valores esperados.

El perfil de fósforo de la unión se midió mediante la técnica SIMS en el área activa de un detector tipo *pad*. Los resultados de la medida, junto con el perfil predicho por la simulación, se muestran en la figura 6.16. El acuerdo entre el perfil medido y el simulado es excelente, al menos hasta el límite de detección del SIMS para el fósforo ($\approx 10^{15} \text{ cm}^{-3}$), a pesar del error en la determinación del espesor del óxido de implantación.

El límite de detección del SIMS para el boro, $\approx 5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, es demasiado bajo para obtener la concentración del *p-spray* de los dispositivos. Por ello, el perfil del *p-spray* se midió por la técnica del *spreading resistance*, que es más sensible a bajas concentraciones de boro. En la figura 6.17 se pueden comparar los perfiles obtenidos con la simulación y los medidos. Como se puede ver en la tabla 6.4, la carga implantada en el silicio es hasta un 80% menor que la predicha por la simulación, siendo el acuerdo con los resultados de la simulación mejor en el caso de la energía más alta. Esto puede ser debido a que el simulador sobreestime la capacidad de penetración de los iones implantados a través del óxido con baja energía o a que la medida de *spreading resistance* no es lo suficientemente precisa para concentraciones de dopantes tan bajas. El análisis del comportamiento eléctrico de los detectores ayudará a determinar la efectividad del *p-spray* y el grado de acuerdo con los resultados de la simulación.

Resistencias de polarización de polisilicio

Las especificaciones del SCT de ATLAS para las resistencias de polisilicio, que se usaron como referencia para la fabricación de este lote de detectores, dan como válido el rango $(1.25 \pm 0.75) \text{ M}\Omega$. Los parámetros de la implantación de boro con los que se obtiene esta resistencia se extrajeron a partir de un estudio previo de calibración de la tecnología del IMB-CNM. Los detalles del trabajo se pueden consultar en [5].

6.2. Dispositivos fabricados

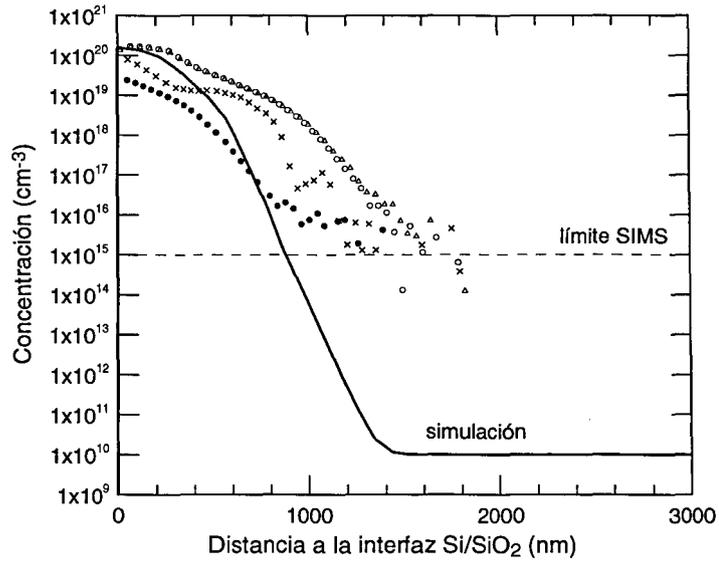


Figura 6.16: Perfil de la implantación de fósforo del diodo simulado (línea continua) y medido (símbolos) en un detector *pad* mediante la técnica SIMS.

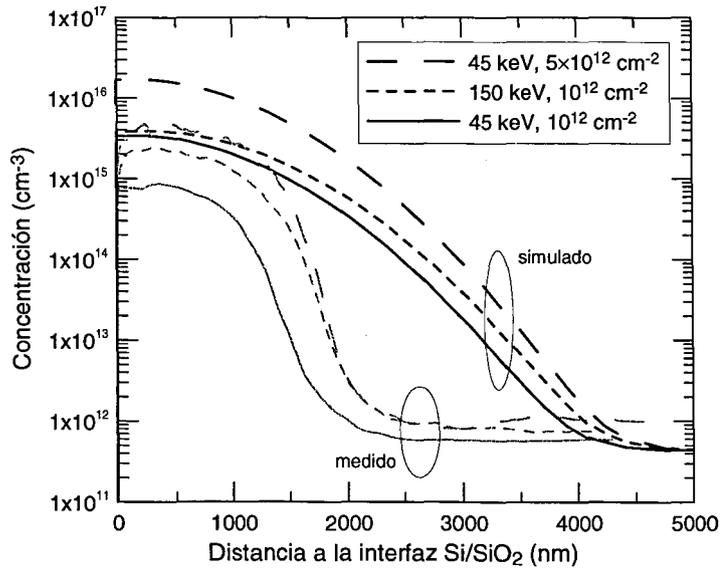


Figura 6.17: Perfiles del *p-spray* simulados y medidos por la técnica del spreading resistance.

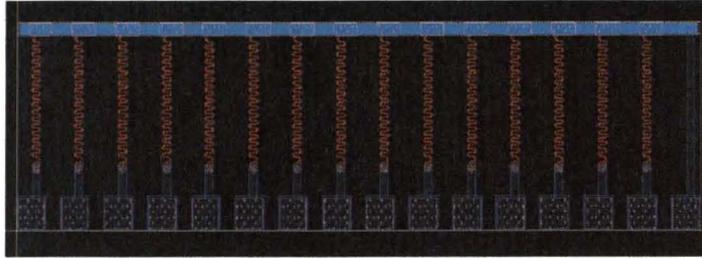


Figura 6.18: Estructura de test utilizada para medir el valor y la homogeneidad de las resistencias de polarización de polisilicio.

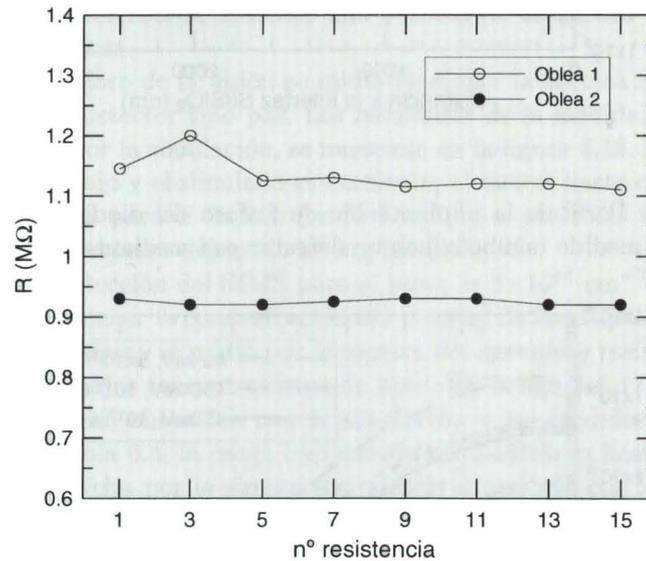


Figura 6.19: Valores de las resistencia de polarización de polisilicio medidas en la estructura de test en dos obleas procesadas.

El valor de la resistencia se midió en una estructura de test diseñada al efecto (figura 6.18) y localizada en el chip de test. Estas resistencias son idénticas a las que sirven para polarizar las pistas en los detectores de micropistas. Se caracterizaron dos obleas diferentes, y se obtuvieron resultados son muy homogéneos y dentro de los límites de SCT, como se observa en la figura 6.19. Los valores promedio son $(0.924 \pm 0.005) \text{ M}\Omega$ (dispersión del 0.5 %) y $(1.13 \pm 0.03) \text{ M}\Omega$ (3 %).