

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

6.2. Dispositivos fabricados

Cargas en el óxido

Con objeto de probar la efectividad del aislamiento los detectores fueron irradiados con rayos gamma procedentes de una fuente de ^{60}Co hasta una dosis de 50 Mrad.

Para estimar la densidad de carga en el óxido antes y después de la irradiación se fabricaron capacidades MOS de estructura Al/SiO₂/Si. Estos dispositivos formaban parte del chip de test de unas obleas que se procesaron en paralelo a las de los detectores, con la misma carga térmica. Por motivos de disponibilidad sólo se usaron obleas de silicio N. Suponemos que el valor de Q_{ox} en el silicio P será semejante, pero no hemos tenido la oportunidad de comprobarlo directamente.

El grosor de las obleas utilizadas para la fabricación de las capacidades MOS es 300 μm y el substrato está dopado con fósforo con un dopaje efectivo $N_{eff} = 6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$. El espesor del óxido de las capacidades es igual que el del óxido de campo de los detectores, $t_{ox} \approx 800 \text{ nm}$. El área efectiva de la capacidad está definida por la puerta de Al/Cu con 1.5 μm de espesor. El dorso está metalizado con 1 μm de Al/Cu.

La estimación de la densidad de carga en el óxido antes de la irradiación se hizo comparando las características C-V de las capacidades MOS con las curvas obtenidas por simulación de las mismas estructuras, usando Q_{ox} como parámetro. Las medidas se hicieron con un HP4192, con una señal alterna de amplitud 50 mV y frecuencia 10 kHz. Para la simulación se utilizó el paquete ISE-TCAD, encontrándose que la curva simulada que mejor encaja con las experimentales es la que se obtiene con $Q_{ox,0} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$.

El atrapamiento de cargas positivas en el óxido generadas por la radiación ionizante produce un cambio en la tensión de bandas planas de la capacidad MOS que se refleja en un desplazamiento de las curvas C-V y G-V sobre el eje de tensiones hacia valores negativos [50]. La densidad de carga inducida, ΔQ_{ox} , se puede evaluar mediante la expresión 6.6:

$$\Delta Q_{ox} = C_{ox} \cdot \Delta V_{FB}/q \quad (6.6)$$

donde q es la carga del electrón, ΔV_{FB} el desplazamiento de la tensión de bandas planas y $C_{ox} = \epsilon_{ox}/t_{ox}$ la capacidad del óxido por unidad de área.

En la figura 6.20 se puede observar el desplazamiento entre las características C-V de las capacidades sin irradiar e irradiadas. El valor de ΔV_{FB} , medido entre los picos de conductancia, es $\Delta V_{FB} = 75 \text{ V}$, que según la ecuación (6.6) equivale a un incremento de carga $\Delta Q_{ox} = 1.9 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. El valor de la densidad de carga en el óxido irradiado hasta la saturación es por tanto $Q_{ox,sat} = Q_{ox,0} + \Delta Q_{ox} = 2.1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$.

El valor de Q_{ox} obtenido en el óxido sin irradiar coincide con el que se utilizó en las simulaciones de los detectores no irradiados. Sin embargo, en el caso del óxido irradiado hasta la saturación el valor real de Q_{ox} es el doble del supuesto. En consecuencia, los resultados de la simulación en

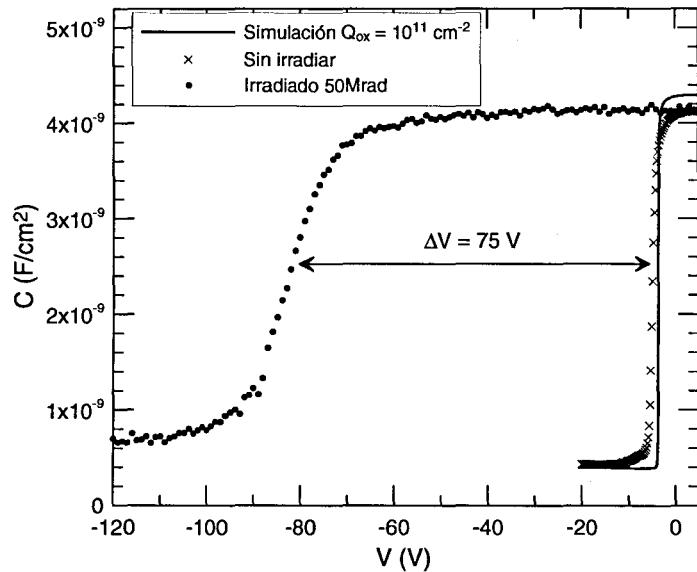


Figura 6.20: Características C-V de las capacidades MOS antes y después de la irradiación a 50 Mrad y curva simulada para el dispositivo sin irradiar.

cuanto al aislamiento entre pistas en detectores irradiados son demasiado optimistas y son necesarias dosis de *p-spray* aún más elevadas para conseguir un aislamiento correcto.

6.3. Caracterización eléctrica

6.3.1. Caracterización de los dispositivos sin irradiar

Tensión de vaciamiento completo

La tensión de vaciamiento completo se extrajo a partir las características C-V de los detectores tipo *pad* tal como se explica en §3.2.2. El resultado, promediado sobre todas las obleas fabricadas, es $V_{FD} = 41 \pm 3$ V. Este valor, para detectores de $300 \mu\text{m}$ de espesor, corresponde a un dopaje efectivo con boro $N_{eff} = (5.9 \pm 0.4) \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, y a una resistividad $\rho = (22 \pm 2) \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$, que concuerda con el valor obtenido con la medida de cuatro puntas.

Tensión de ruptura y niveles de corriente

La dependencia de la tensión de ruptura de los dispositivos, V_{BD} , con la carga del *p-spray* se ve claramente en la figura 6.21, que muestra las características corriente-tensión de los detectores tipo *pad* sin irradiar fabricados

6.3. Caracterización eléctrica

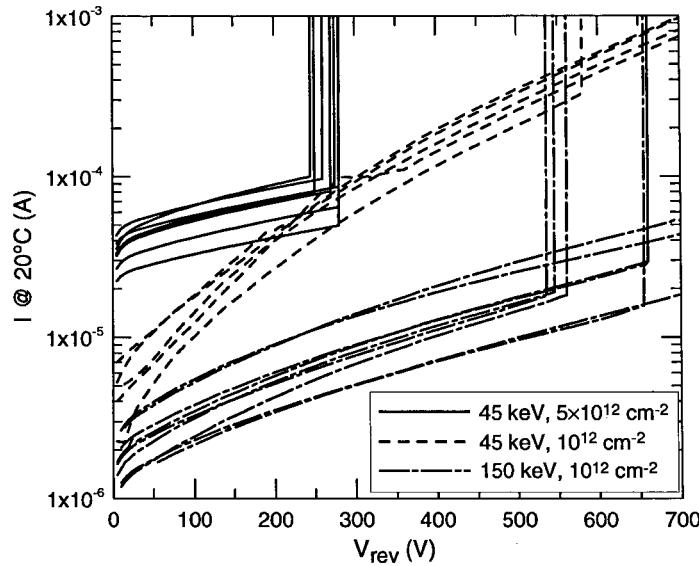


Figura 6.21: Características I-V del diodo central en detectores *pad* N-sobre-P sin irradiar con varias implantaciones de *p-spray*.

<i>P-spray</i>	V_{BD} (V)	
	Simulada	Medida
45 keV, 10^{12} cm^{-2}	910	> 700
45 keV, $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$	129	≈ 250
150 keV, 10^{12} cm^{-2}	711	≈ 700

Tabla 6.5: Tensión de ruptura simulada y medida en los detectores tipo *pad* N-sobre-P con los distintos *p-sprays* sin irradiar.

con las tres implantaciones diferentes. Las medidas se hicieron hasta una tensión inversa máxima de 700 V y polarizando simultáneamente el anillo de guarda. Los valores de corriente están corregidos a 20° C según la ecuación (3.7). En concordancia con los resultados de la simulación, la tensión de ruptura de los detectores *pad* depende de su implantación de *p-spray*: a mayor dosis implantada, V_{BD} es menor. En la tabla se 6.5 comparan las tensiones de ruptura simuladas y medidas. El acuerdo entre los resultados es excelente, aunque los valores medidos son algo superiores a los simulados, quizás porque las dosis de *p-spray* implantadas realmente sean algo más bajas que las supuestas en la simulación.

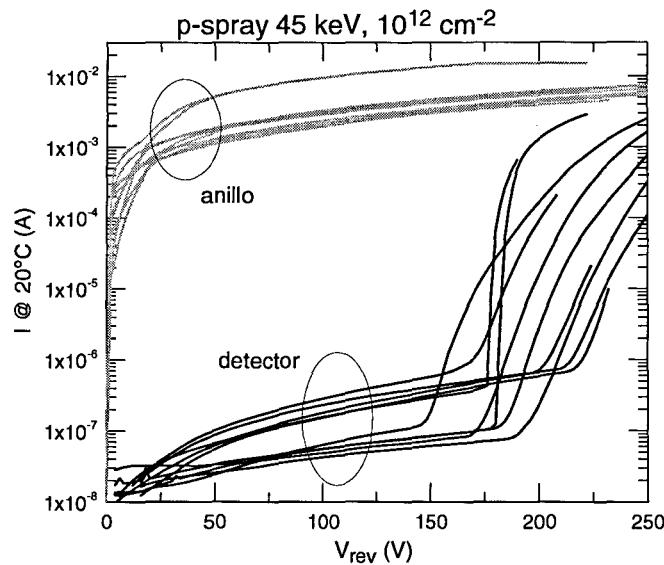


Figura 6.22: Características I-V del diodo central y el anillo de guarda en detectores de micropistas N-sobre-P sin irradiar con una implantación *p-spray* de energía 45 keV y dosis 10^{12} cm^{-2} .

<i>P-spray</i>	I en $V_{FD}+20$ V	
	Detector	Anillo
45 keV, 10^{12} cm^{-2}	$50 \pm 30 \text{ nA}$	$2 \pm 1 \text{ mA}$
45 keV, $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$	$1.4 \pm 1.1 \mu\text{A}$	$306 \pm 26 \text{ nA}$
150 keV, 10^{12} cm^{-2}	$90 \pm 38 \text{ nA}$	$156 \pm 42 \mu\text{A}$

Tabla 6.6: Corriente de fugas promedio medida en los detectores de micropistas N-sobre-P en $V_{FD}+20$ V y corregida a 20°C .

6.3. Caracterización eléctrica

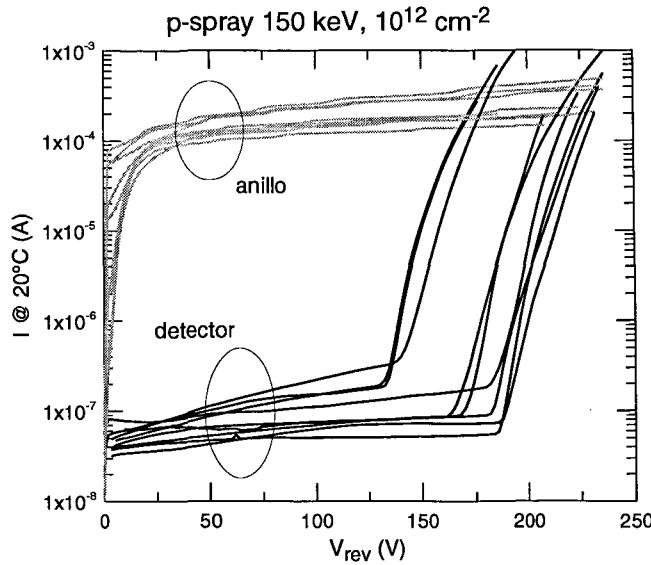


Figura 6.23: Características I-V del diodo central y el anillo de guarda en detectores de micropistas N-sobre-P sin irradiar con una implantación *p-spray* de energía 150 keV y dosis 10^{12} cm^{-2} .

El comportamiento de los detectores de micropistas es diferente al de los pads. Como se ve en las figuras 6.22 a 6.24 la tensión de ruptura de los detectores de micropistas está entre 100 y 200 V para todas las obleas, independientemente del *p-spray* implantado. Claramente, existen factores geométricos en los detectores de micropistas responsables de la presencia de campos eléctricos elevados en puntos determinados de la estructura que provocan la ruptura temprana de los dispositivos. Estos puntos pueden estar por ejemplo en los bordes de las implantaciones, que no están incluidos en la simulación.

La corriente de fugas promedio en $V_{FD}+20$ V medida en el diodo central y el anillo de guarda de los detectores de micropistas se muestra en la tabla 6.6. La corriente de fugas evacuada por el anillo de guarda de los detectores con dosis de *p-spray* de 10^{12} cm^{-2} y ambas energías de implantación es muy elevada y varios órdenes de magnitud mayor que la del diodo central, lo que indica que el aislamiento de la superficie no es perfecto y existe un canal conductor que une el anillo con el dorso por el borde de la oblea. La caracterización se hizo sobre los dispositivos en las obleas sin cortar, y es de esperar que esta corriente disminuya al cortar los dispositivos. Además, este comportamiento no es suficiente para deducir que la implantación de *p-spray* no es suficiente para proporcionar un aislamiento suficiente entre las

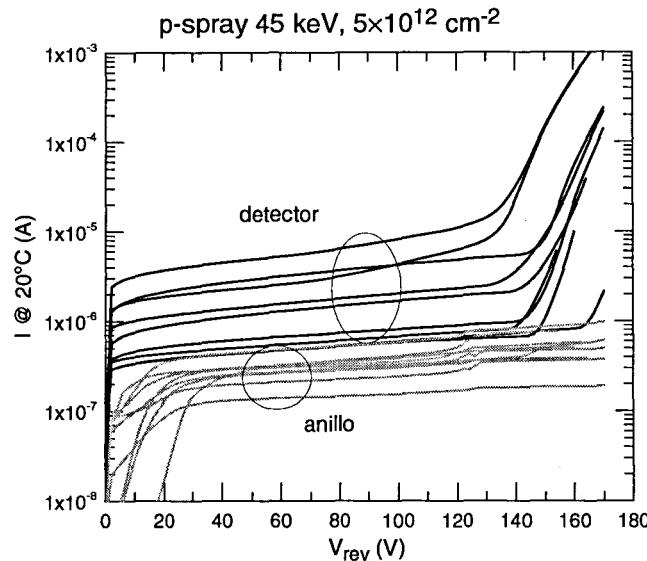


Figura 6.24: Características I-V del diodo central y el anillo de guarda en detectores de micropistas N-sobre-P sin irradiar con una implantación *p-spray* de energía 45 keV y dosis $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$.

micropistas; el análisis de la efectividad del *p-spray* sobre la resistencia entre dos pistas consecutivas se presentará en la sección §6.3.2.

En cuanto a los detectores fabricados con una dosis de *p-spray* de $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, la corriente de fugas evacuada por el anillo de guarda es mucho menor que la del diodo central, lo que parece indicar que esta implantación sí es capaz de garantizar un aislamiento completo de la superficie del silicio entre las pistas en los dispositivos sin irradiar.

Estabilidad de la corriente con el tiempo

La figura 6.25 muestra la evolución de la corriente en inversa con el tiempo de los detectores de micropistas fabricados con cada una de las implantaciones, tanto en el diodo central como en el anillo de guarda. La tensión de polarización es $V_{rev} = 65 \text{ V}$, suficiente para que los dispositivos se encuentren en vaciamiento completo, y las medidas fueron hechas a temperatura ambiente. En todos los casos la corriente inversa de los detectores presenta una gran estabilidad, y sólo la corriente evacuada por los anillos de guarda aumenta ligeramente con el tiempo, lo que prueba que estas estructuras cumplen perfectamente con su cometido.

El aumento de la corriente de fugas del anillo de guarda es mayor en los

6.3. Caracterización eléctrica

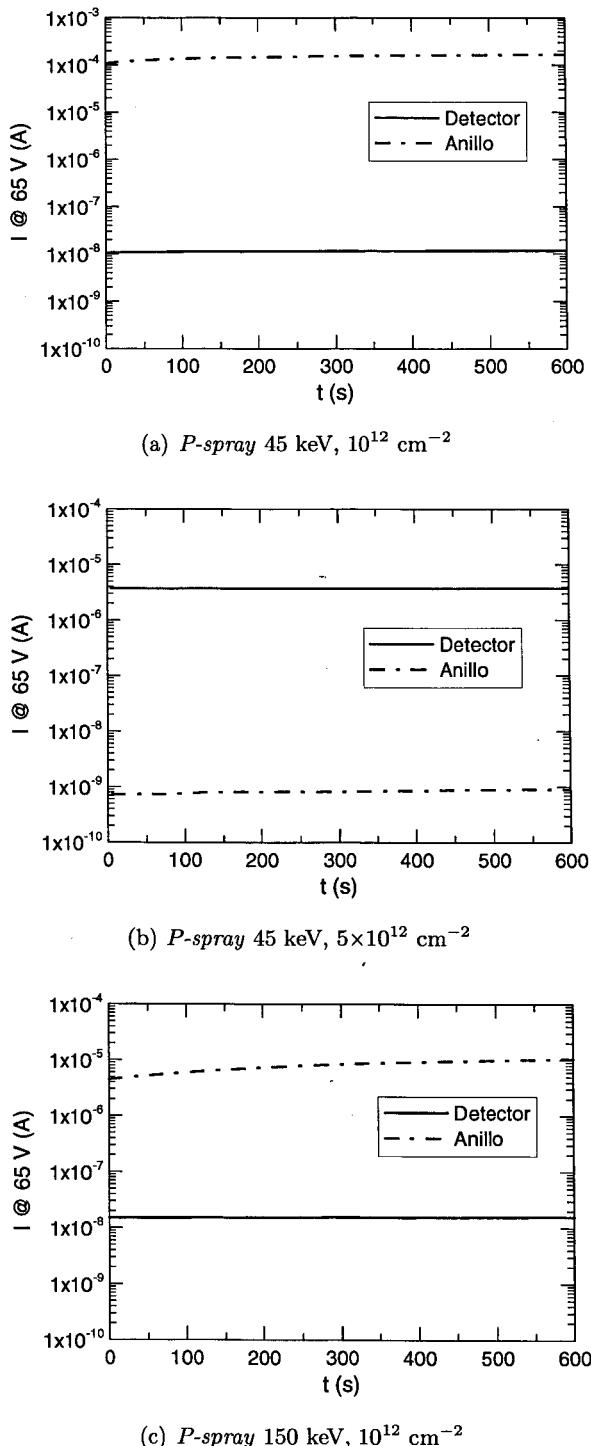


Figura 6.25: Medida de la corriente inversa en función del tiempo en detectores de micropistas N-sobre-P. La tensión de polarización es $V_{rev} = 65 \text{ V}$.

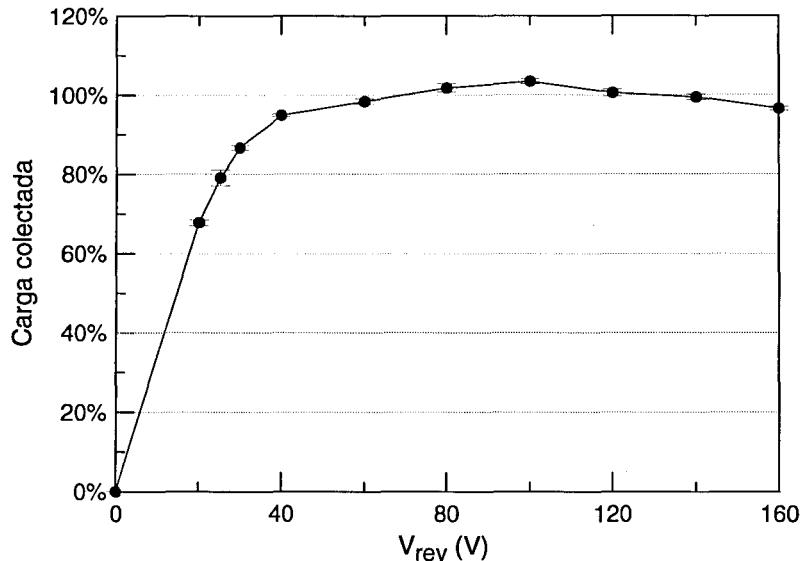


Figura 6.26: Curva de eficiencia de colección de carga con láser de IR de un detector de micropistas N-sobre-P con una implantación *p-spray* de energía 45 keV y dosis 10^{12} cm^{-2} .

dispositivos en los que el valor absoluto de la corriente es mayor, es decir, en los que tienen dosis más bajas de *p-spray*, y se debe al calentamiento del silicio por efecto Joule. Este fenómeno supone un problema para el funcionamiento a largo plazo de los detectores ya que el calor disipado produce un incremento en la corriente de fugas, que a su vez hace que la temperatura siga aumentando. El efecto se conoce como inestabilidad térmica y eventualmente puede llegar a destruir el dispositivo. Para minorar el problema es necesario optimizar el diseño térmico de las estructuras, procurar una buena refrigeración de los detectores en funcionamiento y limitar los niveles de corriente.

Eficiencia de colección de carga

La eficiencia de colección de carga de un detector es un parámetro clave para su comportamiento y junto con la corriente de fugas determina la relación señal/ruido.

Las medidas de eficiencia de colección de carga de los detectores de micropistas N-sobre-P fabricados se obtuvieron en las instalaciones del Instituto de Física Corpuscular de Valencia. Las medidas se hicieron a una temperatura controlada de 20°C y sin polarizar el anillo de guarda. Un láser de infrarrojo

6.3. Caracterización eléctrica

se utilizó para generar la señal y se cortocircuitaron todas las micropistas de los detectores de manera que la carga medida es la recogida en todas las pistas a la vez. Los valores de la eficiencia se calcularon normalizando la carga colectada en el detector con el valor de saturación que se da cuando el volumen de detección es máximo, es decir, en vaciamiento completo.

La curva de CCE en función del voltaje, para un detector con una dosis de *p-spray* de 10^{12} cm^{-2} , se puede ver en la figura 6.26. La colección de carga alcanza la saturación a una tensión de polarización de unos 40 V, lo que indica que el detector ha alcanzado el vaciamiento completo, en concordancia con los resultados de las medidas C-V. A tensiones más bajas que V_{FD} la carga colectada es proporcional a la raíz cuadrada del voltaje de polarización, como indica la ecuación (3.13).

6.3.2. Estudio de la efectividad del *p-spray*

Para comprobar la capacidad del *p-spray* de proporcionar un buen aislamiento entre las micropistas, detectores y estructuras de test tipo peine fueron irradiados con rayos gamma procedentes de una fuente de ^{60}Co hasta una dosis de 50 Mrad (500 kGy), similar a la dosis total prevista en la región de ATLAS en sLHC [12]. Las irradiaciones se llevaron a cabo en la unidad NAYADE del CIEMAT.

La dosis de 50 Mrad asegura que el óxido de los detectores y estructuras de test irradiados esté saturado de cargas positivas. La acumulación de carga positiva en el SiO_2 se produce muy rápidamente, y la densidad de carga alcanza su valor de saturación, $2\text{--}3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, con una dosis ionizante de pocos kGy [35], que equivale a unas pocas semanas de funcionamiento de sLHC en la región ATLAS. En consecuencia, la carga en el óxido de los detectores en los experimentos habrá alcanzado su valor de saturación mucho antes de que el substrato de silicio comience a manifestar los efectos del daño por radiación.

La resistencia entre pistas antes y después de la irradiación se midió en estructuras peine de tipo N-sobre-P fabricadas con un *p-spray* de 45 keV y 10^{12} cm^{-2} . También se caracterizaron dispositivos P-sobre-N sin irradiar como referencia, ya que esta tecnología no necesita aislamiento. El diseño de estas estructuras de test se muestra en la figura 6.14.

La caracterización se hizo en la oscuridad y a una temperatura ambiente cercana a los 18° C, con un HP4155B Semiconductor Parameter Analyzer. La medida de la resistencia entre pistas con una tensión aplicada en el substrato es extremadamente difícil, ya que implica medir pequeñas variaciones de corriente sobre la corriente de fugas en las pistas, que es mucho más alta. En su lugar, se aplicó una rampa de tensión entre los pads de contacto sin polarizar el dorso y se midió la corriente entre las pistas. Son unas condiciones más desfavorables que las condiciones reales de trabajo de los detectores, y el valor de la resistencia entre pistas en detectores vaciados será más bajo

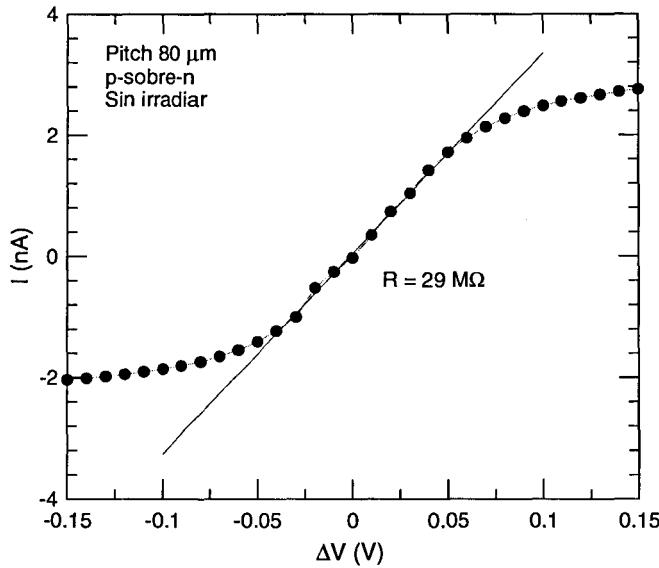


Figura 6.27: Medida de la resistencia entre dos micropistas consecutivas de una estructura tipo peine de $80 \mu\text{m}$ de *pitch*, P-sobre-N, sin irradiar.

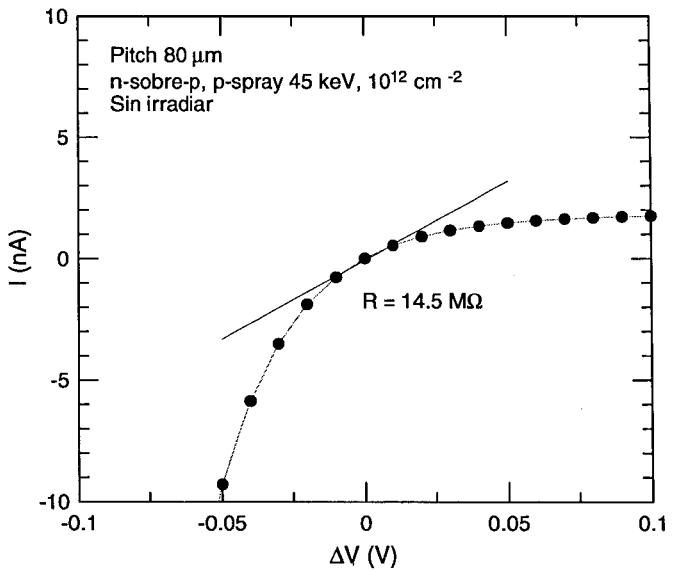
que el medido con esta técnica.

Las figuras 6.27 y 6.28(a) muestran el resultado de la medida para los dispositivos P-sobre-N y N-sobre-P sin irradiar de $80 \mu\text{m}$ de *pitch*. Las curvas no muestran un comportamiento óhmico pero se puede definir la resistencia entre pistas como la inversa de la pendiente de la curva en el origen [113]. En cambio, en los dispositivos N-sobre-P irradiados la característica I-V medida entre dos pistas consecutivas es puramente resistiva, como se puede ver en la figura 6.28(b).

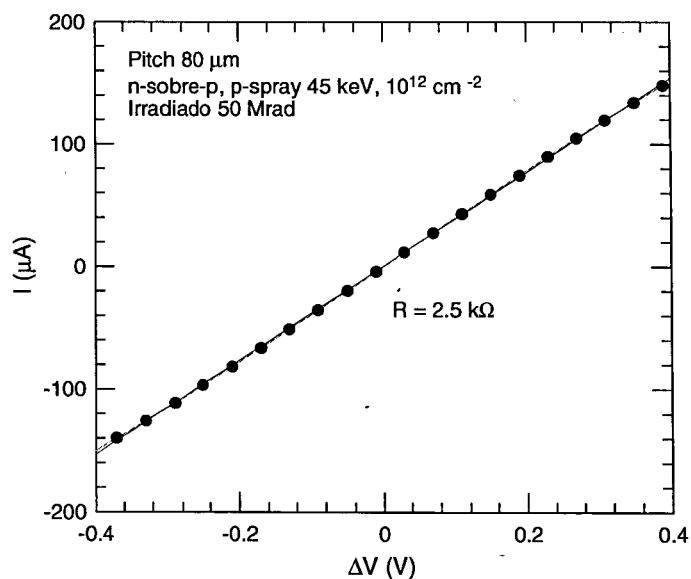
En la tabla 6.7 y la figura 6.29 se muestran los valores obtenidos para cada una de las estructuras caracterizadas, normalizados para pistas de longitud $10472 \mu\text{m}$, la misma que tienen los detectores completos. La resistencia entre pistas mínima necesaria es dos veces el valor de las resistencias de polarización de polisilicio que están en paralelo con las micropistas, aproximadamente $2 \text{ M}\Omega$. Claramente el aislamiento es adecuado en los detectores N-sobre-P sin irradiar, ya que la resistencia es del orden de $80 \text{ M}\Omega$, aproximadamente la mitad que la de los P-sobre-N. Sin embargo, la calidad del aislamiento no es aceptable en los detectores N-sobre-P irradiados, con una resistencia entre pistas de unos pocos $\text{k}\Omega$.

Podemos concluir que una implantación de *p-spray* de energía 45 keV y dosis 10^{12} cm^{-2} proporciona un aislamiento adecuado de la superficie del silicio en los detectores N-sobre-P sin irradiar, de acuerdo con los resultados

6.3. Caracterización eléctrica



(a) No irradiado



(b) Irradiado a 50 Mrad

Figura 6.28: Medida de la resistencia entre dos micropistas consecutivas de una estructura tipo peine de 80 μm de *pitch*, N-sobre-P, con aislamiento p-spray de energía 45 keV y dosis 10^{12} cm^{-2} .

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

Pitch (μm)	Sin irradiar		Irradiados 50 Mrad
	R ($M\Omega$)	N-sobre-P	R ($k\Omega$)
P-sobre-N		N-sobre-P	
50	68.2 \pm 0.3	58 \pm 1	5.87 \pm 0.03
80	171 \pm 7	86.2 \pm 0.1	15.02 \pm 0.01
100	197 \pm 6	91.4 \pm 0.1	19.34 \pm 0.02

Tabla 6.7: Resistencia entre pistas en las estructuras de test, normalizada para pistas de longitud $10472 \mu\text{m}$. La implantación *p-spray* de los dispositivos N-sobre-P es de energía 45 keV y dosis 10^{12} cm^{-2} .

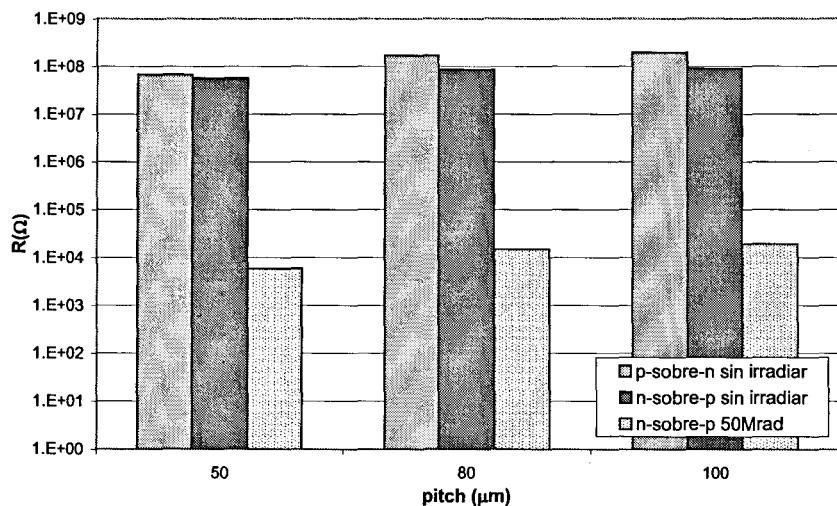


Figura 6.29: Resistencia entre pistas en las estructuras de test, normalizada para pistas de longitud $10472 \mu\text{m}$. La implantación *p-spray* de los dispositivos N-sobre-P es de energía 45 keV y dosis 10^{12} cm^{-2} .

de la simulación eléctrica y a pesar de que la dosis total implantada es más baja que la supuesta en la simulación y la carga en el óxido mayor. Sin embargo, en el caso de los detectores irradiados es claramente insuficiente.

Desgraciadamente, no se fabricaron estructuras de test para medir directamente la resistencia entre pistas en los detectores fabricados con la dosis más alta de *p-spray*, $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, pero un análisis del cambio en sus características corriente-tensión tras recibir una dosis de radiación ionizante de 50 Mrad puede servir para evaluar la efectividad del aislamiento. En la figura 6.30 se pueden ver las curvas I-V del diodo central y el anillo de guarda de un detector de micropistas antes y después la irradiación. Como era de esperar,

6.4. *P-spray* moderado

el efecto de la radiación se refleja en un aumento de la corriente de fugas en el anillo de guarda debido al aumento de la concentración de electrones en la superficie del silicio. Sin embargo, la corriente del detector no cambia, lo que indica que el anillo de guarda es suficiente para evacuar el incremento de corriente y que tras la irradiación el aislamiento todavía es correcto. Es más, la relación de corrientes anillo/detector es similar a la de los dispositivos fabricados con una dosis de *p-spray* de 10^{12} cm^{-2} sin irradiar (fig. 6.22), cuya resistencia entre pistas es superior a $86 \text{ M}\Omega$. En conclusión, el perfil de *p-spray* conseguido con una implantación de boro de energía 45 keV y dosis $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ sí es capaz de proporcionar un aislamiento adecuado de la superficie incluso en detectores irradiados hasta la saturación del óxido. Como se ve en la figura 6.17, la concentración de boro en la superficie del silicio es aproximadamente $4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

Finalmente, es interesante notar que aunque la corriente inversa del diodo central no cambia tras la irradiación, la tensión de ruptura aumenta considerablemente. Este comportamiento se debe a que los electrones inducidos por las cargas en el óxido compensan el *p-spray* y disminuyen el valor del campo eléctrico en los bordes de las micropistas con respecto al dispositivo sin irradiar, para iguales condiciones de polarización. Por tanto, es suficiente con asegurar una tensión de ruptura adecuada en los detectores sin irradiar, ya que tras la irradiación V_{BD} deja de ser un problema.

6.4. *P-spray* moderado

Hemos visto en la sección anterior que el aislamiento de los detectores mediante *p-spray* presenta muchas dificultades tecnológicas debido a la necesidad de calibrar con precisión la implantación, ya que la calidad del aislamiento es inversamente proporcional a la tensión de ruptura del detector. Esto es especialmente importante en el caso de substratos de baja resistividad como el silicio Czochralski, en los que la tensión de vaciamiento completo es elevada, por lo que no se pueden usar dosis altas de *p-spray* y habría que conformarse con un aislamiento incompleto de las pistas. El problema se soluciona utilizando *p-stops*, que como se mostró en el capítulo 5 son capaces de bloquear completamente la capa de inversión de electrones entre las micropistas incluso tras irradiaciones severas manteniendo tensiones de ruptura superiores al voltaje de operación.

Un inconveniente de los *p-stops* es que requieren un nivel de máscara adicional y encarecen la fabricación. Otro, más importante, son las microdescargas que se producen regiones de campo eléctrico elevado del borde de los *p-stops* y que aumentan el ruido electrónico [111, 112].

El *p-spray* moderado [116] se ha propuesto como alternativa tecnológica al *p-stop* o al *p-spray* solos y consiste en una combinación de los dos. Los *p-stops* garantizan un aislamiento completo de las micropistas, a la vez

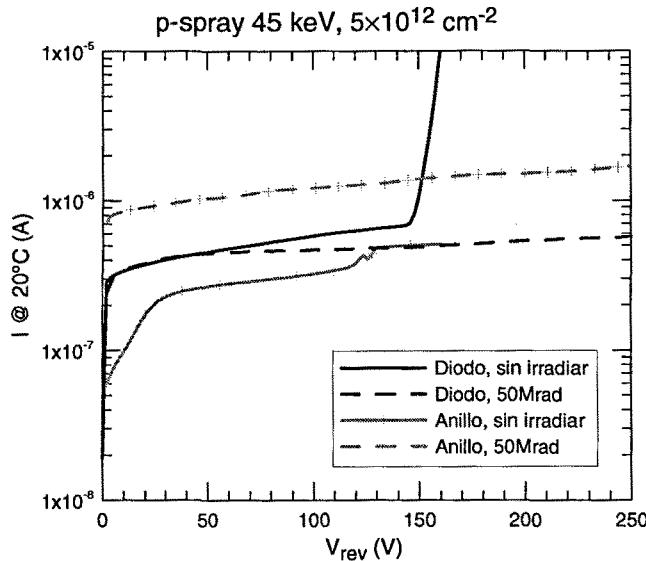


Figura 6.30: Características I-V de un detector de micropistas con un *p-spray* de energía 45 keV y dosis $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ antes y después de la irradiación a 50 Mrad.

que un *p-spray* ligero disminuye el campo eléctrico en los bordes del *p-stop* reduciendo las probabilidades de microdescargas.

La propuesta original para la obtención del *p-spray* moderado [116] es tecnológicamente compleja y necesita optimización. En esta sección se presenta un trabajo de simulación destinado a simplificar y adaptar al equipamiento de la sala blanca del IMB-CNM el proceso de fabricación para el caso de un detector de micropistas N-sobre-P. Además, se ha buscado el perfil óptimo de la implantación para disminuir la probabilidad de microdescargas en los dispositivos manteniendo una tensión de ruptura razonable y un buen aislamiento de la superficie del silicio.

Como en el estudio de optimización del aislamiento por *p-spray*, todas las simulaciones se hicieron con el paquete ISE-TCAD 9.0.

6.4.1. Parámetros de la simulación

La estructura simulada es una sección de un detector de micropistas N-sobre-P idéntica a la que se usó en el trabajo de optimización del *p-spray* y que se describe en §6.1.1. La anchura de las pistas es 32 μm y el *pitch* 80 μm . En este caso el dispositivo incluye un único *p-stop* entre las micropistas de anchura 10 μm .

6.4. *P-spray* moderado

Las características del substrato simulado son también las mismas que las del trabajo anterior: orientación $<100>$ y resistividad $\rho = 30 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$, que corresponde a un dopaje con boro $N_{eff} = 4.3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$. La simulación eléctrica se hizo únicamente para el caso no irradiado, es decir, suponiendo una densidad de cargas en el óxido $Q_{ox} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$.

El perfil del *p-spray* moderado se consigue haciendo una única implantación de boro a través de dos espesores diferentes de óxido de silicio, como se ve en el esquema de la figura 6.31: la región del *p-spray*, con una densidad de carga implantada baja, resulta de implantar a través de un óxido más grueso que el de la implantación del *p-stop*.

La energía y dosis de la implantación se fijaron inicialmente gracias a la experiencia previa del IMB-CNM en la fabricación de detectores de micropistas con *p-stops*. Como se puede ver en el capítulo 5 y en [5], con un *p-stop* fabricado con una implantación de boro de energía 50 keV y dosis 10^{13} cm^{-2} a través de un óxido de 36.5 nm, se consigue un buen aislamiento de la superficie del silicio y un comportamiento eléctrico satisfactorio incluso en detectores irradiados¹. También se ha comprobado que dosis de $3.2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ y 10^{14} cm^{-2} no funcionan tan bien. Por tanto, fijados la energía y la dosis de implantación y el espesor del óxido delgado con el que se implanta el *p-stop*, el objetivo del trabajo de simulación es encontrar el espesor de óxido grueso con el que se consigue el perfil óptimo en la región del *p-spray*.

El proceso de fabricación simulado para conseguir el *p-spray* moderado es una modificación del que se utiliza para los detectores con sólo *p-spray* fabricados en el IMB-CNM y que se detalla en §6.1.1. El proceso comienza con una oxidación seca de tiempo variable a 1050° C para obtener el óxido de implantación de la región del *p-spray*. El tiempo de oxidación determina el espesor del óxido. Seguidamente se hace una etapa fotolitográfica en la que toda la superficie del silicio, excepto la zona del *p-stop*, se cubre con resina. Se lleva a cabo el grabado parcial del óxido en húmedo, deteniéndolo cuando quedan 36.5 nm, y se quita la resina. Tras esta etapa hay dos espesores de óxido diferentes: en la región del *p-stop* hay 36.5 nm, pero sobre el resto del silicio se extiende el óxido inicial que no ha sido afectado por el grabado. Seguidamente se lleva a cabo la implantación del *p-spray* moderado con una dosis de 10^{13} cm^{-2} de átomos de boro con energía 50 keV, y se continúa con el proceso de fabricación habitual.

La forma anterior de conseguir los dos espesores de óxido simulados se ha elegido por su simplicidad. A la hora de fabricar los dispositivos en la sala blanca se obtiene una mayor precisión en el óxido del *p-stop* si se hace el grabado hasta la superficie del silicio y se añade otra etapa de oxidación para conseguir los 36.5 nm. Esto no invalida las conclusiones del trabajo de

¹En el capítulo 5 se han estudiado detectores tipo *pad*, en los que el *p-stop* es muy ancho, ya que mide $80 \mu\text{m}$ de anchura. Sin embargo, en [5] se estudió el comportamiento de los detectores de micropistas de las mismas obleas, que tienen un doble *p-stop* de tan solo $7 \mu\text{m}$ de ancho, comprobándose que es suficiente para aislar correctamente las pistas.

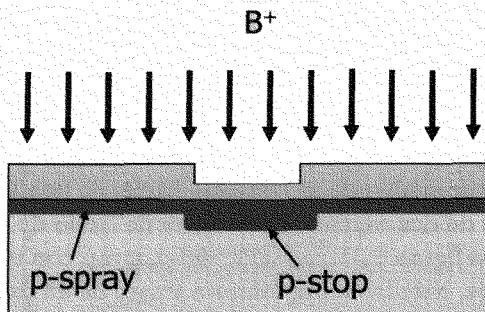


Figura 6.31: Método de implantación del *p-spray* moderado.

tiempo (min)	t_{ox} (nm)
180	192
300	260
340	280
400	307

Tabla 6.8: Tiempos de oxidación y espesor del óxido de implantación del *p-spray* obtenidos por simulación.

simulación, aunque habría que recalibrar el tiempo de crecimiento del óxido inicial para conseguir el espesor deseado en la región del *p-spray* tras las dos oxidaciones consecutivas.

6.4.2. Resultados de la simulación

La tabla 6.8 muestra los espesores de óxido (t_{ox}) conseguidos tras una implantación seca a 1050° C con diferentes tiempos de oxidación, según el simulador tecnológico DIOS-ISE. A través de estos óxidos se lleva a cabo la implantación del *p-spray*. El óxido de implantación del *p-stop* es siempre 36.5 nm.

El resultado del proceso de fabricación simulado es un perfil de *p-spray* moderado. En la figura 6.32 se muestra la distribución de aceptores en el dispositivo final en función del óxido de implantación del *p-spray*, donde se distinguen claramente las dos regiones con diferentes concentraciones de boro. También se incluye un detector con sólo *p-stop* como referencia. Como era de esperar el *p-spray* es más ligero cuanto mayor es el óxido de implantación. El perfil de boro en la región del *p-stop* y el de fósforo de la micropista son los mismos en todos los casos. Los perfiles unidimensionales de dopantes extraídos de las estructuras simuladas se muestran en la figura 6.33.

6.4. *P-spray* moderado

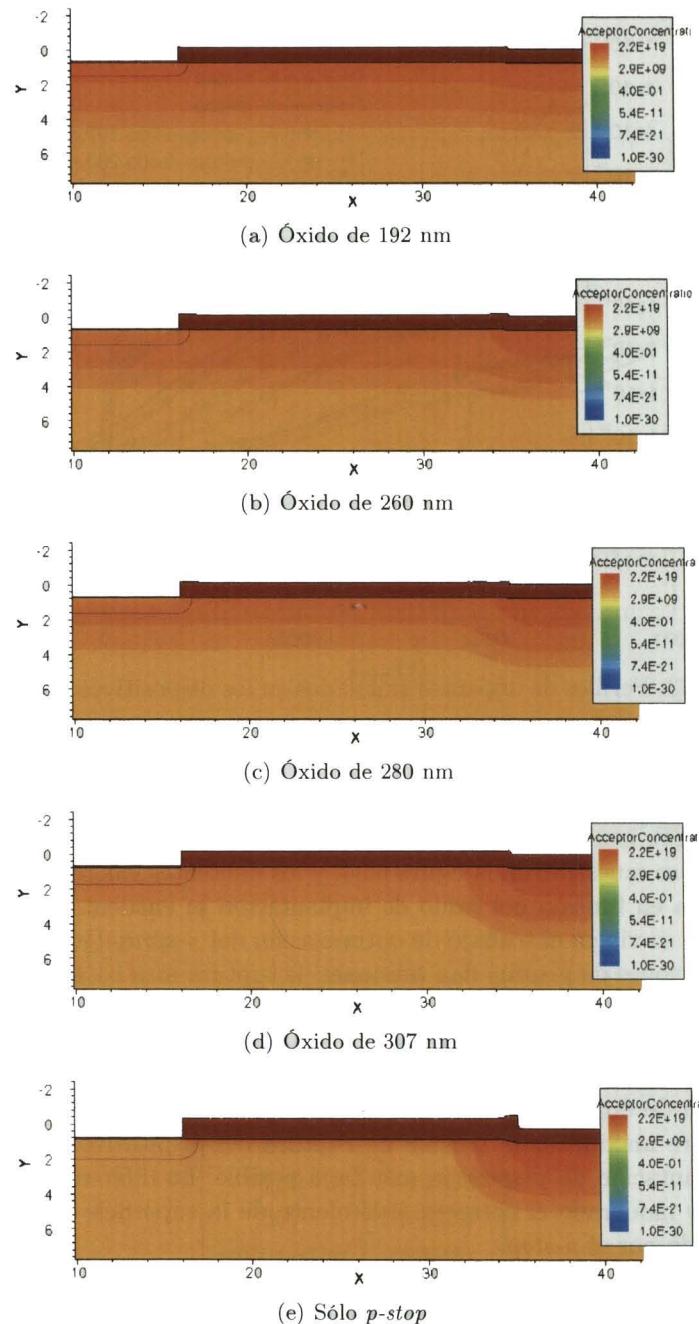


Figura 6.32: Concentraciones de aceptores en los dispositivos simulados en función del espesor del óxido de implantación del *p-spray*. En el lado izquierdo de la estructura se puede ver la unión P-N de la micropista.

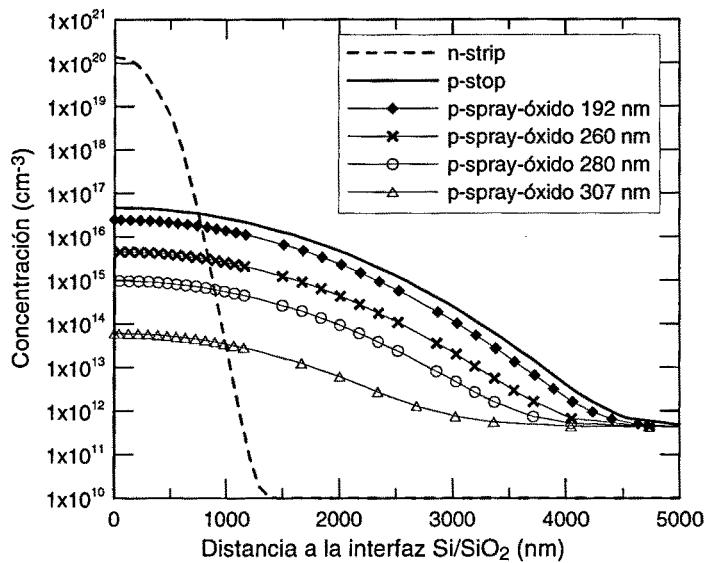


Figura 6.33: Perfiles de dopantes simulados en los dispositivos con aislamiento moderado.

El comportamiento eléctrico de los detectores se simuló con el programa DESSIS-ISE. Las curvas corriente-tensión para cada uno de los dispositivos simulados se muestran en la figura 6.34, y los diferentes valores de la tensión de ruptura en función del óxido de implantación se encuentran en la tabla 6.9. Como se vio en el trabajo de optimización del *p-spray* (§6.1.2), mayores concentraciones de *p-spray* dan tensiones de ruptura más bajas, ya que es en la región de campo eléctrico elevado en la unión P-N de la micropista donde tiene lugar la ruptura del detector. En iguales condiciones de polarización, este campo eléctrico es más intenso cuanto mayor es el gradiente de la concentración de dopantes. Por tanto, al igual que en el caso con sólo *p-spray*, si se quiere maximizar la tensión de ruptura del dispositivo se ha de usar una implantación de *p-spray* lo más baja posible. La diferencia es que con el *p-spray* moderado el correcto aislamiento de la superficie del silicio está garantizado por el *p-stop*.

Analizamos ahora el problema de las microdescargas, que se producen en regiones de campo eléctrico elevado en el borde del *p-stop*. En la figura 6.35 se pueden comparar las distribuciones del campo eléctrico en los dispositivos simulados con las dosis de *p-spray* más bajas y con sólo *p-stop*, para una tensión de polarización de 1000 V. Como ya se ha visto, el máximo del campo eléctrico está localizado en el borde de la micropista y su valor es 3.2×10^5 V/cm (280 nm, 6.35(a)), 2.1×10^5 V/cm (307 nm, 6.35(b))

6.4. *P-spray* moderado

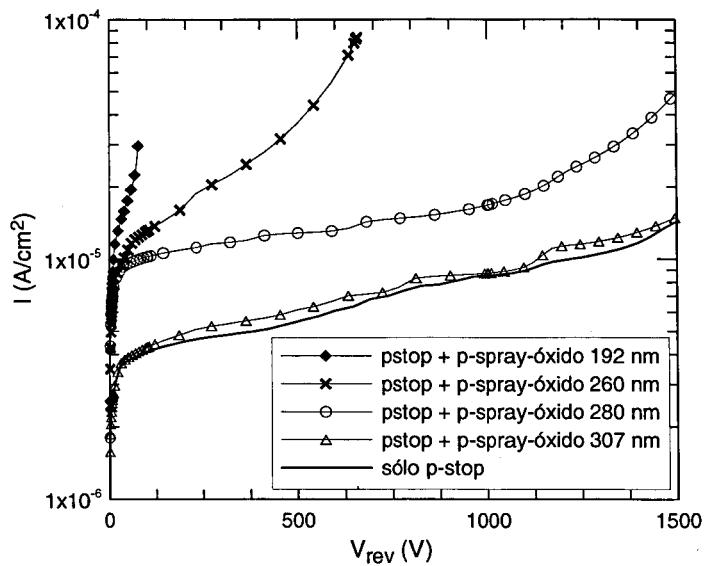


Figura 6.34: Curvas I-V simuladas para dispositivos con aislamiento moderado, con un *p-stop* de $10\ \mu\text{m}$ y diferentes implantaciones de *p-spray*.

t_{ox} (nm)	V_{BD} (V)
192	75
260	660
280	1500
307	>1500
sólo <i>p-stop</i>	>1500

Tabla 6.9: Tensión de ruptura obtenida por simulación en los dispositivos con *p-spray* de $10\ \mu\text{m}$ y diferentes *p-sprays*.

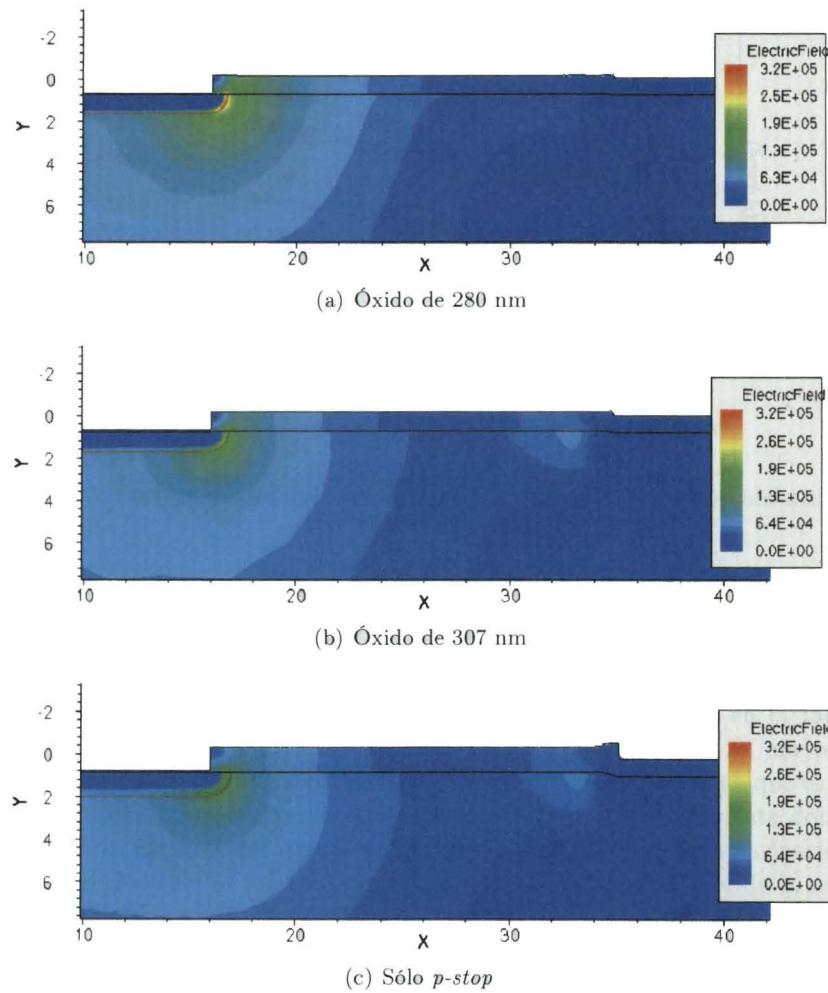


Figura 6.35: Distribución del campo eléctrico a 1000 V obtenida por simulación en dispositivos con aislamiento moderado o sólo con *p-stop*.

6.4. *P-spray* moderado

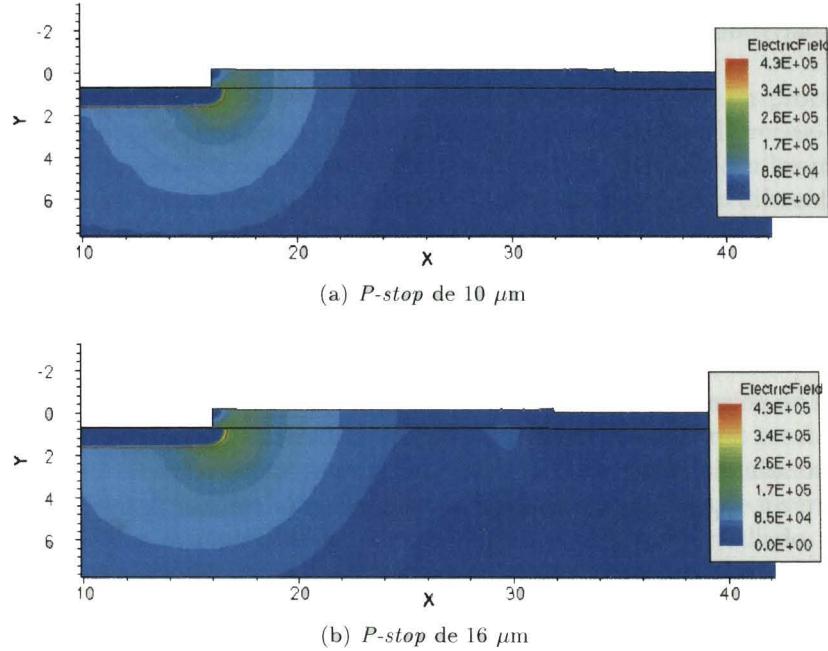


Figura 6.36: Distribución del campo eléctrico a 1000V obtenida por simulación en dispositivos con aislamiento moderado en los que el *p-spray* se ha implantado a través de un óxido de 280 nm, para un *p-stop* de 10 ó 16 μm . El valor máximo del campo eléctrico es: $3.2 \times 10^5 \text{ V/cm}$ (10 μm , (a)) y $4.3 \times 10^5 \text{ V/cm}$ (16 μm , (b)).

y $2.0 \times 10^5 \text{ V/cm}$ (sólo *p-stop*, 6.35(c)). Sin embargo, en el dispositivo con sólo *p-stop* y en el de menor *p-spray* se aprecia una isla en el borde del *p-stop* donde el campo eléctrico es más alto que el los alrededores, y es en esta zona donde es más probable que se produzcan las microdescargas. El valor máximo del campo en esa región, para el dispositivo con sólo *p-stop*, es de 57.5 kV/m. En el caso del *p-spray* más ligero, conseguido con un óxido de implantación de 307 nm, es de 57.3 kV/m, lo que supone una reducción de sólo un 0.2%: este *p-spray* es demasiado bajo para suponer una diferencia en cuanto a la probabilidad de microdescargas. En cambio, con el *p-spray* obtenido a través de un óxido de 280 nm se consigue que el campo eléctrico máximo en el borde del *p-stop* sea de 40.9 kV/m, un 29% menor que en el caso del *p-stop* solo. Este perfil de *p-spray*, con una concentración máxima de 10^{15} cm^{-3} según se ve en la figura 6.33, es la solución óptima, ya que reduce sustancialmente la probabilidad de que se produzcan microdescargas y a la vez no compromete la tensión de ruptura del dispositivo.

Finalmente estudiaremos la influencia de la anchura del *p-stop* en el com-

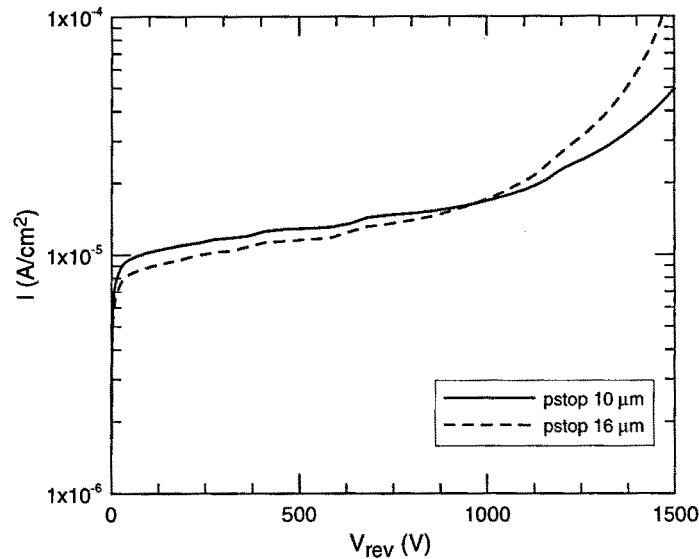


Figura 6.37: Curvas I-V simuladas para dispositivos con aislamiento moderado, con un *p-stop* de 10 ó 16 μm y *p-spray* implantado a través de un óxido de 280 nm.

portamiento eléctrico del detector. En la figura 6.36 se pueden comparar las distribuciones de campo eléctrico a 1000 V de dos dispositivos con idénticos parámetros de implantación del *p-spray* ($t_{ox} = 280$ nm) y *p-stops* de 10 ó 16 μm de anchura. El *p-stop* más ancho produce campos eléctricos más intensos tanto en la unión P-N de la micropista como en el borde del *p-spray*, lo que disminuye la tensión de ruptura (figura 6.37) y a la vez aumenta la probabilidad de microdescargas. Es importante pues que la distancia entre el *p-stop* y la implantación de las micropistas sea lo más alta posible. Fijado el *pitch* del detector, sólo se puede disminuir la anchura del *p-stop* dentro de los límites que permite la tecnología.

6.5. Conclusiones

En este capítulo se ha presentado un trabajo de optimización del aislamiento de las micropistas de detectores N-sobre-P mediante *p-spray*. El estudio se hizo como paso previo al procesado de un lote de detectores en el marco de la colaboración RD50 del CERN, con el propósito de encontrar los parámetros tecnológicos que garantizaran las mejores propiedades eléctricas de los dispositivos. El capítulo se completa con el análisis mediante

6.5. Conclusiones

simulación de la viabilidad del *p-spray* moderado como solución alternativa al *p-spray*.

La primera parte del estudio de optimización consistió en un proceso de simulación completo con el software ISE-TCAD. Se simuló el proceso de fabricación de un detector de micropistas N-sobre-P de acuerdo con los procesos reales de la sala blanca del IMB-CNM, para varios *p-sprays* diferentes. Los dispositivos resultantes de la simulación tecnológica se utilizaron después para la simulación eléctrica, con la que se obtuvieron las características corriente-tensión y las tensiones de ruptura, además de las concentraciones de portadores en la interfaz Si/SiO₂ antes y después de la irradiación hasta la saturación del óxido.

Los resultados de la simulación eléctrica muestran que la tensión de ruptura de los detectores sin irradiar disminuye si aumenta la carga total implantada en el silicio como *p-spray*. Por otro lado, según la simulación se necesitan dosis de *p-spray* muy elevadas para compensar la capa de inversión de electrones en la superficie del silicio inducida por el óxido irradiado. Por tanto, es necesario alcanzar una solución de compromiso entre un correcto aislamiento entre las micropistas y una tensión de ruptura antes de la irradiación lo suficientemente alta. Esto es especialmente crítico en detectores fabricados en substratos de baja resistividad como el silicio MCZ, en los que la tensión de vaciamiento completo es elevada.

A partir de los resultados de la simulación se eligieron tres implantaciones de *p-spray* diferentes para la fabricación de un lote de detectores de test. El acuerdo entre los espesores de óxido predichos por el simulador tecnológico y los reales es excelente y avala la utilidad de este tipo de herramientas para diseñar procesos tecnológicos. Por el contrario, las concentraciones de *p-spray* obtenidas, medidas por *spreading resistance*, son hasta un 80 % más bajas que las predichas por la simulación, aunque probablemente el error se debe a las limitaciones de esta técnica para estimar concentraciones tan bajas.

De acuerdo con los resultados de la simulación eléctrica, la tensión de ruptura medida en los detectores *pad* fabricados depende de su dosis de *p-spray*. Sin embargo, la de los detectores de micropistas es mucho más baja, en el rango 100–200 V, y parece estar limitada más por factores geométricos que por su implantación de *p-spray*. Sería necesario un estudio en profundidad de las razones que causan la ruptura de los detectores para optimizar su diseño o, en su caso, el proceso de fabricación.

Los tres *p-sprays* fabricados garantizan un buen aislamiento entre las micropistas de los detectores no irradiados. La resistencia entre dos pistas consecutivas medida en los dispositivos con la concentración de *p-spray* más baja es de 80 MΩ, más que suficiente para el correcto funcionamiento del detector y sólo la mitad del que tiene un detector P-sobre-N con la misma geometría. Sin embargo, la resistencia de estos mismos dispositivos irradiados hasta la saturación del óxido es de unos pocos kΩ, claramente insuficiente.

Sólo la dosis de implantación de *p-spray* más alta, 5×10¹² cm⁻², es ca-

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

paz de mantener un aislamiento adecuado entre las pistas incluso con óxidos irradiados hasta la saturación. Desgraciadamente, la tensión de ruptura de los diodos es tan sólo de 250 V, demasiado baja para detectores fabricados en substratos poco resistivos como el MCZ. Este resultado hace necesario investigar tecnologías alternativas al *p-spray* capaces de ofrecer un buen aislamiento sin comprometer el comportamiento eléctrico de los detectores.

Una de estas opciones alternativas es el *p-spray* moderado, que combina los *p-stops* con el *p-spray*. Los *p-stops* garantizan un aislamiento completo de las micropistas al bloquear la capa de inversión de electrones de la superficie del silicio. Al mismo tiempo, un *pspray* lo suficientemente ligero para no causar la ruptura temprana del detector disminuye el campo eléctrico en los bordes del *p-stop* reduciendo las probabilidades de microdescargas.

Como complemento al estudio de optimización del *p-spray*, se hizo un trabajo de simulación para desarrollar la tecnología del aislamiento mediante *p-spray* moderado en detectores N-sobre-P. El perfil moderado se consigue mediante una única implantación de boro a través de un óxido con dos espesores diferentes. Nuestra experiencia previa en la fabricación de detectores N-sobre-P con *p-stops* sirvió para fijar la energía y la dosis de la implantación. El espesor del óxido de implantación del *p-spray*, que determina su perfil, es el parámetro que se ha optimizado en el proceso de simulación.

Al igual que en el aislamiento mediante sólo *p-spray*, el campo eléctrico máximo en el dispositivo siempre está localizado en la unión P-N de las micropistas, donde el gradiente de concentraciones de dopantes es mayor. Con dosis más bajas de *p-spray* se consigue un menor campo eléctrico y una mayor tensión de ruptura. Sin embargo, si el *p-spray* es demasiado ligero, la transición entre el *p-stop* y el *p-spray* en el perfil moderado es abrupta y aparece una región de campo eléctrico elevado en el borde del *p-stop*, donde es probable que se produzcan microdescargas. Tras el proceso de simulación se ha encontrado el perfil óptimo de *p-spray*, con el que se reduce en un 30% el valor del campo eléctrico en el borde del *p-stop* respecto al que tiene un dispositivo con sólo *p-stops*, y al mismo tiempo la dosis de carga implantada como *p-spray* es lo bastante baja como para que la tensión de ruptura sea elevada.

Finalmente, se ha comprobado que para un conjunto dado de parámetros de la implantación del *p-spray* moderado, un *p-stop* más ancho crea campos eléctricos más altos que disminuyen la tensión de ruptura. Para conseguir un V_{BD} mayor hay que aumentar la distancia entre el *p-stop* y las micropistas. Fijado el *pitch*, esto implica hacer el *p-stop* lo más estrecho posible.

La continuación lógica de este trabajo es comprobar experimentalmente los resultados de la simulación: evaluar la capacidad del *p-spray* moderado con un solo *p-stop* estrecho para aislar las micropistas de los detectores N-sobre-P, y verificar la mejora de las características eléctricas de los dispositivos con respecto a los fabricados únicamente con *p-spray* o *p-stops*. Recientemente el IMB-CNM ha diseñado una nueva máscara de *p-stop* para

6.5. Conclusiones

el juego RD50 y se han utilizado los parámetros obtenidos de la simulación tecnológica para diseñar el proceso de fabricación de un nuevo lote de detectores con aislamiento mediante *p-spray* moderado, pero ésto queda fuera del ámbito del presente trabajo.

Capítulo 7

Conclusiones

Las conclusiones derivadas a lo largo del presente trabajo de investigación se han ido exponiendo con detalle al final de los capítulos correspondientes. Así pues, en este capítulo nos limitaremos a resumir las conclusiones más importantes.

Esta tesis doctoral se ha dedicado a desarrollar una tecnología de detectores de partículas de silicio capaces de soportar dosis tan elevadas de radiación como la que se espera en los experimentos del futuro acelerador super-LHC del CERN.

En la primera parte de este trabajo de investigación se ha llevado a cabo un estudio de las propiedades y de la respuesta a altas dosis de radiación de hadrones de detectores *pad P-sobre-N* fabricados en substrato *Float Zone* estándar y oxigenado, y *Czochralski magnético*. Este último material no se había utilizado hasta la fecha para fabricar detectores de radiación, y en este trabajo se ha demostrado que es una opción adecuada y además que gracias a su elevado contenido en oxígeno intersticial tiene una buena resistencia a la radiación de hadrones energéticos.

Las obleas de silicio MCZ presentan una buena homogeneidad de la resistividad y tiempos de vidas medias de los portadores suficientes para su uso en detección de radiación. Los dispositivos fabricados en este substrato tienen tensiones de vaciamiento completo razonables y un valor de la corriente de fugas similar al de los dispositivos de las mismas características fabricados en silicio DOFZ. Pese al elevado contenido en oxígeno de las obleas MCZ, el proceso de fabricación de los detectores diseñado y llevado a cabo en el IMB-CNМ no indujo la creación de donadores térmicos.

La irradiación con protones de 24 GeV modifica el dopaje efectivo de silicio. Este efecto, en los substratos FZ y DOFZ, está dominado primero por la compensación de los donadores originales hasta que ambos substratos se invierten a una fluencia aproximada de $3 \times 10^{13} \text{ p/cm}^2$. Tras la inversión la variación del dopaje está dominada por la introducción de estados aceptores, que es más lenta en el silicio oxigenado. En el caso del silicio MCZ no se

Capítulo 7. Conclusiones

observa inversión al menos hasta los 10^{15} p/cm², aunque sí un aumento del dopaje efectivo a fluencias altas. No obstante, esta variación es mucho más lenta que en el caso del silicio FZ estándar y oxigenado, por lo que podemos afirmar que el silicio MCZ presenta la mejor resistencia a la radiación de los tres substratos.

Los estudios de recocido a 80° C de los detectores fabricados muestran para los substratos FZ y DOFZ una región inicial de recocido beneficioso que dura unos pocos minutos y en la que se observa una disminución de la tensión de vaciamiento completo por la eliminación de aceptores. Tras esta etapa sigue otra dominada por la generación de aceptores que hace que aumenten tanto el dopaje efectivo como la tensión de vaciamiento completo y causa la inversión de los detectores que no se habían invertido con la irradiación. La variación del dopaje efectivo con el tiempo es menor en el substrato oxigenado, y esta ventaja es mayor al aumentar tanto la dosis de irradiación como el tiempo de recocido. En cuanto al silicio MCZ, no muestra ninguna etapa de recocido beneficioso pero sí una gran estabilidad del dopaje efectivo con el tiempo, lo que le hace muy adecuado para experimentos que requieran periodos de mantenimiento largos a temperatura ambiente.

En la segunda parte de la tesis se han comparado las dificultades tecnológicas y las propiedades como detectores de las estructuras P-sobre-N, N-sobre-P y N-sobre-N a partir de diodos detectores de radiación tipo *pad* fabricados por el IMB-CNM. Los detectores P-sobre-N son los más sencillos de fabricar pero también a los que más afecta la degradación por radiación: tras la inversión del substrato, si la tensión de vaciamiento completo es tan alta que supera a la tensión de trabajo, la región vaciada no alcanza los electrodos P y parte de la carga generada por una partícula se pierde antes de ser colectada. Este problema se soluciona con una estructura de tipo N-sobre-N en la que la zona de carga espacial crece desde el contacto del dorso antes de la inversión y desde el lado de las pistas después. El inconveniente de los detectores N-sobre-N es su elevada dificultad tecnológica, ya que necesitan una implantación P⁺ adicional para aislar las pistas y procesado de doble cara para delimitar el contacto del dorso. Se ha comprobado que una mejor solución son los detectores N-sobre-P que tienen las mismas ventajas de la lectura en pistas N que los N-sobre-N pero sin la necesidad del procesado por las dos caras. Las medidas de colección de carga llevadas a cabo en otros Institutos sobre los detectores fabricados han demostrado que la eficiencia de colección de carga tras dosis muy altas de radiación es muy superior en los detectores N-sobre-P que en los P-sobre-N.

Asimismo, la caracterización capacidad-tensión de los detectores N-sobre-P antes y después de irradiar con protones de 24 GeV ha demostrado la extraordinaria resistencia a la radiación de los substratos P: el silicio P no se invierte sino que su concentración de aceptores aumenta con la irradiación, pero el ritmo de variación de la tensión de vaciamiento completo con la fluencia es el más bajo de todos los substratos caracterizados en este tra-

bajo, menos de la mitad del que tiene el silicio Czocralski magnético N. La oxigenación del silicio P todavía aumenta más su tolerancia a la radiación.

El comportamiento de *annealing* de silicio P es similar al que tienen los substratos FZ y DOFZ tipo N invertidos, ya que consiste en un aumento en la concentración de aceptores que hacen que aumente continuamente su tensión de vaciamiento completo.

Finalmente, también se ha comprobado que en todas las estructuras y substratos estudiados existe una proporcionalidad directa entre el aumento de la corriente inversa del detector por unidad de volumen y la dosis de irradiación de protones. El ritmo del aumento es el mismo independientemente de las características del silicio (resistividad, contenido en oxígeno, signo del dopaje) e incluso de si se encuentra invertido o no por la radiación, y tampoco se ve afectado por la tecnología usada en la fabricación de los detectores.

Las excelentes características de los detectores N-sobre-P hacen de ellos una opción muy adecuada para experimentos de física de altas energías con entornos de radiación muy elevados. No obstante, hasta el momento no han sido muy utilizados y se necesita optimizar la tecnología. La última parte de la tesis se ha dedicado a un aspecto concreto de la tecnología de detectores de micropistas N-sobre-P, concretamente al aislamiento de la superficie del silicio entre las pistas. El *p-stop* ha demostrado no ser la mejor opción, ya que se ha comprobado que su efecto sobre la distribución de campo eléctrico en los detectores sin irradiar provoca su ruptura temprana por avalancha. Como solución alternativa al *p-stop*, se ha hecho un trabajo de optimización del aislamiento mediante *p-spray* para detectores de micropistas N-sobre-P. Un exhaustivo trabajo de simulación, seguido por la fabricación y caracterización de un lote de detectores de test, han permitido conocer el perfil de *p-spray* que garantiza un aislamiento correcto entre las micropistas incluso en detectores irradiados hasta la saturación del óxido. Lamentablemente, la tensión de ruptura de los dispositivos fabricados con este *p-spray* es demasiado baja para detectores con substratos de baja resistividad. Un segundo trabajo de simulación ha demostrado que el aislamiento mediante *p-spray* moderado es una mejor solución, ya que mejora las características eléctricas de los dispositivos fabricados con *p-spray*, reduciendo los picos de campo eléctrico que provocan microdescargas y precipitan la ruptura, y a la vez proporciona un aislamiento óptimo entre las micropistas del detector.

Referencias

- [1] THE ATLAS COLLABORATION. ATLAS inner detector technical design report vol.1. Informe técnico ATLAS TDR 4, CERN/LHCC 97-16, CERN (abril 1997).
- [2] THE ATLAS COLLABORATION. ATLAS inner detector technical design report vol.2. Informe técnico ATLAS TDR 4, CERN/LHCC 97-17, CERN (abril 1997).
- [3] F. GIANOTTI, M.L. MANGANO Y T.S. VIRDEE. Physics potential and experimental challenges of the LHC luminosity upgrade. Informe técnico CERN-TH-2002-078, hep-ph/0204087, CERN (abril 2002).
- [4] <http://www.cnm.es/projects/atlas/>.
- [5] C. MARTÍNEZ. “Desarrollo de una tecnología de detectores de radiación de silicio de micropistas para aplicaciones de física de altas energías”. Tesis Doctoral, Universitat de Barcelona (2003). Disponible en <http://www.cnm.es/projects/atlas/>.
- [6] O.S. BRÜNING ET AL. LHC design report vol.1: the LHC main ring. Informe técnico CERN-2004-003-V-1, CERN (2004).
- [7] THE ATLAS COLLABORATION. Technical proposal for a general-purpose pp experiment at the LHC at CERN. Informe técnico CERN/LHCC 94-43, CERN (diciembre 1994).
- [8] THE ATLAS COLLABORATION. ATLAS detector and physics performance. Technical design report vol.1. Informe técnico ATLAS-TDR-014, CERN-LHCC-99-014, CERN (mayo 1999).
- [9] THE ATLAS COLLABORATION. ATLAS detector and physics performance. Technical design report vol.2. Informe técnico ATLAS-TDR-015, CERN-LHCC-99-015, CERN (mayo 1999).
- [10] Y. UNNO. ATLAS silicon microstrip detector system (SCT). *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A* **511**(1–2), 58–63 (septiembre 2003).

Referencias

- [11] M. ULLÁN ET AL. Pitch adaptors or fan-ins of the ATLAS-SCT endcap detector modules. *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A*. In press.
- [12] H. F. W. SADROZINSKI Y A. SEIDEN. Tracking detectors for the sLHC, the LHC upgrade. *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A* **541**(1-2), 434–440 (abril 2005).
- [13] H. F. W. SADROZINSKI. Tracking detectors for the LHC upgrade. *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A* **552**(1-2), 1–6 (octubre 2005).
- [14] C. TRONCON. Radiation hardness performance of atlas pixel tracker. *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A* **530**(1-2), 65–70 (septiembre 2004).
- [15] G. DARBO. Outline of R&D activities for ATLAS at an upgraded LHC. Informe técnico COM-GEN-2005-002, CERN (enero 2005).
- [16] US ATLAS Upgrade Workshop, SMU Dallas, enero 2004. <http://atlaspc3.physics.smu.edu/atlas/>.
- [17] Workshop on ATLAS Upgrades for High Luminosity, CERN, febrero 2005. <http://agenda.cern.ch/fullAgenda.php?ida=a045387>.
- [18] ATLAS Tracker Upgrade Workshop, Genova, julio 2005. <http://agenda.cern.ch/fullAgenda.php?ida=a053875>.
- [19] THE ROSE/RD48 COLLABORATION. RD48 status report. Informe técnico CERN/LHCC 97-39, CERN (1997). Disponible en <http://rd48.web.cern.ch/rd48/>.
- [20] THE ROSE/RD48 COLLABORATION. RD48 2nd. status report. Informe técnico CERN/LHCC 98-39, CERN (1998). Disponible en <http://rd48.web.cern.ch/rd48/>.
- [21] THE ROSE/RD48 COLLABORATION. RD48 3rd. status report. Informe técnico CERN/LHCC 2000-009, CERN (1999). Disponible en <http://rd48.web.cern.ch/rd48/>.
- [22] G. LINDSTRÖM Y THE ROSE/RD48 COLLABORATION. Radiation hard silicon detectors-developments by the RD48 (ROSE) Collaboration. *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A* **466**(2), 308–326 (julio 2001).
- [23] <http://rd50.web.cern.ch/rd50/>.

Referencias

- [24] THE RD50 COLLABORATION. R&D Proposal. Informe técnico LHCC 2002-003/P6, CERN (2002). Disponible en <http://rd50.web.cern.ch/rd50/>.
- [25] THE RD50 COLLABORATION. RD50 status report 2002/2003. Informe técnico CERN-LHCC-2003-058, CERN (2003). Disponible en <http://rd50.web.cern.ch/rd50/>.
- [26] THE RD50 COLLABORATION. RD50 status report 2004. Informe técnico CERN-LHCC-2004-031, CERN (2004). Disponible en <http://rd50.web.cern.ch/rd50/>.
- [27] E. FRETWURST ET AL. (THE RD50 COLLABORATION). Recent advancements in the development of radiation hard semiconductor detectors for S-LHC. *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A* **552**(1-2), 7–19 (octubre 2005).
- [28] M. BRUZZI Y THE RD50 COLLABORATION. Radiation-hard semiconductor detectors for SuperLHC. *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A* **541**, 189–201 (2005).
- [29] S. M. SZE. “Physics of semiconductor devices”. John Wiley & Sons, 2^a edición (1981).
- [30] S. M. SZE. “Semiconductor devices. Physics and technology”. John Wiley & Sons, 2^a edición (2001).
- [31] S.S. LI. “Semiconductor Physical Electronics”. Plenum Press (1993).
- [32] W.R. LEO. “Techniques for nuclear and particle physics experiments: a how-to approach”. Springer-Verlag, 2^a edición (1994).
- [33] G.F. KNOLL. “Radiation detection and measurement”. John Wiley and Sons, 3^a edición (1999).
- [34] N. TSOULFANIDIS. “Measurement and detection of radiation”. Taylor and Francis, Cop. (1995).
- [35] G. LUTZ. “Semiconductor radiation detectors”. Springer (1999).
- [36] H.L. MALM ET AL. Gamma-ray efficiency comparisons for Si(lit.), Ge, CdTe and HgI₂ detectors. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **20**, 500–509 (1973).
- [37] S. EIDELMAN. Review of particle physics. *Physics Letters B* **592**, 1+ (2004).
- [38] G. CASSE. “The effect of hadron irradiation on the electrical properties of particle detectors made from various silicon materials”. Tesis Doctoral, Université Joseph Fourier-Grenoble I (1998).

Referencias

- [39] R. SONNENBLICK ET AL. Electrostatic simulations for the design of silicon strip detectors and front-end electronics. *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A* **310**(1-2), 189–191 (diciembre 1991).
- [40] V.A.J. VAN LINT, T.M. FLANAGAN, R.E. LEADON, J.A. NABER Y V.C. ROGERS. “Mechanisms of radiation effects in electronic materials”. John Wiley & Sons (1980).
- [41] G. LINDSTRÖM. Radiation damage in silicon detectors. *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A* **512**(1-2), 30–43 (octubre 2003).
- [42] ASTM E722-85, ASTM E722-93 (revised) (1993).
- [43] A. VASILESCU Y G. LINDSTRÖM. Notes on the fluence normalisation based on the NIEL scaling hypothesis. Informe técnico ROSE/TN/2000-02, CERN (junio 2000). Disponible en <http://rd48.web.cern.ch/RD48>.
- [44] A. VASILESCU Y G. LINDSTRÖM. Displacement damage in silicon, on-line compilation. <http://sesam.desy.de/members/gunnar/Si-dfuncs.html>.
- [45] A. RUZIN ET AL. Comparison of radiation damage in silicon induced by proton and neutron irradiation. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **46**(5), 1310–1313 (octubre 1999).
- [46] M. MOLL ET AL. Relation between microscopic defects and macroscopic changes in silicon detector properties after hadron irradiation. *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, B* **186**(1-4), 100–110 (enero 2002).
- [47] A. CANDELORI ET AL. New evidence of dominant processing effects in standard and oxygenated silicon diodes after neutron irradiation. *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A* **512**(1-2), 52–59 (octubre 2003).
- [48] J.A. FELIX ET AL. Influence of total-dose radiation on the electrical characteristics of SOI MOSFETs. En “13th Bi-annual Conference on Insulating Films on Semiconductors, INFOS 2003”, página IT6, Barcelona (2003).
- [49] G. LUTZ. Radiation damage in structured silicon semiconductor detectors. Invited talk presented at the IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference, Phoenix, Arizona (julio 2002).
- [50] T. P. MA Y PAUL V. DRESSENDORFER, editores. “Ionizing radiation effects in MOS devices and circuits”. John Wiley & Sons (1989).

Referencias

- [51] R. WUNSTORF. "Systematische untersuchungen zur strahlenresistenz von silizium-detektoren für die verwendung in hochenergiephysik-experimenten". Tesis Doctoral, Universität Hamburg (octubre 1992).
- [52] M. MOLL. "Radiation damage in silicon particle detectors". Tesis Doctoral, Universität Hamburg (1999). Disponible en <http://mmoll.home.cern.ch/mmoll/thesis/>.
- [53] M. MOLL Y THE ROSE/CERN-RD48 COLLABORATION. Leakage current of hadron irradiated silicon detectors - material dependence. *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A* **426**(1), 87–93 (abril 1999).
- [54] A.G. BATES Y M. MOLL. A comparison between irradiated magnetic Czochralski and Float Zone silicon detectors using the transient current technique. *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A* **555**(1–2), 113–124 (diciembre 2005).
- [55] R.H. RICHTER ET AL. Strip detector design for ATLAS and HERA-B using two-dimensional device simulation. *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A* **377**(2–3), 412–421 (agosto 1996).
- [56] L. VALDES. Resistivity measurements on germanium for transistors. En "Proceedings of the IRE", páginas 420–427 (1954).
- [57] F.M. SMITS. Measurement of sheet resistivities with the four-point probe. *Bell Syst. Tech. J.* **37**, 711–712 (1958).
- [58] Chang Min Tech Co. Ltd., South Korea. "CMT-SR2000N Sheet Resistance and Resistivity Measurement System".
- [59] T. CLARYSSE ET AL. Characterization of electrically active dopant profiles with the spreading resistance probe. *Materials Science and Engineering R* **47**(5–6), 123–206 (diciembre 2004).
- [60] R.G. MAZUR Y D.H. DICKEY. A spreading resistance technique for resistivity measurements on silicon. *J. Electrochem. Soc.* **113**(3), 255+ (1966).
- [61] R. LOESING. "Development of High Resolution Depth Profiling Of Ultra Shallow Dopant Implants with SIMS". Tesis Doctoral, North Carolina State University (2001).
- [62] A. PÉREZ-RODRÍGUEZ ET AL. Physical techniques for silicon layer analysis. *Microelectronic Engineering* **40**(3–4), 223–237 (noviembre 1998).
- [63] A. BARCZ ET AL. Extremely deep SIMS profiling: oxygen in FZ silicon. *Applied Surface Science* **203–204**, 396–399 (enero 2003).

Referencias

- [64] Cameca France. <http://www.cameca.fr/index.html>.
- [65] Sinton Consulting, Inc., Boulder, CO, USA. "WCT-100 Photoconductance Tool".
- [66] R.A. SINTON, A. CUEVAS Y M. STUCKINGS. Quasi-steady-state photoconductance, a new method for solar cell material and device characterization. En "Proceedings of the 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference", páginas 457–460 (1996).
- [67] R.A. SINTON Y A. CUEVAS. Contactless determination of current-voltage characteristics and minority-carrier lifetimes in semiconductors from quasi-steady-state photoconductance data. *Applied Physics Letters* **69**(17), 2510–2512 (octubre 1996).
- [68] <http://www.sintonconsulting.com/>.
- [69] A. CHILINGAROV. Recommendations towards a standardisation of the macroscopic parameter measurements. Informe técnico 2003/03, RD50 (2003). Disponible en <http://rd50.web.cern.ch/rd50/>.
- [70] E. FRETWURST ET AL. Comparison of full depletion voltage extracted from C-V, I-V and Q-V characteristics for a highly irradiated epidiode. Presentado en el 7th RD50 workshop on radiation hard semiconductor devices for very high luminosity colliders, RD50, CERN (noviembre 2005). Disponible en <http://rd50.web.cern.ch/rd50/>.
- [71] W.R. THURBER ET AL. Semiconductor measurement technology: The relationship between resistivity and dopant density for phosphorus and boron doped silicon. *National Bureau of Standards Special Publication 400-64* (1981).
- [72] L. BEATTIE ET AL. Dependence of depletion voltage and capacitance on temperature and frequency in heavily irradiated silicon diodes. Informe técnico 97/4, ROSE/RD48 (1997). Disponible en <http://rd48.web.cern.ch/rd48/>.
- [73] D. CAMPBELL, A. CHILINGAROV Y T. SLOAN. Study of the frequency and temperature dependence of the depletion voltage from CV measurements for irradiated Si detectors. Informe técnico, The ROSE/RD48 Collaboration (2002).
- [74] D. CAMPBELL ET AL. Frequency and temperature dependence of the depletion voltage from cv measurements for irradiated si detectors. *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A* **492**(3), 402–410 (octubre 2002).

Referencias

- [75] Isotope Products Laboratories, Valencia, CA, USA. <http://www.ip1.isotopaproducts.com/>.
- [76] L.P. EKSTRÖM Y R.B. FIRESTONE. WWW Table of Radioactive Isotopes, database version 2/28/99. <http://ie.lbl.gov/toi/index.htm>.
- [77] THE ROSE/RD48 COLLABORATION , M. GLASER ET AL. New irradiation zones at the CERN-PS. *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A* **426**, 72–77 (1999).
- [78] <http://irradiation.web.cern.ch/irradiation/irrad1.htm>.
- [79] <http://irradiation.web.cern.ch/irradiation/InfoDose.asp>.
- [80] ASTM E1026-04e1 “Standard practice for using the Fricke reference-standard dosimetry system”, ASTM International.
- [81] G. CASSE ET AL. Improving the radiation hardness properties of silicon detectors using oxygenated n-type and p-type silicon. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **47**(3), 527–532 (junio 2000).
- [82] G. CASSE ET AL. A comparative study of oxygenated and non-oxygenated si pad diodes, miniature and large area microstrip detectors. *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A* **466**(2), 335–344 (julio 2001).
- [83] C. MARTÍNEZ ET AL. Novel results on fluence dependence and annealing behavior of oxygenated and non-oxygenated silicon detectors. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **49**(3), 1377–1382 (junio 2002).
- [84] I. PINTILIE ET AL. Radiation-induced donor generation in epitaxial and Cz diodes. *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A* **552**(1-2), 56–60 (octubre 2005).
- [85] V. SAVOLAINEN ET AL. Simulation of large-scale silicon melt flow in magnetic Czochralski growth. *Journal of Crystal Growth* **243**, 243–260 (2002).
- [86] K. HOSHIKAWA Y X. HUANG. Oxygen transportation during Czochralski silicon crystal growth. *Materials Science and Engineering B* **72**(2-3), 73–79 (marzo 2000).
- [87] <http://www.topsil.com>.
- [88] L. FONSECA ET AL. Silicon wafer oxygenation from SiO₂ layers for radiation hard detectors. *Microelectronics Reliability* **40**(4–5), 791–794 (abril 2000).

Referencias

- [89] M. LOZANO ET AL. Effect of combined oxygenation and gettering on minority carrier lifetime in high-resistivity fz silicon. *J. Electrochem. Soc.* **151**(10), G652–G657 (septiembre 2004).
- [90] ISE INTEGRATED SYSTEM ENGINEERING AG, ZURICH, SWITZERLAND.
- [91] D.P. KENNEDY Y R.R. O'BRIEN. Analysis of the impurity atom distribution near the diffusion mask for a planar p-n junction. *IBM Journal* páginas 179–186 (mayo 1965).
- [92] ROBERT HULL, editor. “Properties of crystalline silicon”. Número 20 en EMIS datareviews series. INSPEC, The Institution of Electrical Engineers, London, UK (1999).
- [93] V. CINDRO ET AL. Bias-dependent annealing of radiation damage in neutron-irradiated silicon p⁺-n-n⁺ diodes. *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A* **419**, 132–136 (1998).
- [94] V. CINDRO ET AL. Bias-dependent radiation damage in high-resistivity silicon diodes irradiated with heavy charged particles. *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A* **450**, 288–296 (2000).
- [95] M. BRUZZI ET AL. Processing and first characterization of detectors made with high resistivity n- and p-type Czochralski silicon. *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A* **552**(1–2), 20–26 (octubre 2005).
- [96] I. PINTILIE ET AL. Stable radiation-induced donor generation and its influence on the radiation tolerance of silicon diodes. *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A* **556**(1), 197–208 (enero 2006).
- [97] P.P. ALLPORT ET AL. Radiation tolerance of oxygenated n-strip read-out detectors. *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A* **513**(1-2), 84–88 (noviembre 2003).
- [98] THE LHCb-VELO COLLABORATION. LHCb-VELO technical design report. Informe técnico CERN/LHCC 2001-0011 LHCb TDR 5, CERN (mayo 2001).
- [99] P.P. ALLPORT ET AL. Performance of p-type micro-strip detectors after irradiation to 7.5×10^{15} p/cm². *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52**(5), 1903–1906 (octubre 2005).
- [100] O. STEINKAMP. Silicon strip detectors for the LHCb experiment. *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A* **541**, 83–88 (2005).
- [101] THE CMS COLLABORATION. CMS tracker technical design report. Informe técnico CERN/LHCC 98-6 CMS TDR 5, CERN (1998).

Referencias

- [102] G. CASSE ET AL. First results on the charge collection properties of segmented detectors made with p-type bulk silicon. *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A* **487**(3), 465–470 (julio 2002).
- [103] G. CASSE ET AL. First results on charge collection efficiency of heavily irradiated microstrip sensors fabricated on oxygenated p-type silicon. *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A* **518**(1–2), 340–342 (febrero 2004).
- [104] G. CASSE ET AL. Performances of miniature microstrip detectors made on oxygen enriched p-type substrates after very high proton irradiation. *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A* **535**(1–2), 362–365 (diciembre 2004).
- [105] G. CASSE ET AL. Charge collection and charge sharing in heavily irradiated n-side read-out silicon microstrip detectors. *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A* **511**(1–2), 112–117 (septiembre 2003).
- [106] T. ROHE ET AL. Fluence dependence of charge collection of irradiated pixel sensors. *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A* **552**(1–2), 232–238 (octubre 2005).
- [107] THE BABAR COLLABORATION. BaBar technical design report. Informe técnico SLAC-R-457, SLAC (1995).
- [108] THE CDF II COLLABORATION. CDF II technical design report. Informe técnico 96/390-E, Fermilab (1996).
- [109] J. HARKONEN ET AL. p⁺/n/n⁺ Cz-si detectors processed on p-type boron-doped substrates with thermal donor induced space charge sign inversion. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52**(5), 1865–1868 (octubre 2005).
- [110] T. OHSUGI ET AL. Micro-discharge at strip edge of silicon microstrip sensors. *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A* **383**(1), 116–122 (diciembre 1996).
- [111] D. ROBINSON ET AL. Noise studies of n-strip on n-bulk silicon microstrip detectors using fast binary readout electronics after irradiation to 3×10^{14} p cm⁻². *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A* **426**(1), 28–33 (abril 1999).
- [112] Y. UNNO ET AL. Novel p-stop structure in n-side of silicon microstrip detector. *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A* **541**(1–2), 40–46 (abril 2005).
- [113] M. ALAM ET AL. The ATLAS silicon pixel sensors. *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A* **456**(3), 217–232 (enero 2001).

Referencias

- [114] I. GORELOV ET AL. Electrical characteristics of silicon pixel detectors. *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A* **489**(1–3), 202–217 (agosto 2002).
- [115] T. ROHE ET AL. Position dependence of charge collection in prototype sensors for the CMS pixel detector. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51**(3), 1150–1157 (junio 2004).
- [116] J. KEMMER ET AL. United States Patent No. U.S. 6,184,562 B1 (febrero 2001).
- [117] “ISE Integrated Systems Engineering, Release 9.0, Part 8: DIOS”.
- [118] “ISE Integrated Systems Engineering, Release 9.0, Part 16: DESSIS-ISE”.
- [119] C. FLETA ET AL. Characterization of n-in-n microstrip radiation detectors fabricated on different silicon substrates. En “Proceedings de la 5^a Conferencia de Dispositivos Electrónicos (CDE 2005)”, páginas 513–516 (febrero 2005).
- [120] S. WORM. Radiation effects in double-sided silicon sensors for CDF. *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research, A* **418**(1), 120–127 (noviembre 1998).