

# Tecnología de detectores de partículas de silicio resistentes a altas dosis de radiación

Celeste Fleta, Giulio Pellegrini, Manuel Lozano,  
Francesca Campabadal, Joan Marc Rafí, Miguel Ullán,  
Gianluigi Casse<sup>1</sup> y Philip P. Allport<sup>1</sup>

Instituto de Microelectrónica de Barcelona IMB-CNM (CSIC)

<sup>1</sup>Oliver Lodge Laboratory, University of Liverpool, UK

# Tecnología de detectores de partículas de silicio resistentes a altas dosis de radiación

1. Estudio del efecto de altas dosis de radiación en detectores fabricados sobre substratos de silicio FZ, DOFZ y MCZ
2. Caracterización de detectores de micropistas N-sobre-N fabricados sobre diferentes substratos de silicio

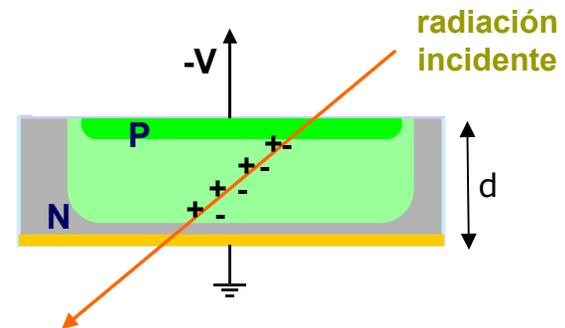
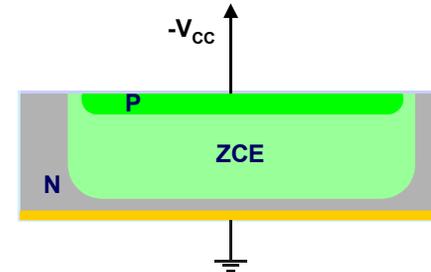
# Tecnología de detectores de partículas de silicio resistentes a altas dosis de radiación

1. Estudio del efecto de altas dosis de radiación en detectores fabricados sobre substratos de silicio FZ, DOFZ y MCZ
2. Caracterización de detectores de micropistas N-sobre-N fabricados sobre diferentes substratos de silicio

## Diodos detectores de silicio

- Diodo polarizado en inversa
- La radiación genera pares electrón-hueco
  - Pulso de corriente
- Operación en vaciamiento total
  - Máxima zona útil
  - Mínima recombinación
  - Substrato de alta resistividad
    - Evitar ruptura en inversa
    - Bajo  $V_{FD}$

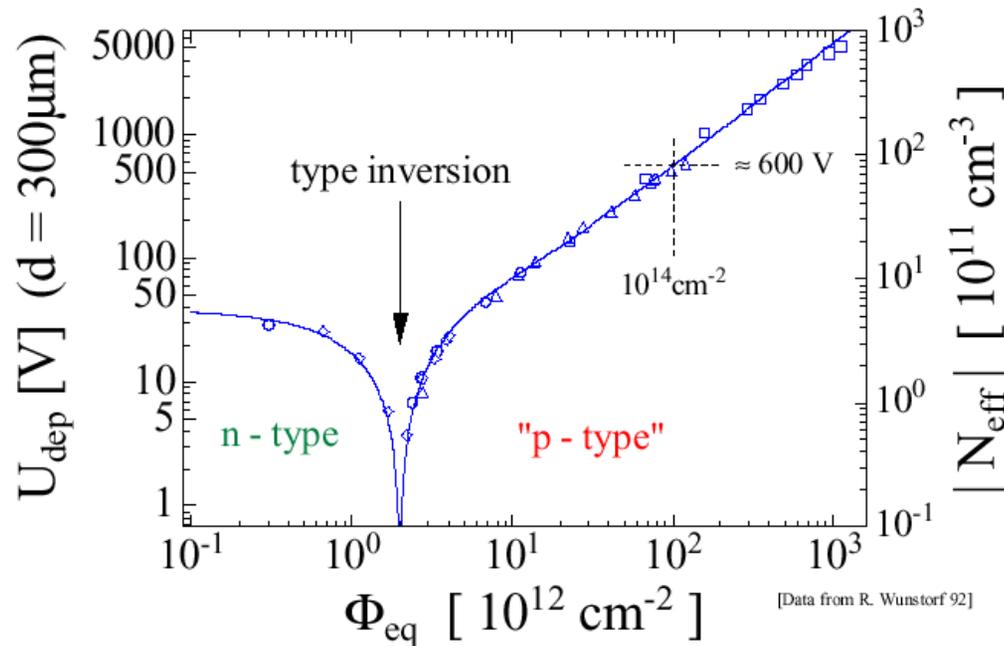
$$V_{FD} = q|N_{eff}|d^2/2\epsilon_0\epsilon_{Si}$$



## Daño por desplazamiento: efectos microscópicos y macroscópicos

- Detectores de silicio muy sensibles al daño del substrato
  - Daño por desplazamiento: la partícula incidente ( $\beta$ +/-, p, n, iones,  $\gamma$ ) desplaza núcleos de la red cristalina
  - Los defectos resultantes alteran las características electrónicas del cristal
- 1. Formación de estados en medio del gap: generación térmica de pares electrón-hueco ([incremento en la corriente de fugas](#))
- 2. Estados cercanos a las bandas que facilitan el atrapamiento de carga ([disminución de la eficiencia de colección de carga](#))
- 3. Cambios en el dopaje por introducción neta de aceptores: ([variación del voltaje de vaciamiento completo](#))

## Daño por radiación: inversión del substrato N



$\Phi$ : Fluencia de partículas

$N_0$ : dopaje del substrato antes de la irradiación

$c$ : ritmo de eliminación de los donadores originales

- Domina a fluencias bajas

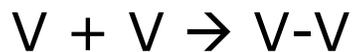
$\beta$ : ritmo de generación de aceptores

- Pendiente de  $N_{\text{eff}}(\Phi)$  tras la inversión.

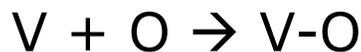
$$N_{\text{eff}} = N_0 \cdot e^{-c\Phi - \beta\Phi}$$

## Efecto del oxígeno

- Una concentración elevada ( $>10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) de átomos de oxígeno intersticiales en la red cristalina del silicio aumenta su resistencia al daño por desplazamiento creado por la radiación de hadrones cargados (no neutrones)



aceptor profundo

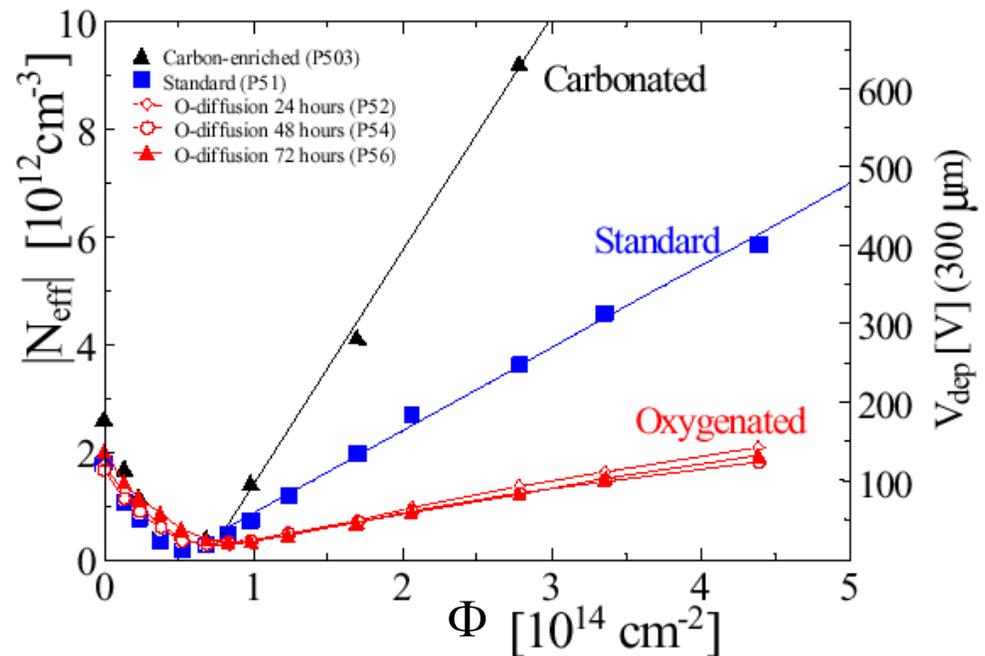


eléctricamente inactivo

V = Vacante

O = Oxígeno

24 GeV/c proton irradiation



G. Lindstrom et al, Nucl. Instr. and Meth. A, v pp. 308-326 (2001).

## Substratos de silicio para detectores de radiación

1. Elevada resistividad
  - Conseguir el vaciamiento completo del detector a tensiones razonablemente bajas
2. Concentración elevada ( $>10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) de oxígeno

Substrato	Resistividad	Conc. Oxígeno ( $\text{cm}^{-3}$ )
Float Zone (FZ)	Alta	$< 10^{16}$
Diffusion Oxygenated Float Zone (DOFZ)	Alta	Hasta $10^{17}$
Czochralski (CZ)	Baja	$10^{17}-10^{18}$
Magnetic Czochralski (MCZ)	Alta	$10^{17}-10^{18}$

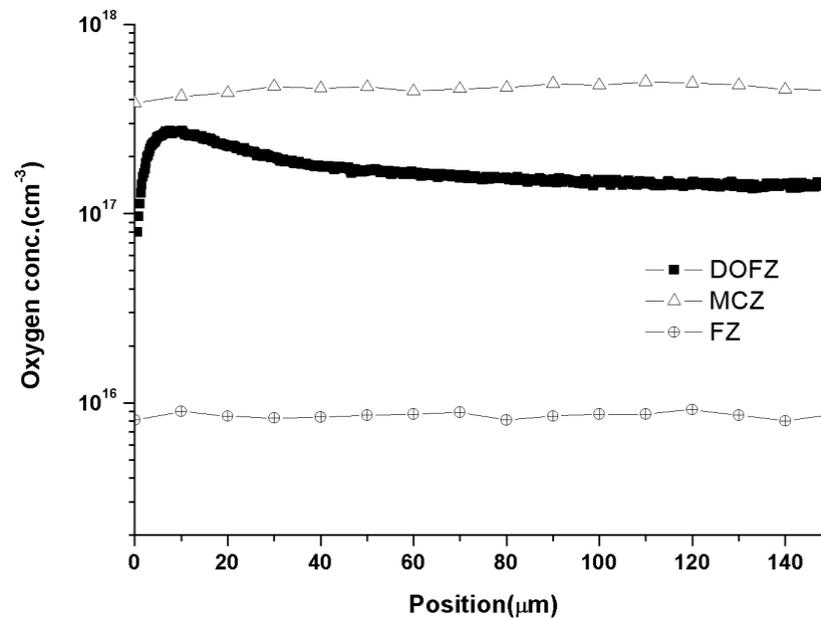
- La técnica del **Czochralski Magnético (MCZ)** ha hecho posible obtener silicio muy resistivo y con un elevado contenido en oxígeno

Objetivo del trabajo: estudio del substrato MCZ como material para la fabricación de detectores de radiación

## Características de los substratos utilizados

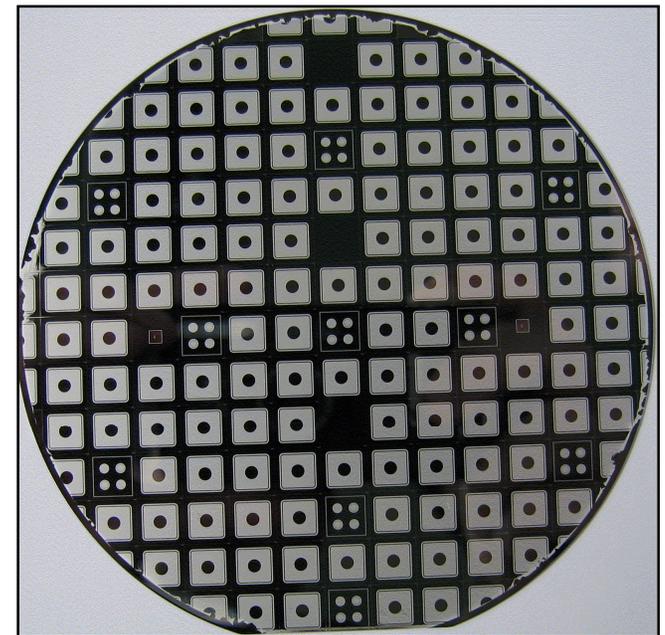
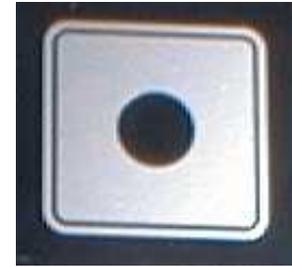
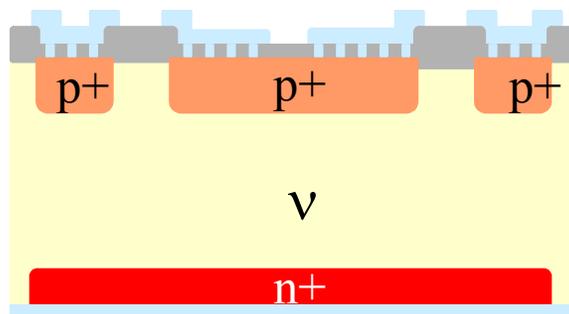
Substrato	Concentración de oxígeno ( $\text{cm}^{-3}$ )	Resistividad ( $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ )	Dopaje efectivo ( $\text{cm}^{-3}$ )
FZ	$8.6 \times 10^{15}$	$4.5 \pm 0.6$	$(9 \pm 1) \times 10^{11}$
DOFZ	$1.7 \times 10^{17}$	$2.5 \pm 0.1$	$(1.64 \pm 0.07) \times 10^{12}$
MCZ	$4.6 \times 10^{17}$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

Obleas <100>, 300  $\mu\text{m}$ , dopadas tipo N con fósforo



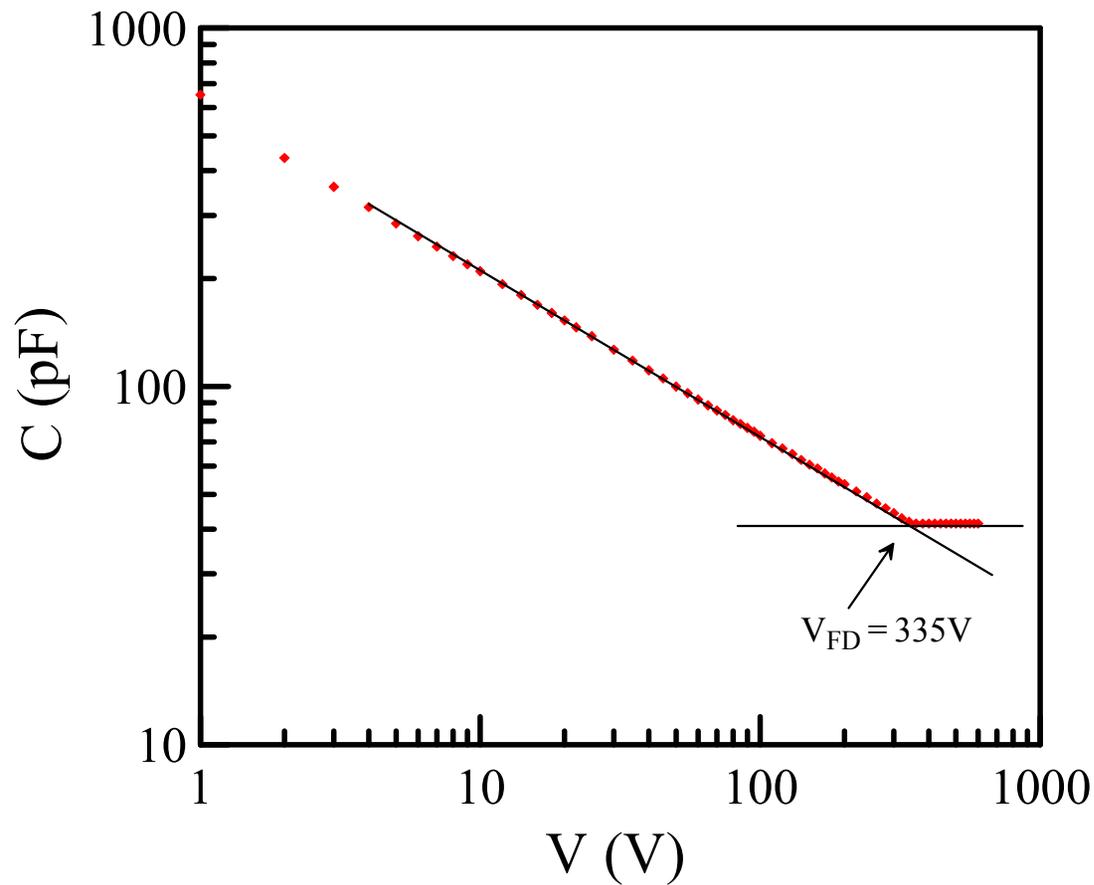
## Dispositivos fabricados

- Detectores de radiación de tipo pad
  - Estructura p<sup>+</sup>-v-n<sup>+</sup>
  - Área activa 5x5 cm<sup>2</sup>
  - Un anillo de guarda: 200 μm de ancho a 100 μm del diodo central



- Irradiados con protones de 24 GeV/c del CERN-PS hasta 10<sup>15</sup> cm<sup>-2</sup>

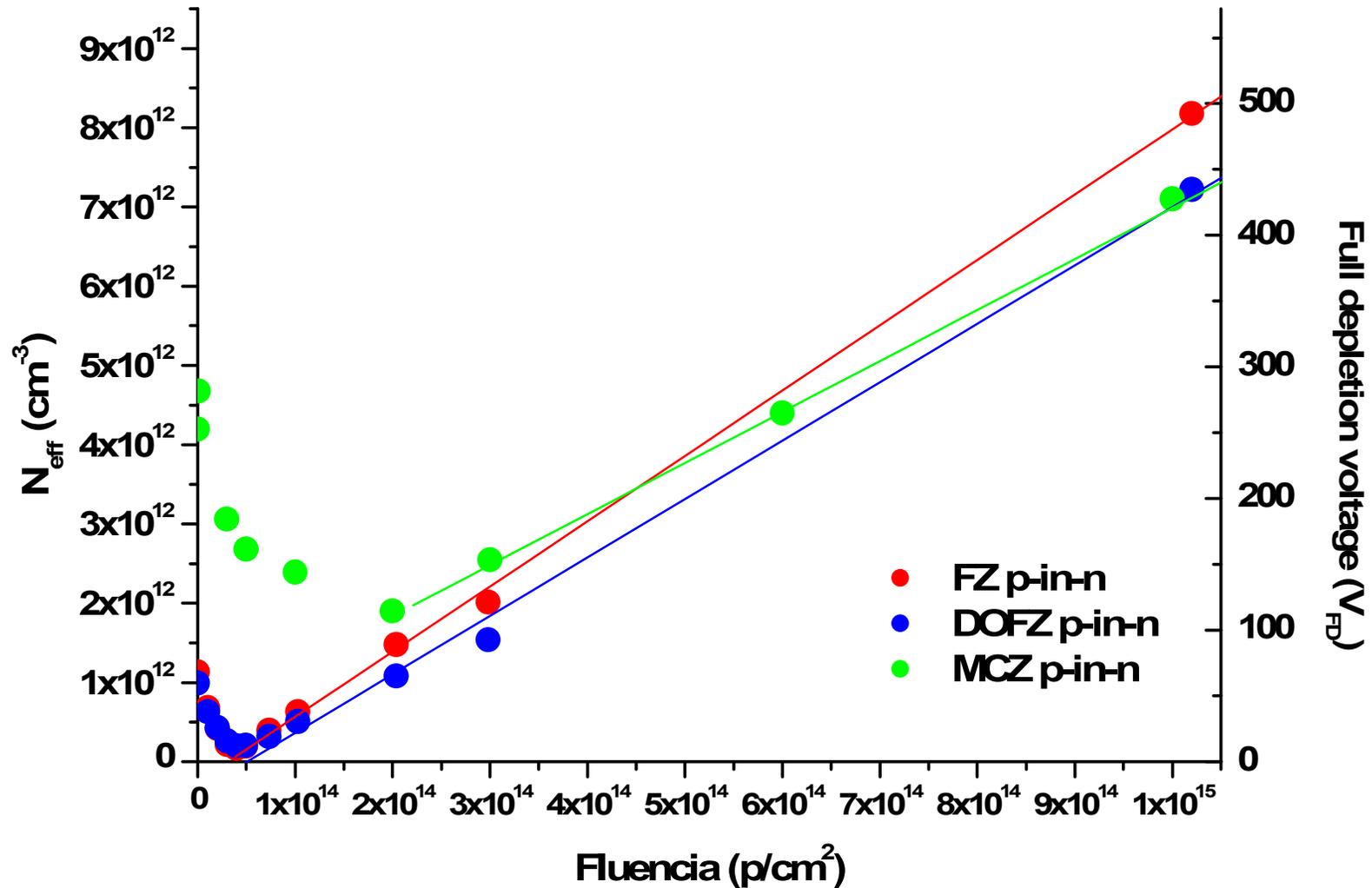
## Cálculo de $V_{FD}$ y $N_{eff}$



Curvas C-V  
obtenidas con una  
señal de 10 kHz de  
amplitud 1 V  
superpuesta al nivel  
de continua.

$$V_{FD} = q|N_{eff}|d^2/2\epsilon_0\epsilon_{Si}$$

## Dependencia de $V_{FD}$ con la fluencia



## Dependencia de $V_{FD}$ con la fluencia

- Ritmo de variación del dopaje  $\beta$ :

<b>Substrato</b>	<b>Conc. oxígeno (cm<sup>-3</sup>)</b>	<b><math>\beta</math> (10<sup>-3</sup>cm<sup>-1</sup>)</b>
<b>FZ</b>	$8.6 \times 10^{15}$	$8.2 \pm 0.2$
<b>DOFZ</b>	$1.7 \times 10^{17}$	$7.3 \pm 0.3$
<b>MCZ</b>	$4.6 \times 10^{17}$	$6.4 \pm 0.2$

- Clara superioridad del substrato MCz para altas dosis de radiación

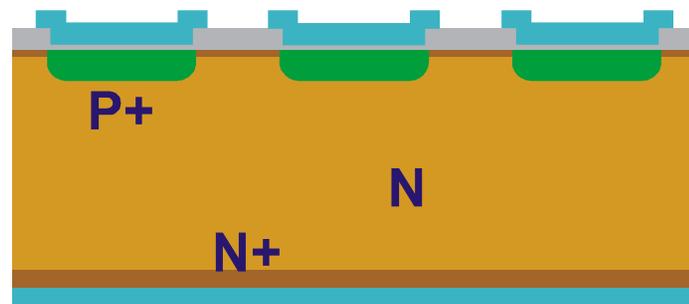
## Conclusiones (1)

- ❑ Detectores de radiación de tipo pad se fabricaron en substratos FZ, DOFZ y MCZ y se irradiaron con diferentes fluencias de protones de 24 GeV hasta  $10^{16}$  cm<sup>-2</sup>.
- ❑ La inversión de los substratos FZ y DOFZ se produce a una fluencia aproximada de  $3 \times 10^{13}$  protones/cm<sup>-2</sup>. El comportamiento del material oxigenado es algo mejor ya que la variación de  $N_{\text{eff}}$  se produce más lentamente que en el silicio FZ.
- ❑ Los detectores fabricados en silicio MCZ no sufren inversión del substrato, aunque sí un incremento continuo de  $V_{\text{FD}}$ .
- ❑ El silicio MCZ es un material muy prometedor para la fabricación de detectores resistentes a dosis de radiación tan elevadas como las previstas en el futuro sLHC
- ❑ Debido a la relativamente baja resistividad de partida del material MCZ el silicio DOFZ mantiene su superioridad a dosis de radiación bajas

# Tecnología de detectores de partículas de silicio resistentes a altas dosis de radiación

1. Estudio del efecto de altas dosis de radiación en detectores fabricados sobre substratos de silicio FZ, DOFZ y MCZ
2. Caracterización de detectores de micropistas N-sobre-N fabricados sobre diferentes substratos de silicio

## Estructuras de diodos detectores de radiación: P sobre N

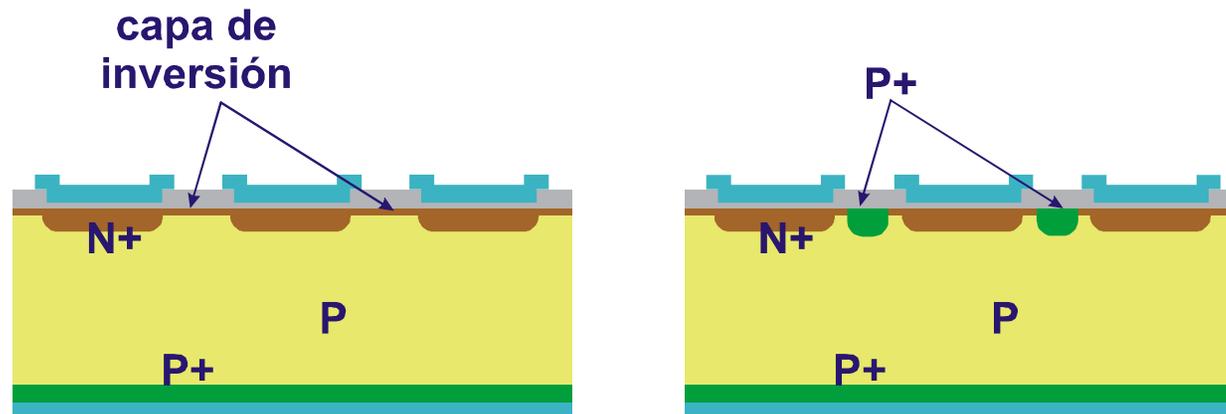


Procesado simple

Se leen huecos: velocidad de la señal baja

Poca resistencia a la radiación (inversión del sustrato)

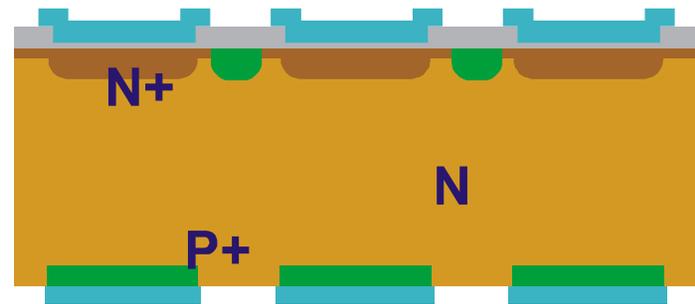
## Estructuras de diodos detectores de radiación: N sobre P



Alta velocidad de la señal: se  
leen electrones  
Mayor resistencia a la  
radiación

Necesita aislamiento entre los  
electrodos  
Obleas p de alta resistividad son  
(por ahora) poco comunes

## Estructuras de diodos detectores de radiación: N sobre N



- Alta velocidad de la señal: se leen e-
- Mejor respuesta frente a la radiación:
  - Antes de irradiar: unión P-N en el dorso
  - Tras la inversión: ZCE crece del lado de las micropistas N: eficiente colección de carga incluso sin un vaciamiento total

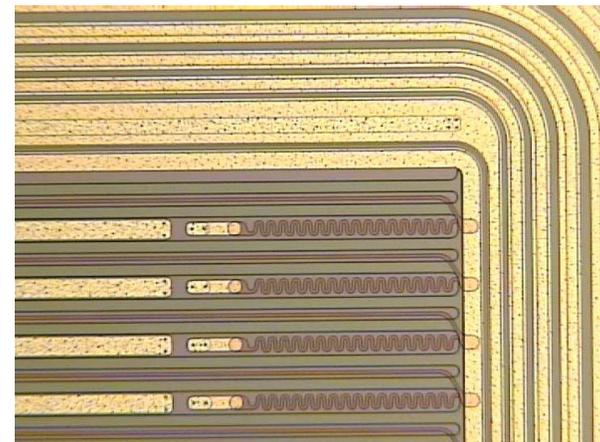
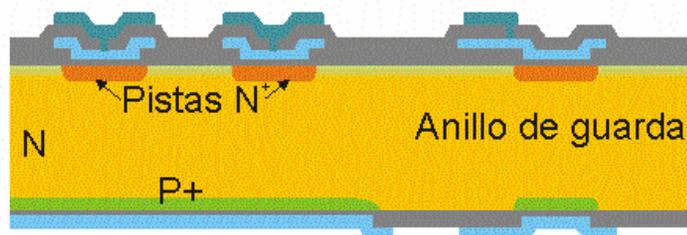
### Tecnología compleja:

- Aislamiento entre las pistas
- Procesado de doble cara para definir el contacto del dorso

Objetivos del trabajo: fabricación y caracterización de detectores de radiación de micropistas N sobre N. Comparación del funcionamiento de distintos substratos: FZ, DOFZ, MCZ

## Diseño de los detectores

- ❑ N-sobre-N
- ❑ Diseñados por la Universidad de Liverpool y el IMB-CNM.
- ❑ 128 micropistas por detector.
- ❑  $3 \times 2 \text{ cm}^2$
- ❑ Aislamiento entre las pistas  $N^+$  mediante una implantación P (*p-spray*).
- ❑ Pistas polarizadas via resistencias de polisilicio conectadas a un anillo de polarización.
- ❑ Acoplo capacitivo de la señal.
- ❑ Líneas de transmisión de la señal en un segundo nivel de metal: lectura de la señal independiente de la geometría de las micropistas (DELPHI, LHCb-VELO).
- ❑ Anillo de guarda múltiple.



## Obleas procesadas

Obleas	1-2	3-4	5-6
<b>Fabricante</b>	Topsil	Topsil	Okmetic
<b>Substrato</b>	FZ	DOFZ	MCZ
<b>Orientación</b>	{100}	{100}	{100}
<b>Dopante</b>	P	P	P
<b>[O] (cm<sup>-3</sup>)</b>	< 10 <sup>16</sup>	10 <sup>17</sup>	2-5 × 10 <sup>17</sup>
<b>ρ (kΩ·cm)</b>	1-5	1-5	0.86-0.99
<b>Espesor (μm)</b>	280 ± 15	280 ± 15	300 ± 10

- Posible problema de donadores térmicos en substratos DOFZ, MCZ
  - Generalmente los átomos de oxígeno ocupan posiciones intersticiales en la red cristalina y no son eléctricamente activos.
  - Formación de donadores en el rango de los 450°C: evitar procesos térmicos prolongados en esta franja de temperatura

## Caracterización eléctrica: medidas C-V

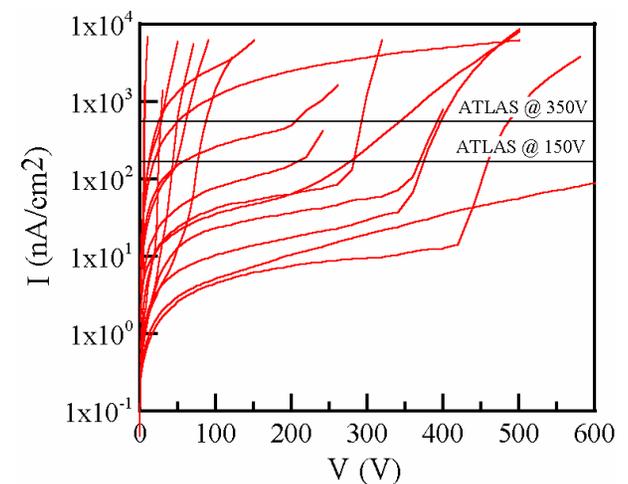
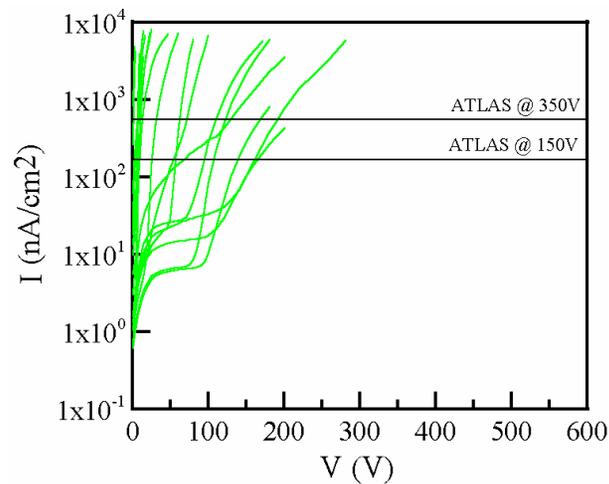
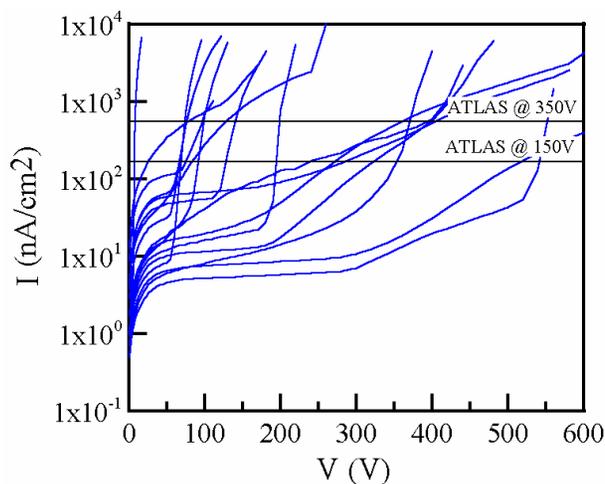
- Obtenidas con una señal de 10 kHz de amplitud 1 V superpuesta al nivel de continua.

Substrato	FZ	DOFZ	MCZ
$V_{FD}$ (V)	$57 \pm 4$	$53 \pm 3$	$330 \pm 6$
$N_{eff}$ (cm <sup>-3</sup> )	$(9.5 \pm 0.5) \times 10^{11}$	$(8.8 \pm 0.6) \times 10^{11}$	$(4.8 \pm 0.1) \times 10^{12}$
Resistividad (kΩ·cm)	$4.5 \pm 0.3$	$4.9 \pm 0.3$	$0.90 \pm 0.01$

- Los resultados concuerdan con los valores nominales suministrados por los fabricantes.
- La densidad de donadores térmicos introducidas en el material por el procesamiento en el IMB-CNM es despreciable.

## Caracterización eléctrica: medidas I-V

- Forma más simple de probar la calidad de los dispositivos: casi cada imperfección contribuye a la corriente de fugas.
- Medidas a una temperatura controlada de 20°C.
- Anillos de guarda no polarizados.



- Dispositivos DOFZ: tensiones de ruptura muy bajas.**
- FZ y CZ: corrientes de fuga bajas y tensiones de ruptura normalmente mayores que  $V_{FD}$ : operación como detectores posible.**

## Conclusiones (2)

- ❑ El IMB-CNM y la Universidad de Liverpool han desarrollado con éxito una tecnología para la fabricación de detectores de micropistas N-sobre-N.
- ❑ Para comparar el comportamiento de distintos substratos de silicio, los dispositivos se han procesado sobre obleas Float Zone estándar y oxigenadas y Czochralski magnético de alta resistividad.
- ❑ El comportamiento en términos de corriente de fugas y tensión de ruptura de los detectores fabricados en substratos FZ y MCz es satisfactorio y demuestra que la nueva tecnología es adecuada para la fabricación de detectores N-sobre-N. Sin embargo, los dispositivos fabricados en silicio DOFZ rompen a tensiones demasiado bajas. Las causas de este comportamiento todavía no están claras.
- ❑ El proceso de fabricación no cambió la resistividad de las muestras: no se crearon donadores térmicos ni siquiera en las obleas con el mayor contenido en oxígeno.
- ❑ Los detectores se sometieron a una irradiación con protones de 24 GeV/c hasta una fluencia de  $10^{16}$  cm<sup>-2</sup> en las instalaciones del CERN PS. Los estudios del efecto de la radiación se están llevando a cabo en este momento.

## Agradecimientos

- ▣ Trabajos financiados parcialmente por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología bajo el proyecto FPA2003-03878-C02-02

Para más información:

<http://www.cnm.es/projects/ATLAS>