

Detectores de estado sólido

LA-CoNGA Physics- Módulo de instrumentación

Sergio Díez Cornell, (DESY, Alemania)



Latin American alliance for
Capacity build**ING** in Advanced physics
LA-CoNGA physics



Cofinanciado por el
programa Erasmus+
de la Unión Europea



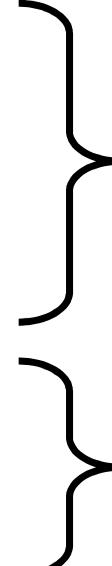


Índice

1. Introducción
2. Física de semiconductores
3. Principios de detección
4. Tipos de detectores y aplicaciones
5. Efectos de la radiación



Índice

- 1. Introducción
 - 2. Física de semiconductores
 - 3. Principios de detección
 - 4. Tipos de detectores y aplicaciones
 - 5. Efectos de la radiación
- 
- Parte I
- Parte II

Detectores de estado
sólido

≈

detectores de
semiconductor





Un poco de historia...

Los semiconductores se han usado para la identificación de partículas desde hace más de 60 años

~1950: descubrimiento de la unión n-p como detector de partículas



Un poco de historia...

Los semiconductores se han usado para la identificación de partículas desde hace más de 60 años

~1950: descubrimiento de la unión n-p como detector de partículas

Los primeros detectores de semiconductor eran de Germanio (Ge), y se utilizaron para medidas de energía de rayos gamma (~1960)

Los detectores de semiconductor permitieron un gran salto cualitativo para la medida de posición de las partículas desde ~1980

Permiten una segmentación muy fina ($10\text{-}100 \mu\text{m}$) → **resolución**



Un poco de historia...

Los semiconductores se han usado para la identificación de partículas desde hace más de 60 años

~1950: descubrimiento de la unión n-p como detector de partículas

Los primeros detectores de semiconductor eran de Germanio (Ge), y se utilizaron para medidas de energía de rayos gamma (~1960)

Los detectores de semiconductor permitieron un gran salto cualitativo para la medida de posición de las partículas desde ~1980

Permiten una segmentación muy fina ($10\text{-}100 \mu\text{m}$) → **resolución**

Precisión de la medida de posición **dos órdenes de magnitud superior** comparado con las (entonces) muy comunes cámaras de hilos

Permitió por primera vez la medida electrónica de vértices secundarios
→ **medida de vida media de fermiones pesados**



Detectores de semiconductor vs. Detectores de gas



Sólido → mayor densidad → mayor energía depositada por ionización en un mismo volumen → **mayor energía disponible** para generación de portadores de carga



Creación de pares electrón-hueco → ~5 veces menos energía que para creación pares electron-ión en gases → más carga por energía depositada → **mayor resolución en la medida de energía**



Tecnología de microfabricación permite mayor segmentación → **mayor resolución espacial**



Detectores de semiconductor vs. Detectores de gas



Sólido → mayor densidad → mayor energía depositada por ionización en un mismo volumen → **mayor energía disponible** para generación de portadores de carga



Creación de pares electrón-hueco → ~5 veces menos energía que para creación pares electron-ión en gases → más carga por energía depositada → **mayor resolución en la medida de energía**



Tecnología de microfabricación permite mayor segmentación → **mayor resolución espacial**



Mayor densidad → menor longitud de radiación (*radiation length*) → mayor probabilidad de dispersión múltiple y ruido de fondo



Detectores de gran volumen más complejos y costosos



Aplicaciones

Detectores de semiconductor

Física nuclear

Física de partículas

Diagnóstico de rayos X en biología y medicina

Autorradiografía

Dosimetría en tiempo real



Aplicaciones

Detectores de semiconductor

Física nuclear

Física de partículas

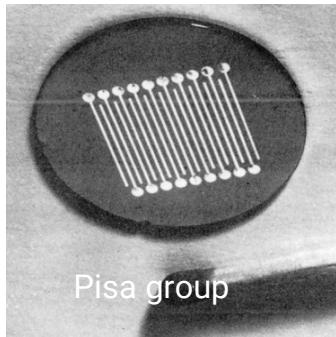
Diagnóstico de rayos X en biología y medicina

Autorradiografía

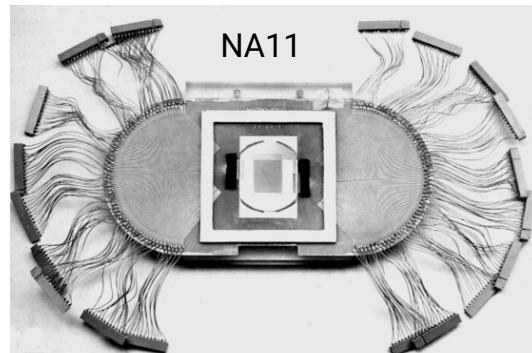
Dosimetría en tiempo real



Semiconductores en física de partículas



Finales de 1970s



1981

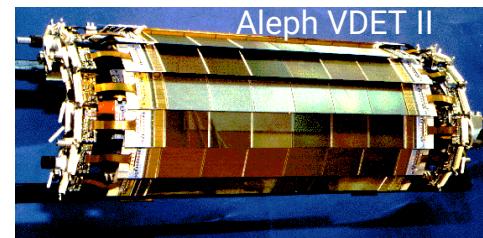


~1987

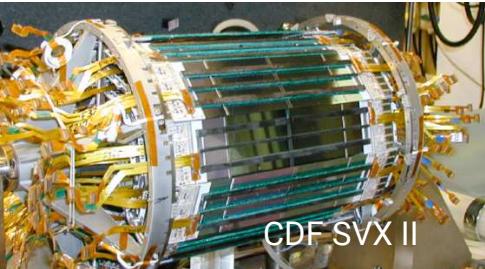


BaBar SVT

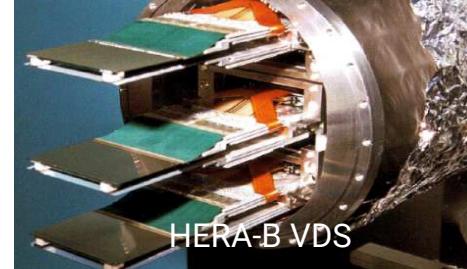
~1998



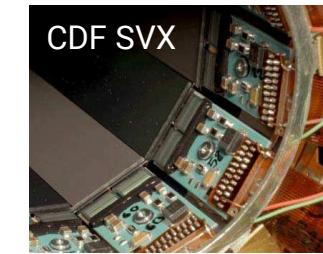
~1995



~1999



~2000



~1992



~2007

Breve introducción a la física de semiconductores





Materiales semiconductores para detectores

Principales tipos de semiconductores utilizados para la detección de partículas o radiación (rayos X o γ):

	Silicio	Germanio	GaAs	CdTe	Diamante
Número atómico (Z)	14	32	31/33	48/52	6
Energía del band gap (E_g) (eV)	1.12	0.66	1.424	1.44	5.5
Resistividad ($\Omega \cdot \text{cm}$)	2.3×10^5	47	10^8	10^9	$\approx 10^{16}$
Energía media para creación pares e/h (eV)	3.65	2.96	4.2	4.43	13.1



Materiales semiconductores para detectores

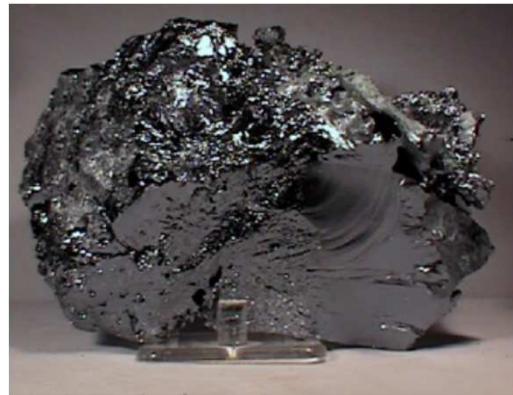
Principales tipos de semiconductores utilizados para la detección de partículas o radiación (rayos X o γ):

	Silicio	Germanio	GaAs	CdTe	Diamante
Número atómico (Z)	14	32	31/33	48/52	6
Energía del band gap (E_g) (eV)	1.12	0.66	1.424	1.44	5.5
Resistividad ($\Omega \cdot \text{cm}$)	2.3×10^5	47	10^8	10^9	$\approx 10^{16}$
Energía media para creación pares e/h (eV)	3.65	2.96	4.2	4.43	13.1



¿Por qué silicio?

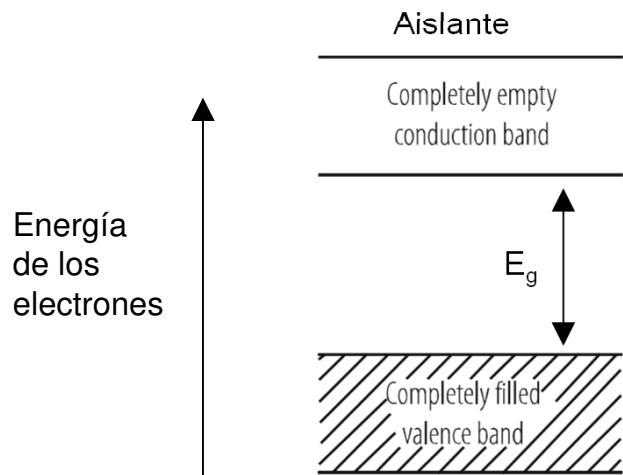
- El silicio constituye el 28% de la masa de la corteza Terrestre (Segundo material más abundante tras el oxígeno)
- El silicio puede doparse de forma muy selectiva y sistemática
- Chips electrónicos se fabrican casi exclusivamente en silicio
- El silicio es el único material que puede producirse de forma industrial en altas cantidades
- Gran estabilidad mecánica permite producir capas muy finas





¿Qué es un semiconductor?

Aunque en los átomos los niveles de energía de los electrones son discretos, en un sólido los niveles energéticos se concentran en “bandas” de energía



- Aislante: $E_g \sim 9$ eV. Muy improbable que una excitación térmica haga saltar a un e^- de la BV a la BC. Flujo de corriente imposible



¿Qué es un semiconductor?

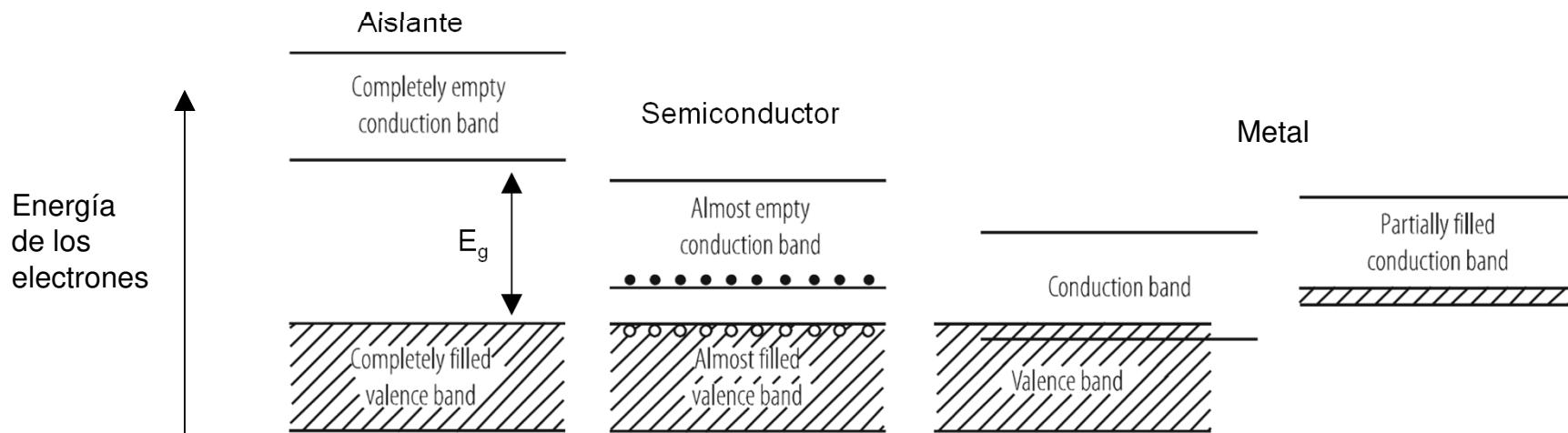
Aunque en los átomos los niveles de energía de los electrones son discretos, en un sólido los niveles energéticos se concentran en “bandas” de energía



- Aislante: $E_g \sim 9$ eV. Muy improbable que una excitación térmica haga saltar a un e^- de la BV a la BC. Flujo de corriente imposible
- Conducto: No hay band gap. Flujo de corriente requiere mínima energía

¿Qué es un semiconductor?

Aunque en los átomos los niveles de energía de los electrones son discretos, en un sólido los niveles energéticos se concentran en “bandas” de energía



- Aislante: $E_g \sim 9$ eV. Muy improbable que una excitación térmica haga saltar a un e^- de la BV a la BC. Flujo de corriente imposible
- Conducto: No hay band gap. Flujo de corriente requiere mínima energía
- **Semiconductor:** $E_g \sim 1$ eV. La barrera BV-BC puede superarse por excitación térmica o aplicando un campo eléctrico externo. Electrones (e) y huecos (h) libres se forman. Flujo de corriente posible

En silicio, $E_g = 1.12$ eV, pero **hacen falta 3.6 eV para ionizar un átomo** (el resto de la energía se convierte en fonones (calor))



Semiconductores intrínsecos

Recordatorio 1: los electrones (y huecos) son fermiones (espín semientero), por lo que se rigen por la estadística de Dirac – Fermi:

Función de Fermi: probabilidad de ocupación de los estados de energía de electrones disponibles a una temperatura dada:

$$f(E) = \frac{1}{e^{\left(\frac{E - E_f}{\kappa T}\right)} + 1}$$

Nivel de Fermi (E_f): (hipotético) Nivel de energía del sólido que, en condición de equilibrio termodinámico, posee una probabilidad del 50% de ser ocupado por un electrón

En un **semiconductor intrínseco** (no dopado), E_f se encuentra en el **punto medio de la banda prohibida (band gap)**

A $T= 0\text{ K}$, $f(E)$ es una función escalón centrada en E_f , es decir, todos los niveles (bandas) por encima del nivel de Fermi están vacíos, y todos los niveles por debajo de E_f están llenos



Semiconductores intrínsecos

Recordatorio 1: los electrones (y huecos) son fermiones (espín semientero), por lo que se rigen por la estadística de Dirac – Fermi:

Función de Fermi: probabilidad de ocupación de los estados de energía de electrones disponibles a una temperatura dada:

$$f(E) = \frac{1}{e^{\left(\frac{E - E_f}{\kappa T}\right)} + 1}$$

Nivel de Fermi (E_f): (hipotético) Nivel de energía del sólido que, en condición de equilibrio termodinámico, posee una probabilidad del 50% de ser ocupado por un electrón

En un **semiconductor intrínseco** (no dopado), E_f se encuentra en el **punto medio de la banda prohibida (band gap)**

A $T= 0 K$, $f(E)$ es una función escalón centrada en E_f , es decir, todos los niveles (bandas) por encima del nivel de Fermi están vacíos, y todos los niveles por debajo de E_f están llenos

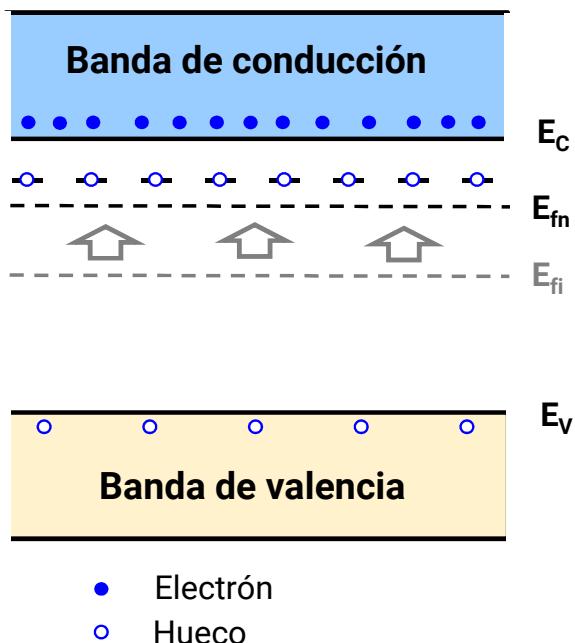
Recordatorio 2: ley de acción de masa

En equilibrio térmico, los procesos de generación y recombinación de electrones en la BC y de huecos en la BV están en balance, es decir, $n = p = n_i$, o dicho de otro modo:

$$n \cdot p = n_i^2 = const$$

Semiconductores extrínsecos: el dopaje

Las propiedades eléctricas de los semiconductores se pueden modificar introduciendo átomos de impurezas



Semiconductor tipo n:

- Impurezas de átomos donantes (tipo V) introducen niveles de energía muy cerca de la banda de conducción y se ionizan
- El nivel de Fermi se desplaza hacia la BC
- Los **electrones** se convierten en los **portadores de carga mayoritarios**:
- Los huecos son portadores minoritarios

$$n_n \approx N_D$$

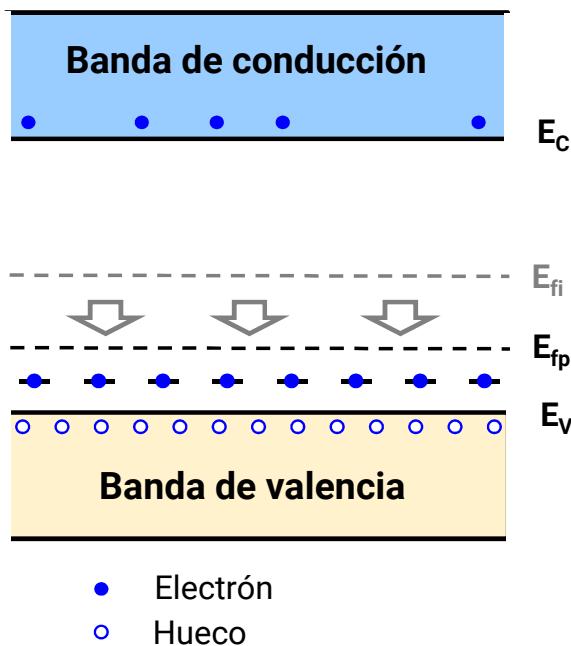
N_D : concentración
átomos donantes (cm^{-3})

$$p_n \approx n_i^2 / N_D$$



Semiconductores extrínsecos: el dopaje

Las propiedades eléctricas de los semiconductores se pueden modificar introduciendo átomos de impurezas



Semiconductor tipo p:

- Impurezas de átomos aceptores (tipo III) introducen niveles de energía muy cerca de la banda de valencia, de la que “extraen” electrones
- El nivel de Fermi se desplaza hacia la BV
- Los **huecos** se convierten en los **portadores de carga mayoritarios**:
- Los electrones son portadores minoritarios

N_A : concentración
átomos aceptores (cm^{-3})

$$p_p \approx N_A$$

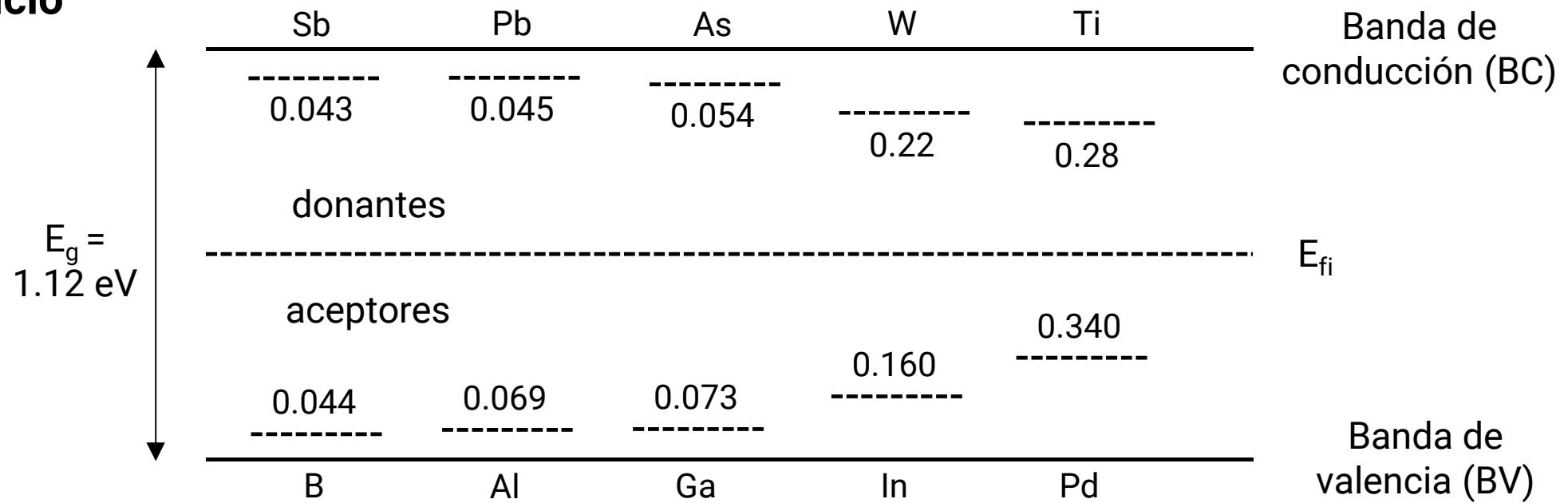
$$n_p \approx n_i^2 / N_A$$



Semiconductores extrínsecos: el dopaje

Las propiedades eléctricas de los semiconductores se pueden modificar introduciendo átomos de impurezas

Silicio

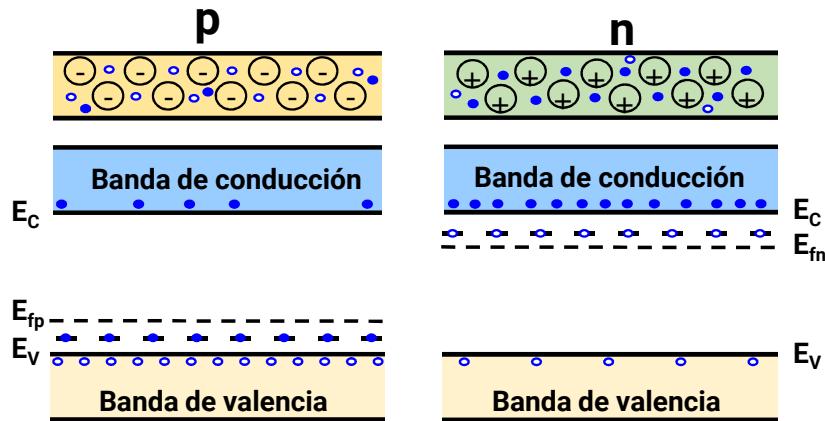




La unión p-n: la base de los detectores de semiconductor

Semiconductor p: $N_A > N_D$, E_f cerca de la BV

Semiconductor n: $N_D > N_A$, E_f cerca de la BC

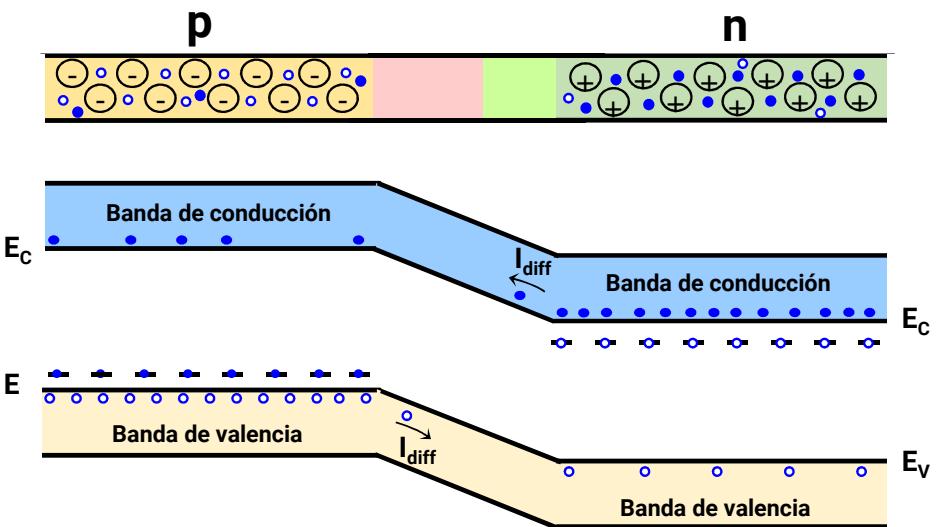


La unión p-n: la base de los detectores de semiconductor

Semiconductor p: $N_A > N_D$, E_f cerca de la BV

Semiconductor n: $N_D > N_A$, E_f cerca de la BC

Corriente de difusión, I_{diff} hasta alcanzar el eq térmico





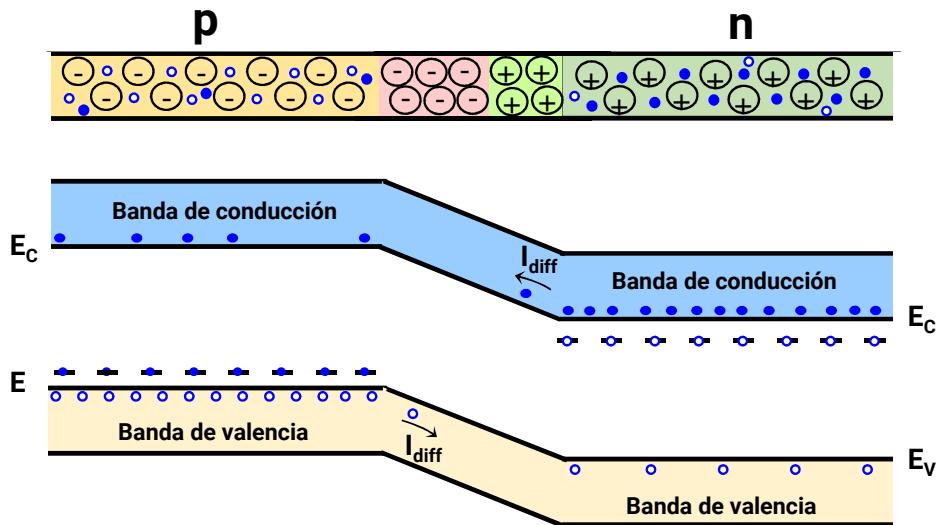
La unión p-n: la base de los detectores de semiconductor

Semiconductor p: $N_A > N_D$, E_f cerca de la BV

Semiconductor n: $N_D > N_A$, E_f cerca de la BC

Corriente de difusión, I_{diff} hasta alcanzar el eq térmico

Recombinación en la unión genera una zona vacía de portadores de carga, la zona de “vaciado” o “agotamiento” (depletion region), también llamada **zona de carga espacial** (no hay portadores, pero sí hay densidad de carga espacial)





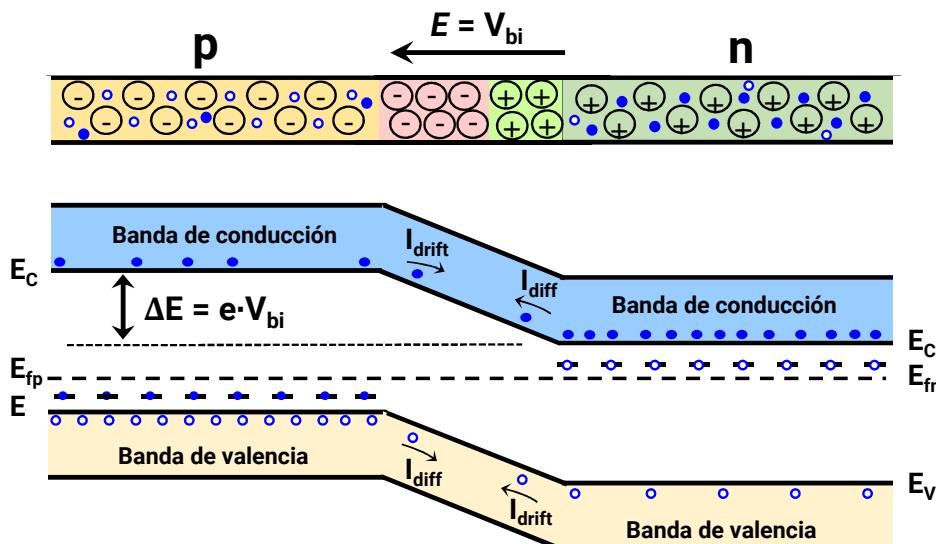
La unión p-n: la base de los detectores de semiconductor

Semiconductor p: $N_A > N_D$, E_f cerca de la BV

Semiconductor n: $N_D > N_A$, E_f cerca de la BC

Corriente de difusión, I_{diff} hasta alcanzar el eq térmico

Recombinación en la unión genera una zona vacía de portadores de carga, la zona de “vaciado” o “agotamiento” (depletion region), también llamada **zona de carga espacial** (no hay portadores, pero sí hay densidad de carga espacial)



Las densidades de carga resultantes generan un campo eléctrico interno $|E| = V_{bi}$ que genera la **corriente de arrastre** (“drift”), I_{drift} en sentido contrario a I_{diff}

El **nivel de Fermi** se mantiene **constante** en equilibrio térmico y los niveles de energía se curvan en la unión



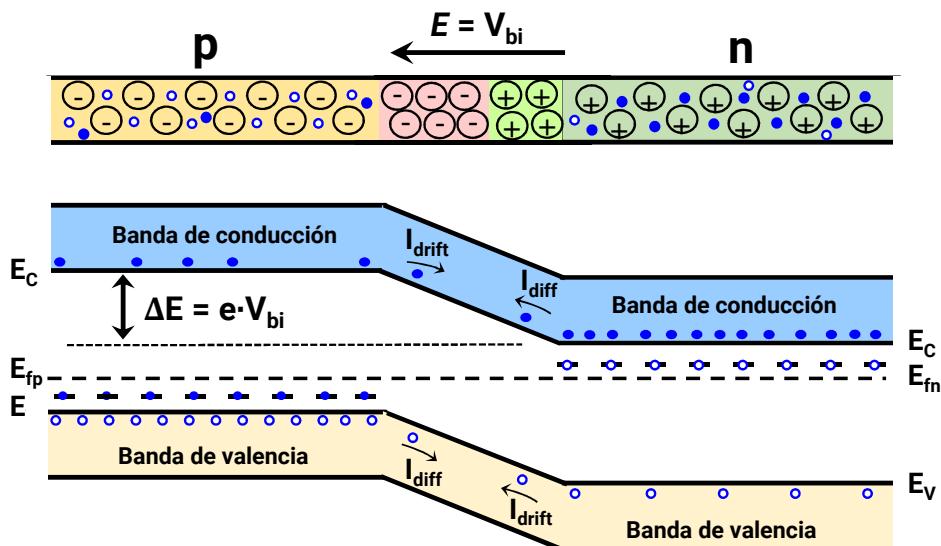
La unión p-n: la base de los detectores de semiconductor

Semiconductor p: $N_A > N_D$, E_f cerca de la BV

Semiconductor n: $N_D > N_A$, E_f cerca de la BC

Corriente de difusión, I_{diff} hasta alcanzar el eq térmico

Recombinación en la unión genera una zona vacía de portadores de carga, la zona de “vaciado” o “agotamiento” (depletion region), también llamada **zona de carga espacial** (no hay portadores, pero sí hay densidad de carga espacial)



Uniones n⁺-n o p⁺-p (regiones con diferentes concentraciones del mismo tipo de dopante) se comportan de forma similar a la unión p-n



Aplicando tensión externa a la unión pn

Aplicar un voltaje externo entre la unión permite modificar la región de vaciado

- El sistema ya no se encuentra en condiciones de equilibrio térmico:
- el nivel de Fermi ya no es constante en la unión



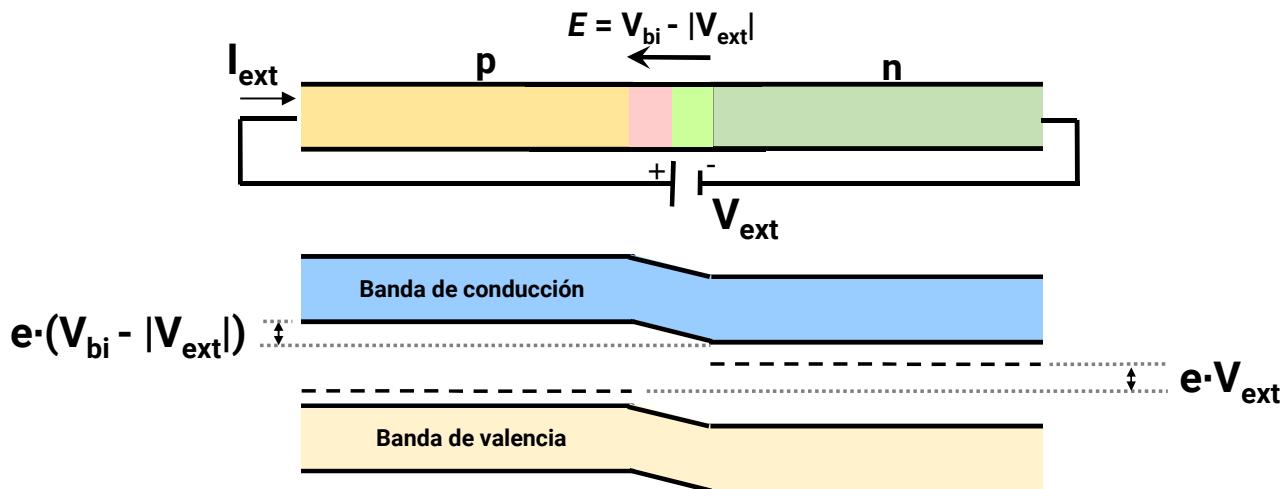
Aplicando tensión externa a la unión pn

Aplicar un voltaje externo entre la unión permite modificar la región de vaciado

- El sistema ya no se encuentra en condiciones de equilibrio térmico:
- el nivel de Fermi ya no es constante en la unión

Polarización directa: Se favorece la corriente de difusión I_{diff}

- se **reduce** el tamaño de la **región de vaciado**
- se reduce el curvado de bandas
- se favorece la recombinación de carga





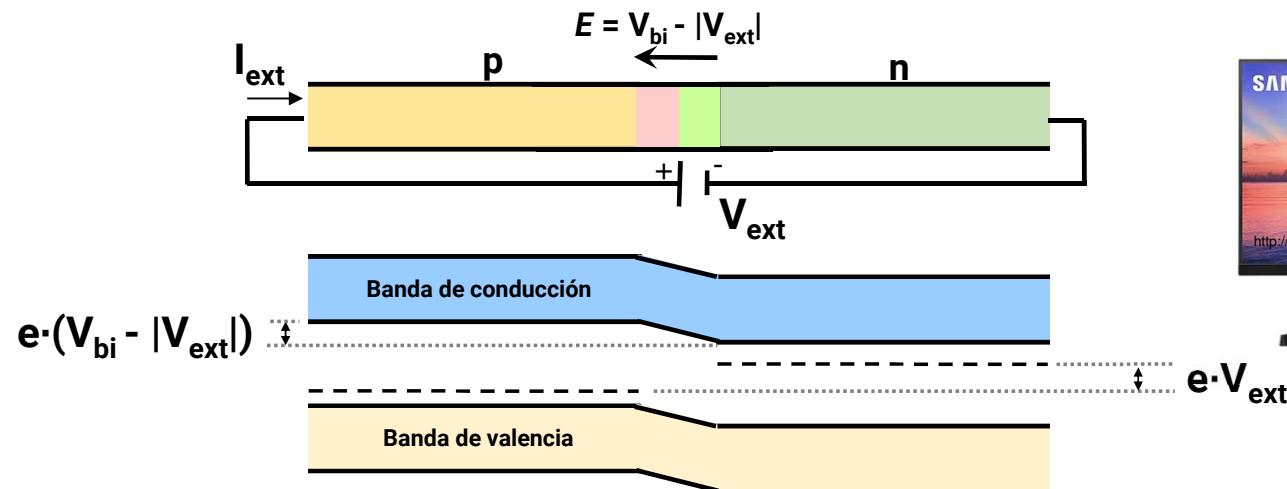
Aplicando tensión externa a la unión pn

Aplicar un voltaje externo entre la unión permite modificar la región de vaciado.

- El sistema ya no se encuentra en condiciones de equilibrio térmico:
- el nivel de Fermi ya no es constante en la unión

Polarización directa: Se favorece la corriente de difusión I_{diff}

- se **reduce** el tamaño de la **región de vaciado**
- se reduce el curvado de bandas
- se favorece la recombinación de carga
- recombinación: emisión de fotones (luz)





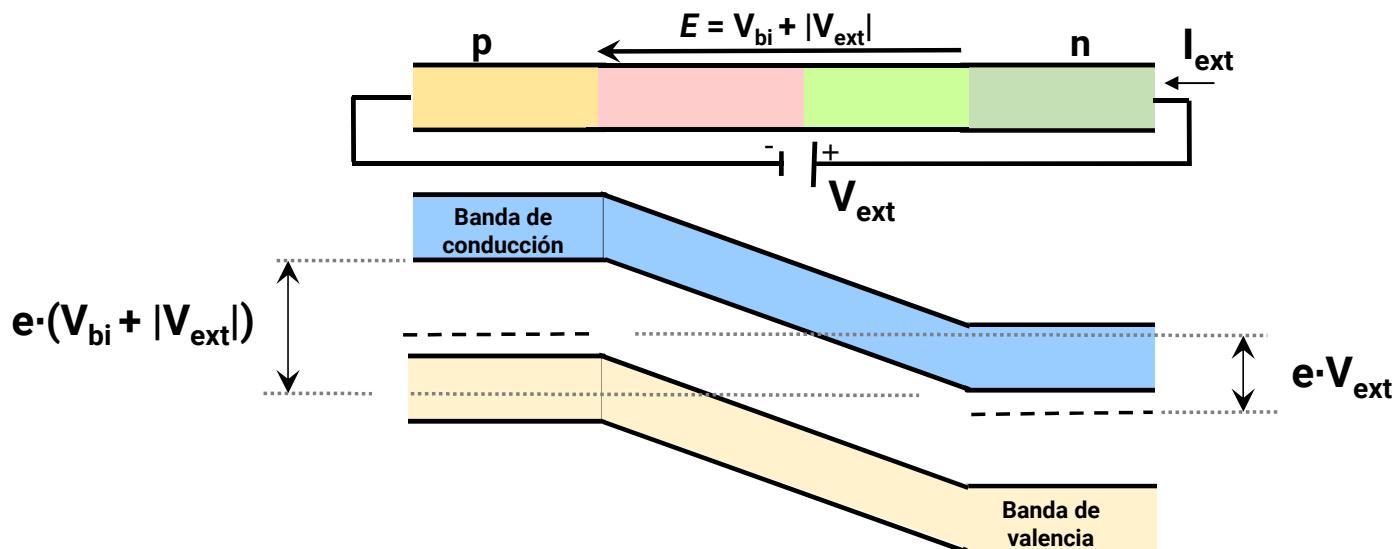
Aplicando tensión externa a la unión pn

Aplicar un voltaje externo entre la unión permite modificar la región de vaciado.

- El sistema ya no se encuentra en condiciones de equilibrio térmico:
- el nivel de Fermi ya no es constante en la unión

Polarización inversa: Se favorece la corriente de arrastre I_{drift}

- se **incrementa** el tamaño de la **región de vaciado**
- se incrementa el curvado de bandas
- se favorece la captura y colección de carga en la unión





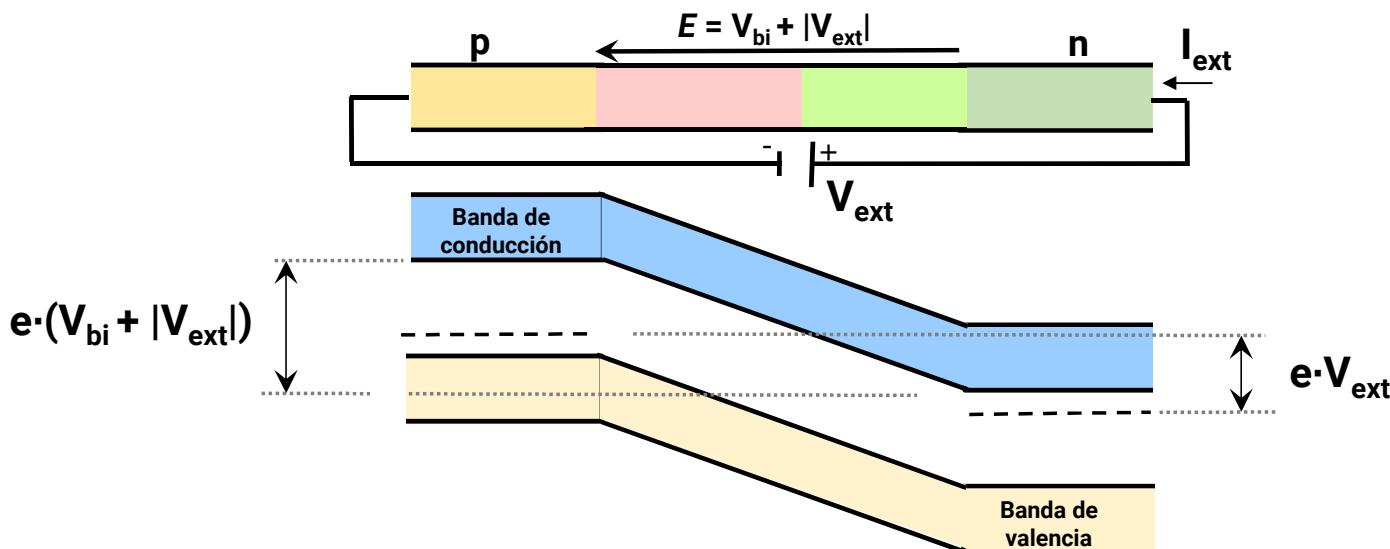
Aplicando tensión externa a la unión pn

Aplicar un voltaje externo entre la unión permite modificar la región de vaciado.

- El sistema ya no se encuentra en condiciones de equilibrio térmico:
- el nivel de Fermi ya no es constante en la unión

Polarización inversa: Se favorece la corriente de arrastre I_{drift}

- se **incrementa** el tamaño de la **región de vaciado**
- se incrementa el curvado de bandas
- se favorece la captura y colección de carga en la unión



Anchura de la region de vaciado:

$$d_{n,p} \approx \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0}{e} \frac{1}{N_{D,A}} (V_{bi} + V_{ext})}$$

ϵ : permitividad eléctrica

ϵ_0 : permitividad eléctrica del vacío



Aplicando tensión externa a la unión pn

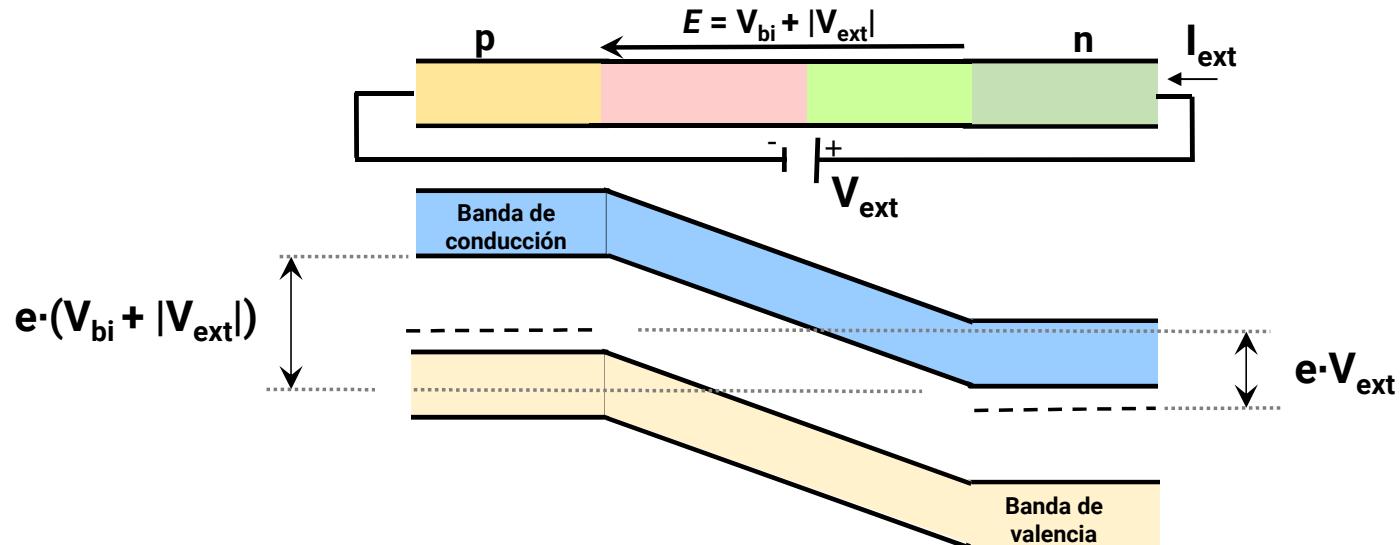
Aplicar un voltaje externo entre la unión permite modificar la región de vaciado.

- El sistema ya no se encuentra en condiciones de equilibrio térmico:
- el nivel de Fermi ya no es constante en la unión



Polarización inversa: Se favorece la corriente de arrastre I_{drift}

- se **incrementa** el tamaño de la **región de vaciado**
- se incrementa el curvado de bandas
- se favorece la captura y colección de carga en la unión





Aplicando tensión externa a la unión pn

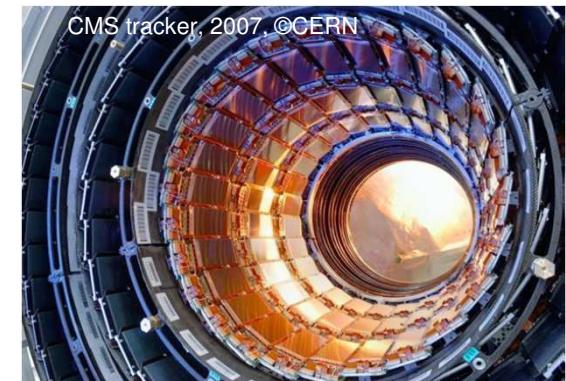
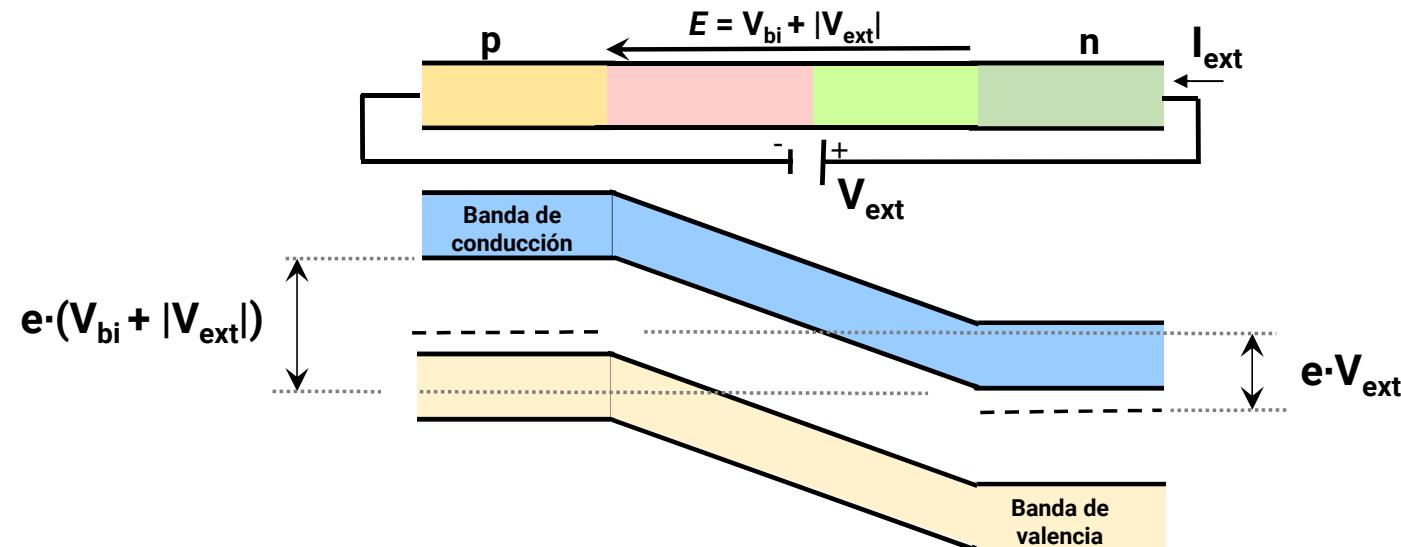
Aplicar un voltaje externo entre la unión permite modificar la región de vaciado.

- El sistema ya no se encuentra en condiciones de equilibrio térmico:
- el nivel de Fermi ya no es constante en la unión



Polarización inversa: Se favorece la corriente de arrastre I_{drift}

- se **incrementa** el tamaño de la **región de vaciado**
- se incrementa el curvado de bandas
- se favorece la captura y colección de carga en la unión
- se obtiene un **detector de partículas**



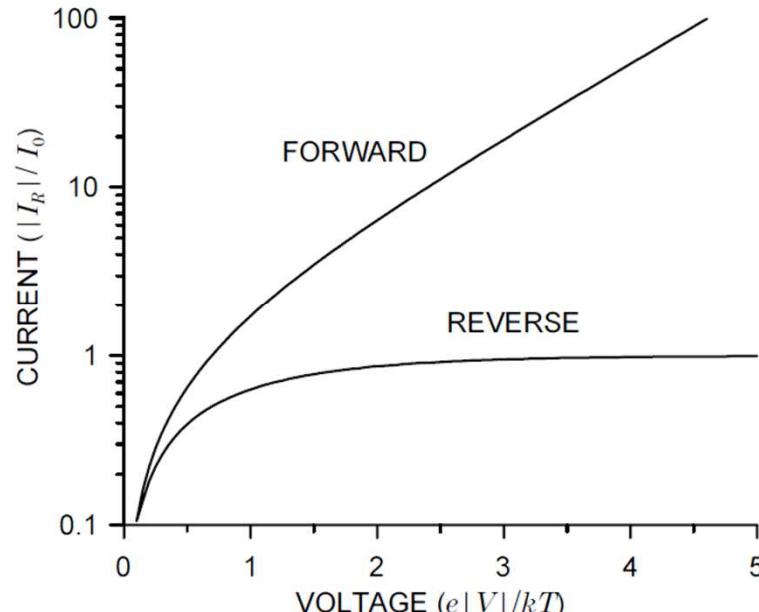
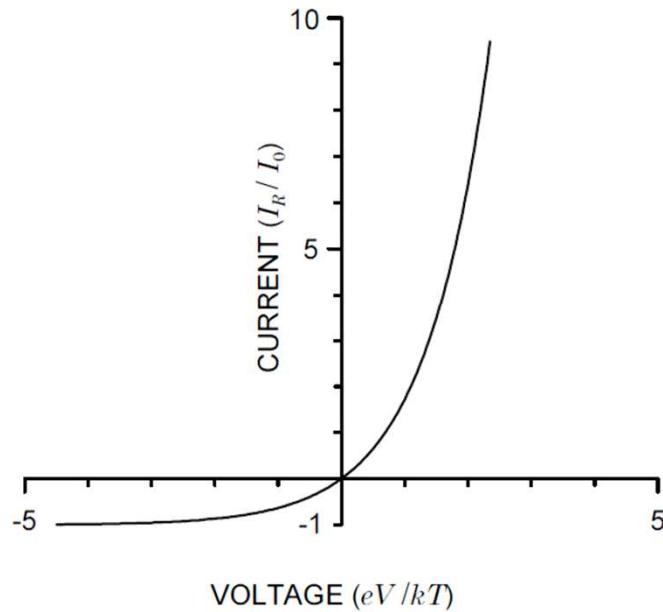


Característica I/V de la unión pn

Curva I/V característica de un diodo semiconductor: **ecuación de Shockley:**

$$I = I_0 \left(e^{eV_{ext}/kT} - 1 \right)$$

I_0 : corriente inversa de saturación



H. Spieler, 2005, © Oxford University Press

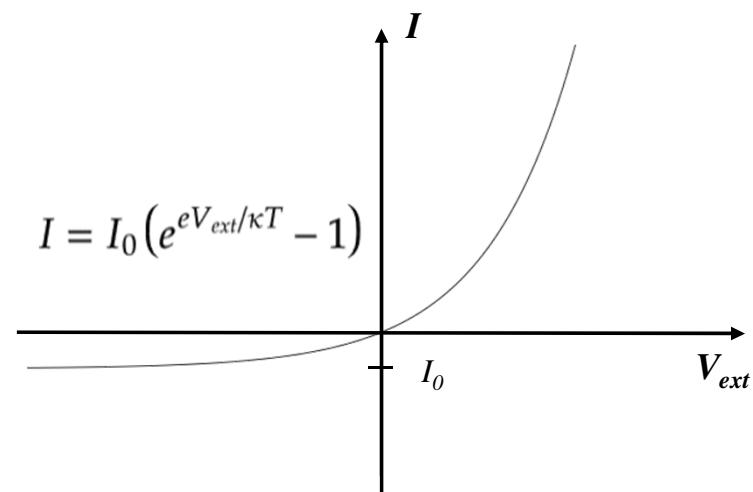


Corriente de fugas

La **corriente de fugas** (leakage current) I_L es la corriente observada en un diodo con polarización inversa

En un diodo ideal, es igual a la corriente de saturación, $I_L = I_0$:

→ Componente proveniente de la corriente de difusión





Corriente de fugas

La **corriente de fugas** (leakage current) I_L es la corriente observada en un diodo con polarización inversa

En un diodo ideal, es igual a la corriente de saturación, $I_L = I_0$:

→ Componente proveniente de la corriente de difusión

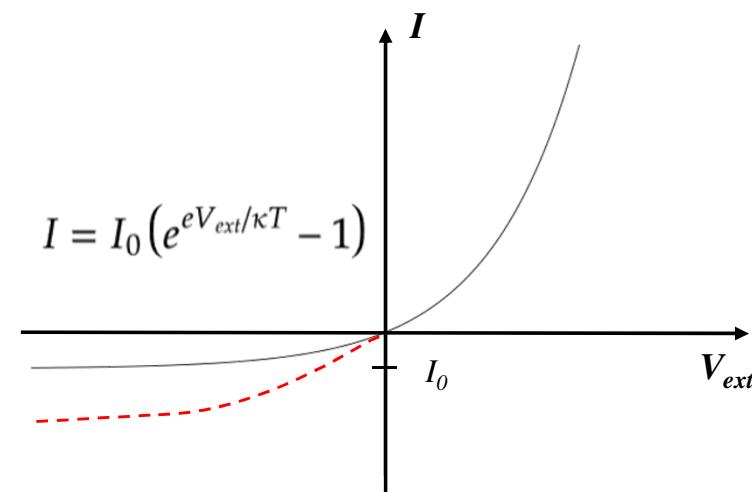
En realidad, muchos factores, volumétricos y superficiales, contribuyen a I_L

- El principal es la **generación térmica de pares e-h** en la región de vaciado (volumétrico)
→ Las impurezas actúan como centros de generación/recombinación

$$I_L^{gen} \propto T^2 \exp\left(-\frac{E_a}{2\kappa T}\right) \quad E_a: \text{energía de activación}$$

- Superficiales: daños, residuos o impurezas en la superficie, depósito de materiales, humedad,...

La contribución volumétrica suele ser dominante





Corriente de fugas

La **corriente de fugas** (leakage current) I_L es la corriente observada en un diodo con polarización inversa

En un diodo ideal, es igual a la corriente de saturación, $I_L = I_0$:

→ Componente proveniente de la corriente de difusión

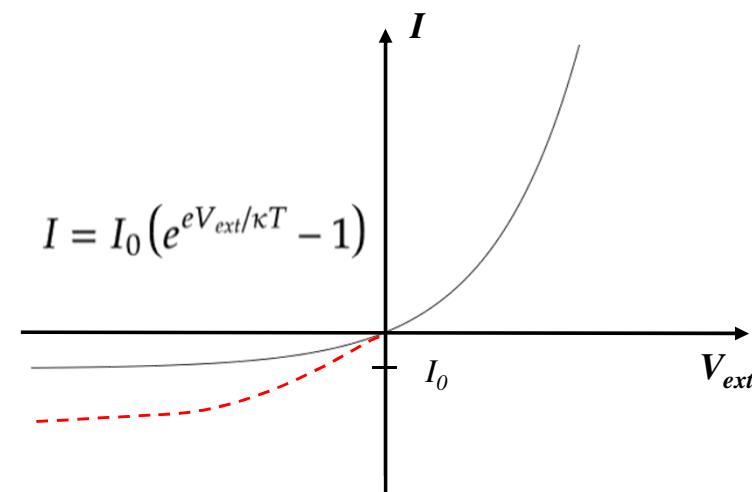
En realidad, muchos factores, volumétricos y superficiales, contribuyen a I_L

- El principal es la **generación térmica de pares e-h** en la región de vaciado (volumétrico)
→ Las impurezas actúan como centros de generación/recombinación

$$I_L^{gen} \propto T^2 \exp\left(-\frac{E_a}{2\kappa T}\right) \quad E_a: \text{energía de activación}$$

- Superficiales: daños, residuos o impurezas en la superficie, depósito de materiales, humedad,...

La contribución volumétrica suele ser dominante



I_L determina el ruido en la corriente de un detector de semiconductor

I_L tiene una fuerte dependencia con la temperatura



Capacitancia

La zona de carga espacial (ZCE) de una unión pn (= **diodo**) está libre de portadores de carga

→ Un diodo superficial se puede aproximar a un condensador de placas (regiones p, n) con un dieléctrico entre medio (ZCE):

d depende del voltaje externo aplicado

$$\frac{C}{A} = \frac{\epsilon \epsilon_0}{d}$$

En un diodo típico de silicio
de 300 μm de grosor:

$$\frac{C}{A} \approx 35 \text{ } \mu\text{F/cm}^2$$



Capacitancia

La zona de carga espacial (ZCE) de una unión pn (= **diodo**) está libre de portadores de carga

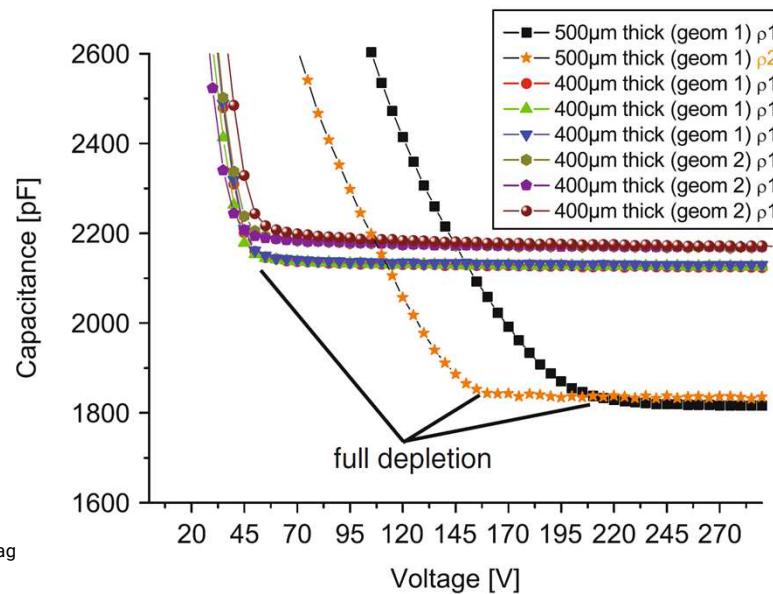
→ Un diodo superficial se puede aproximar a un condensador de placas (regiones p, n) con un dieléctrico entre medio (ZCE):

$$\frac{C}{A} = \frac{\epsilon \epsilon_0}{d}$$

d depende del voltaje externo aplicado

→ la medida de capacitancia determina el **voltaje de desertización (full depletion voltage)**: voltaje necesario para vaciar de portadores de carga el volumen completo de un diodo o sensor

Curva característica C-V:



F. Hartmann, 2009, © Springer-Verlag
Berlin Heidelberg

Detección de partículas con detectores de semiconductor





Detectores de semiconductor

Los detectores de semiconductor son variaciones del diodo p-n en polarización inversa

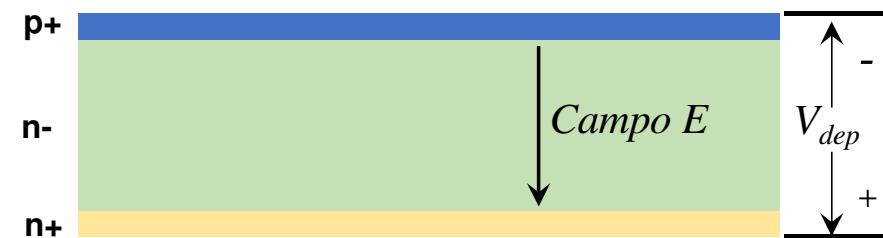
La inmensa mayoría de detectores de semiconductor de trazado (tracking) e imagen de la actualidad utilizan el silicio como material base

GaAs, CdTe, diamante CVD (deposición química de vapor), y Ge son semiconductores alternativos también utilizados como detectores en algunas aplicaciones



Detectores de semiconductor: principio de funcionamiento

Todos los detectores de trazado parten del mismo principio: **la unión pn polarizada en inversa**





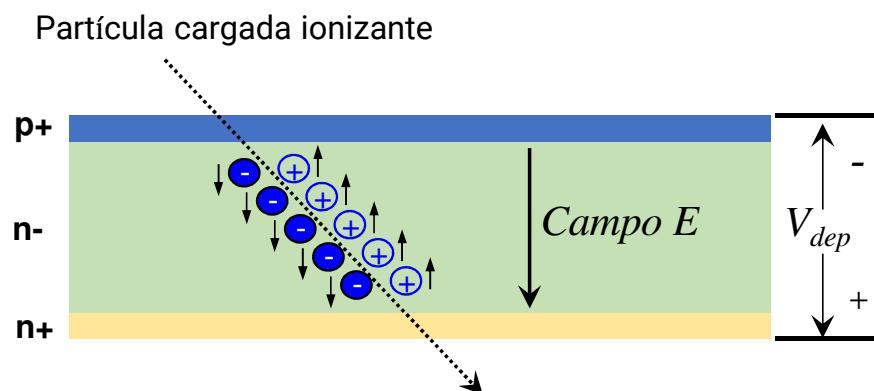
Detectores de semiconductor: principio de funcionamiento

Todos los detectores de trazado parten del mismo principio: **la unión pn polarizada en inversa**

Una partícula cargada (o un fotón) atraviesa la zona de carga espacial

Pierde parte de su energía por ionización (un fotón, absorción) generando pares electrón-hueco

Se recogen en los electrodos gracias al campo eléctrico de arrastre





Detectores de semiconductor: principio de funcionamiento

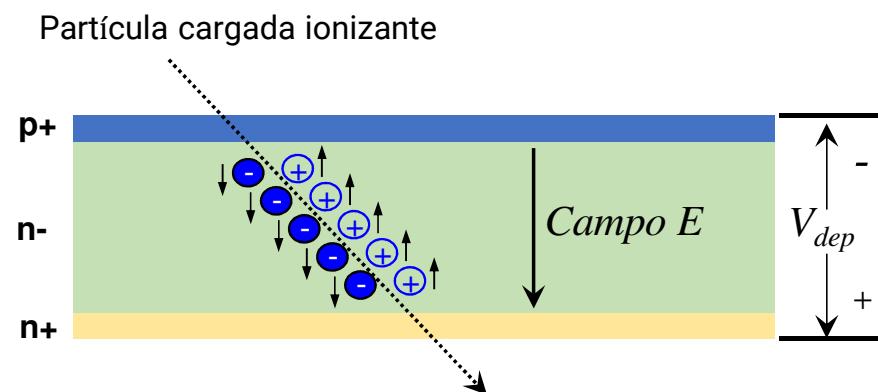
Todos los detectores de trazado parten del mismo principio: **la unión pn polarizada en inversa**

Una partícula cargada (o un fotón) atraviesa la zona de carga espacial

Pierde parte de su energía por ionización (un fotón, absorción) generando pares electrón-hueco

Se recogen en los electrodos gracias al campo eléctrico de arrastre

La señal depende del grosor de la zona de vaciado



$$d \approx \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0}{e} \frac{1}{N_D} (V_{bi} + V_{ext})}$$



Detectores de semiconductor: principio de funcionamiento

Todos los detectores de trazado parten del mismo principio: **la unión pn polarizada en inversa**

Una partícula cargada (o un fotón) atraviesa la zona de carga espacial

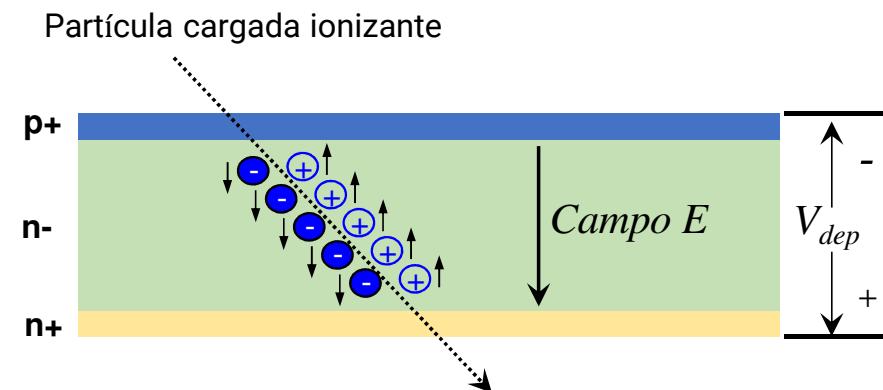
Pierde parte de su energía por ionización (un fotón, absorción) generando pares electrón-hueco

Se recogen en los electrodos gracias al campo eléctrico de arrastre

La señal depende del grosor de la zona de vaciado

→ la zona de vaciado ha de ocupar todo el volumen para optimizar el funcionamiento del detector

→ **Full depletion voltaje, V_{dep}**



$$d \approx \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0}{e} \frac{1}{N_D} (V_{bi} + V_{ext})} \implies d_{tot} \approx \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0}{e} \frac{V_{dep}}{N_D}}$$



Detectores de semiconductor: principio de funcionamiento

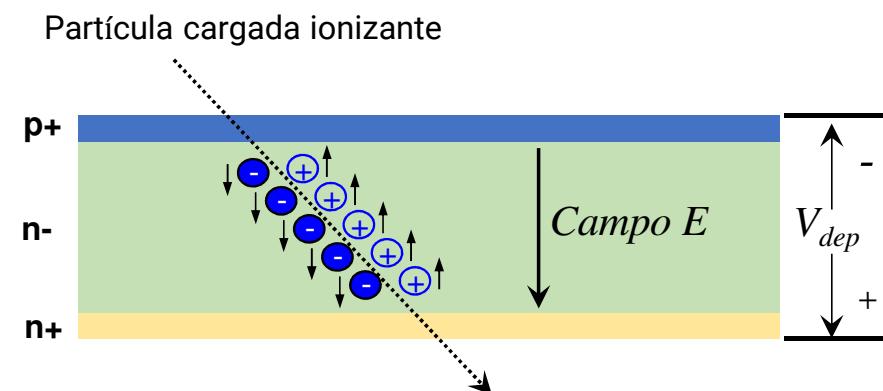
Todos los detectores de trazado parten del mismo principio: **la unión pn polarizada en inversa**

Una partícula cargada (o un fotón) atraviesa la zona de carga espacial

Pierde parte de su energía por ionización (un fotón, absorción) generando pares electrón-hueco

Se recogen en los electrodos gracias al campo eléctrico de arrastre

La señal depende del grosor de la zona de vaciado
→ la zona de vaciado ha de ocupar todo el volumen para optimizar el funcionamiento del detector
→ **Full depletion voltaje, V_{dep}**



$$d \approx \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0}{e} \frac{1}{N_D} (V_{bi} + V_{ext})} \implies d_{tot} \approx \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0}{e} \frac{V_{dep}}{N_D}}$$

Para un detector típico de silicio:

$$N_D \approx 2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3} \quad d = 300 \mu\text{m}$$

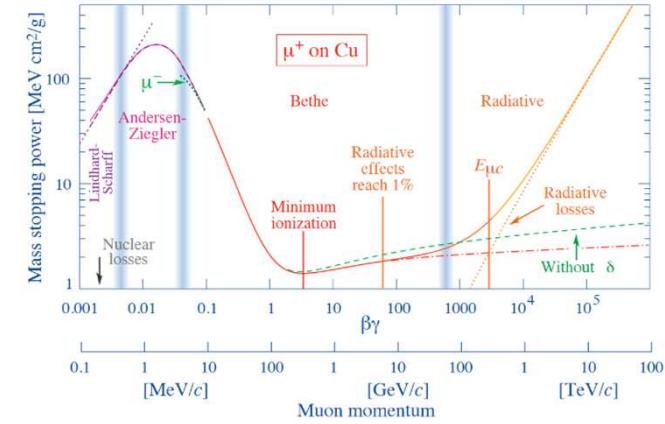
$$N_A \approx 10^{19} \text{ cm}^{-3} \quad V_{dep} \approx 160 \text{ V}$$



Detectores de semiconductor: generación de pares e/h

La **pérdida media de energía** de una partícula cargada en un medio se rige en primer orden por la fórmula de Bethe-Bloch

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta(\gamma)}{2} \right]$$



P.A. Zyla et al.(Particle Data Group), Prog.
Theor. Exp. Phys.2020, 083C01 (2020)



Detectores de semiconductor: generación de pares e/h

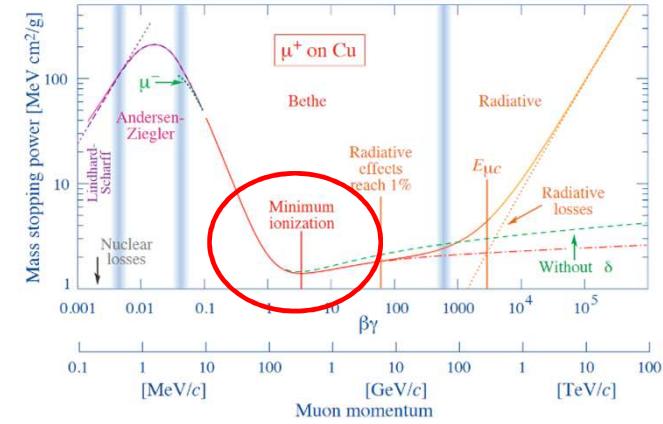
La **pérdida media de energía** de una partícula cargada en un medio se rige a primer orden por la fórmula de Bethe-Bloch

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 Z \frac{1}{A \beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta(\gamma)}{2} \right]$$

Para computar la señal generada por una partícula cargada en un medio, es necesario conocer cual es la energía media para generar un par e/h (mínimum ionizing particle, MIP)

En silicio puro, MIP ~ 3.6 eV

$\rightarrow E_g = 1.12$ eV, el resto de la energía depositada se utiliza para la excitación de fonones de la red cristalina (calor)



P.A. Zyla et al.(Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys.2020, 083C01 (2020)



Detectores de semiconductor: generación de pares e/h

La **pérdida media de energía** de una partícula cargada en un medio se rige a primer orden por la fórmula de Bethe-Bloch

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta(\gamma)}{2} \right]$$

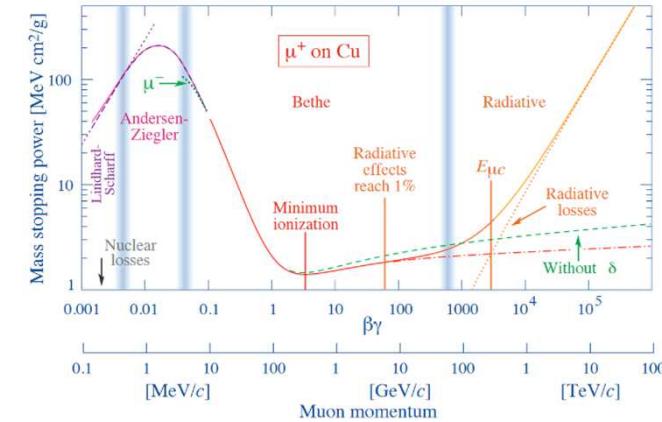
Para computar la señal generada por una partícula cargada en un medio, es necesario conocer cual es la energía media para generar un par e/h (mínimum ionizing particle, MIP)

En silicio puro, MIP ~ 3.6 eV

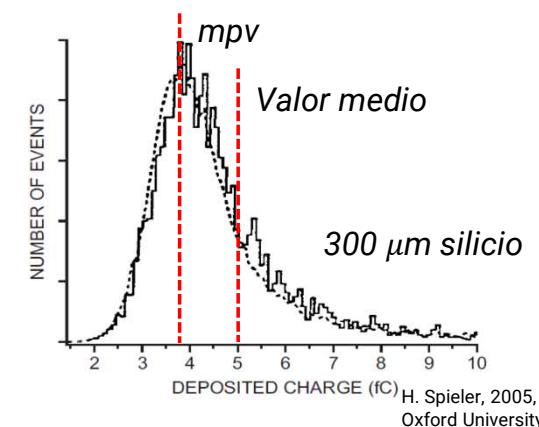
$\rightarrow E_g = 1.12$ eV, el resto de la energía depositada se utiliza para la excitación de fonones de la red cristalina (calor)

La pérdida de energía de partículas ionizantes sigue aproximadamente la distribución de Landau-Vavilov, pues el **número de colisiones** creadas en el medio, así como la **transferencia de energía por colisión**, son procesos estadísticos

\rightarrow Es una distribución asimétrica: el valor más probable (mpv) es diferente del valor medio



P.A. Zyla et al.(Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys.2020, 083C01 (2020)



H. Spieler, 2005, © Oxford University Press



Detectores de semiconductor: generación de pares e/h

La **pérdida media de energía** de una partícula cargada en un medio se rige a primer orden por la fórmula de Bethe-Bloch

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta(\gamma)}{2} \right]$$

Para computar la señal generada por una partícula cargada en un medio, es necesario conocer cual es la energía media para generar un par e/h (mínimum ionizing particle, MIP)

En silicio puro, MIP ~ 3.6 eV

$\rightarrow E_g = 1.12$ eV, el resto de la energía depositada se utiliza para la excitación de fonones de la red cristalina (calor)

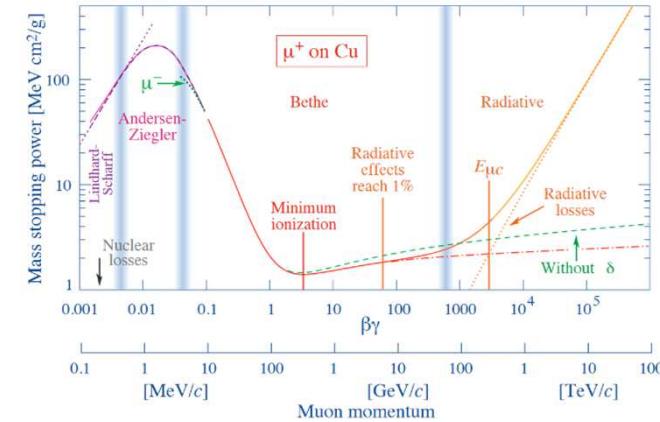
La pérdida de energía de partículas ionizantes sigue aproximadamente la distribución de Landau-Vavilov, pues el **número de colisiones** creadas en el medio, así como la **transferencia de energía por colisión**, son procesos estadísticos

\rightarrow Es una distribución asimétrica: el valor más probable (mpv) es diferente del valor medio

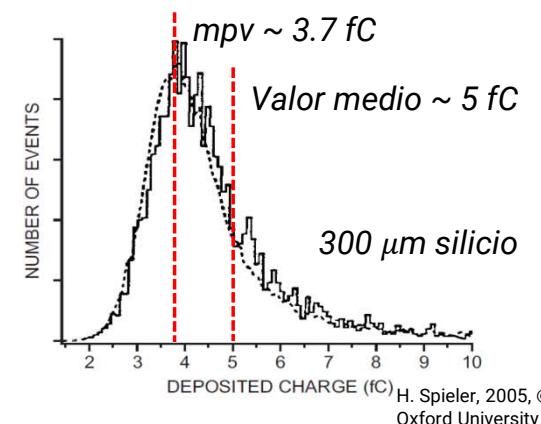
Cuánta carga generan los MIPs en 300 μm de silicio:

$$\langle \frac{dE}{dx} \rangle \approx 0.39 \text{ keV}/\mu\text{m} = 117 \text{ keV}/300 \mu\text{m} \Rightarrow \frac{\langle \frac{dE}{dx} \rangle(300 \mu\text{m})}{\text{MIP}} = \frac{113 \cdot 10^3 \text{ eV}}{3.6 \text{ eV}} = 32 \cdot 10^3 \text{ e/h} \approx 5 \text{ fC}$$

$$\text{mpv} \approx 0.28 \text{ keV}/\mu\text{m} = 84 \text{ keV}/300 \mu\text{m} \Rightarrow \frac{\text{mpv}(300 \mu\text{m})}{\text{MIP}} = \frac{113 \cdot 10^3 \text{ eV}}{3.6 \text{ eV}} = 23 \cdot 10^3 \text{ e/h} \approx 3.7 \text{ fC}$$



P.A. Zyla et al.(Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys.2020, 083C01 (2020)



H. Spieler, 2005, © Oxford University Press



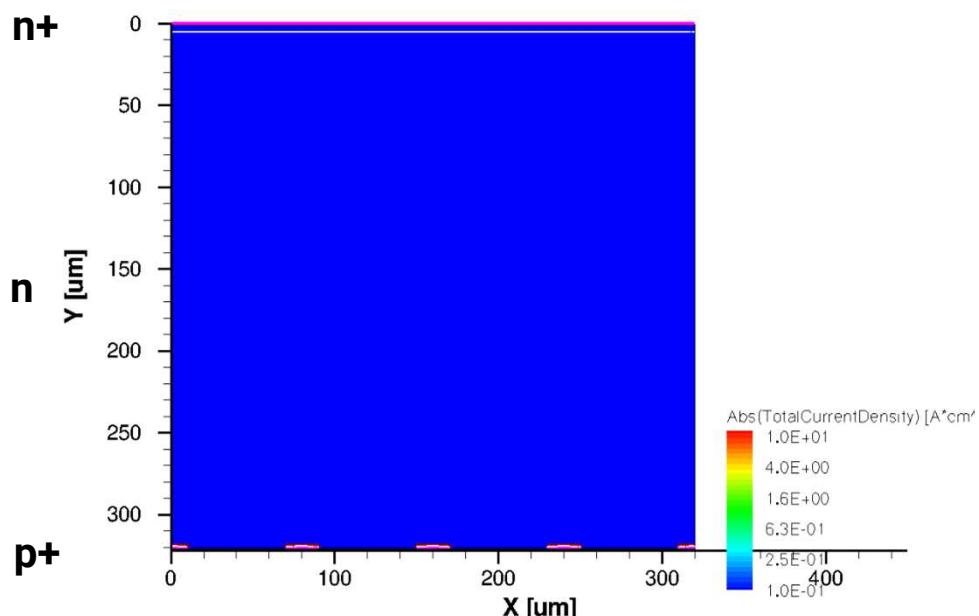
La colección de carga en un detector de silicio

Para un detector de silicio de $300 \mu\text{m}$ segmentado y completamente vaciado:

$$v_D = \mu(E) \cdot E \approx 50 \mu\text{m/s} \quad t = \frac{d}{v_D} \approx \frac{300}{50} \approx 6 \text{ ns}$$

Ejemplo: una simulación de densidad de carga en un detector de micropistas

MIP atraviesa el detector a 45° :



Krammer, Hartmann (2011), Sim by T. Eichhorn (KIT)





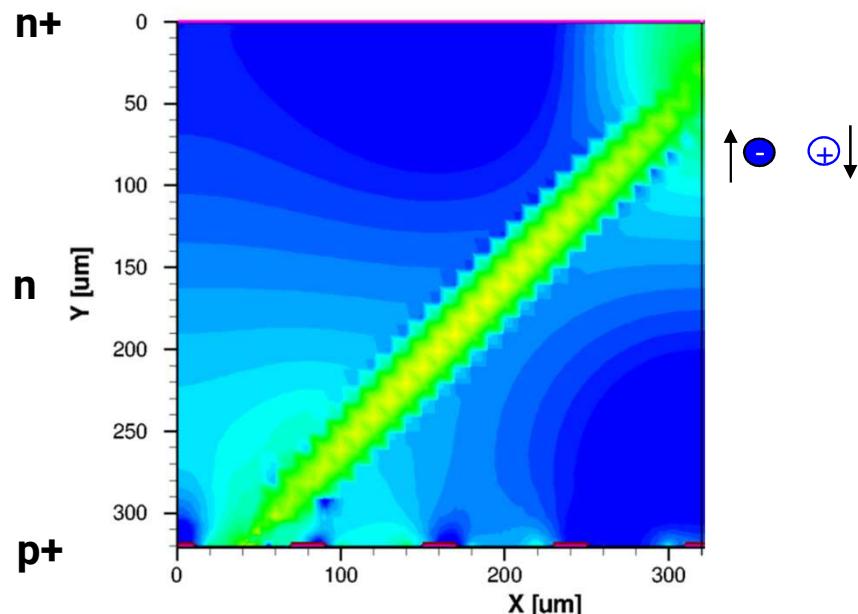
La colección de carga en un detector de silicio

Para un detector de silicio de $300 \mu\text{m}$ segmentado y completamente vaciado:

$$v_D = \mu(E) \cdot E \approx 50 \mu\text{m/s} \quad t = \frac{d}{v_D} \approx \frac{300}{50} \approx 6 \text{ ns}$$

Ejemplo: una simulación de densidad de carga en un detector de micropistas

MIP atraviesa el detector a 45° :



Krammer, Hartmann (2011), Sim by T. Eichhorn (KIT)





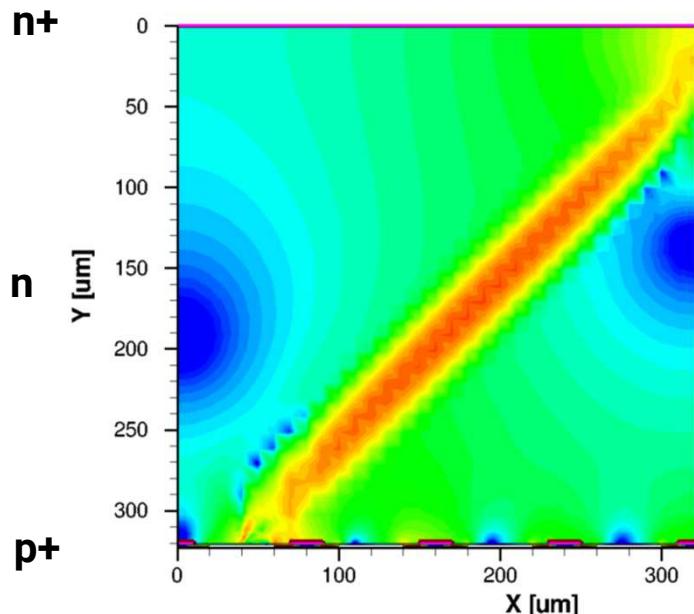
La colección de carga en un detector de silicio

Para un detector de silicio de $300 \mu\text{m}$ segmentado y completamente vaciado:

$$v_D = \mu(E) \cdot E \approx 50 \mu\text{m/s} \quad t = \frac{d}{v_D} \approx \frac{300}{50} \approx 6 \text{ ns}$$

Ejemplo: una simulación de densidad de carga en un detector de micropistas

MIP atraviesa el detector a 45° :



Krammer, Hartmann (2011), Sim by T. Eichhorn (KIT)



t = 1.1 ns



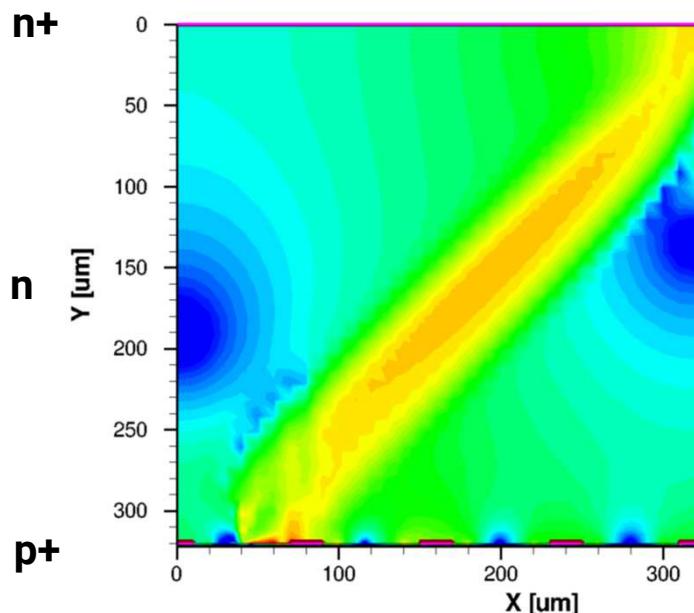
La colección de carga en un detector de silicio

Para un detector de silicio de $300 \mu\text{m}$ segmentado y completamente vaciado:

$$v_D = \mu(E) \cdot E \approx 50 \mu\text{m/s} \quad t = \frac{d}{v_D} \approx \frac{300}{50} \approx 6 \text{ ns}$$

Ejemplo: una simulación de densidad de carga en un detector de micropistas

MIP atraviesa el detector a 45° :



Krammer, Hartmann (2011), Sim by T. Eichhorn (KIT)



t = 1.3 ns



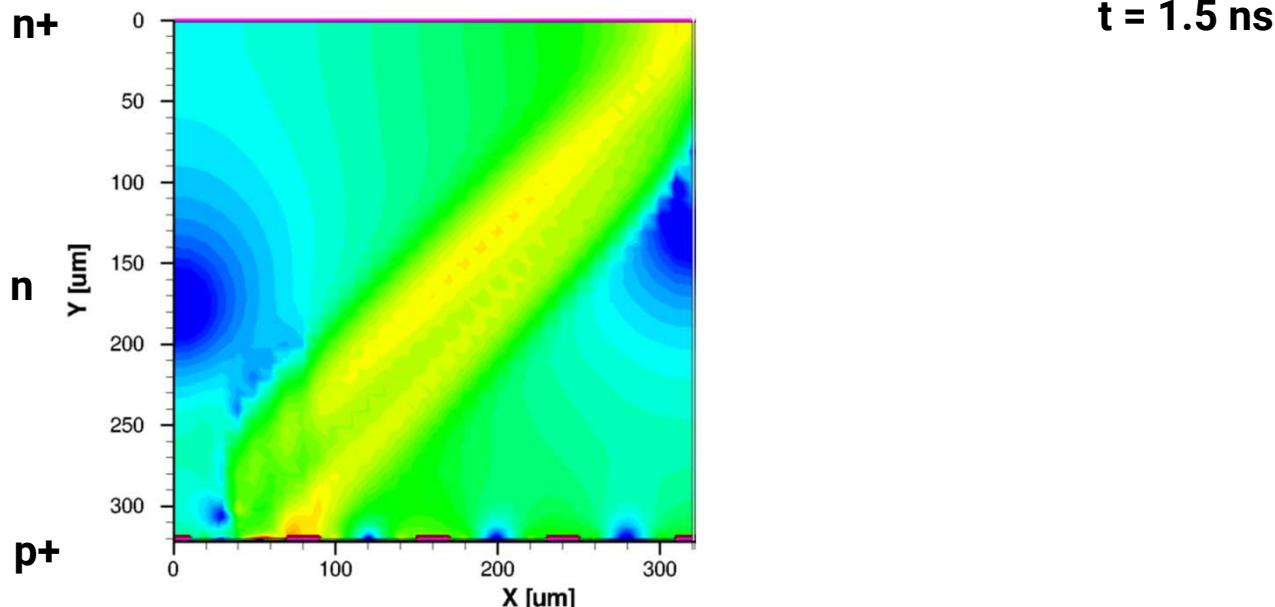
La colección de carga en un detector de silicio

Para un detector de silicio de $300 \mu\text{m}$ segmentado y completamente vaciado:

$$v_D = \mu(E) \cdot E \approx 50 \mu\text{m/s} \quad t = \frac{d}{v_D} \approx \frac{300}{50} \approx 6 \text{ ns}$$

Ejemplo: una simulación de densidad de carga en un detector de micropistas

MIP atraviesa el detector a 45° :



Krammer, Hartmann (2011), Sim by T. Eichhorn (KIT)





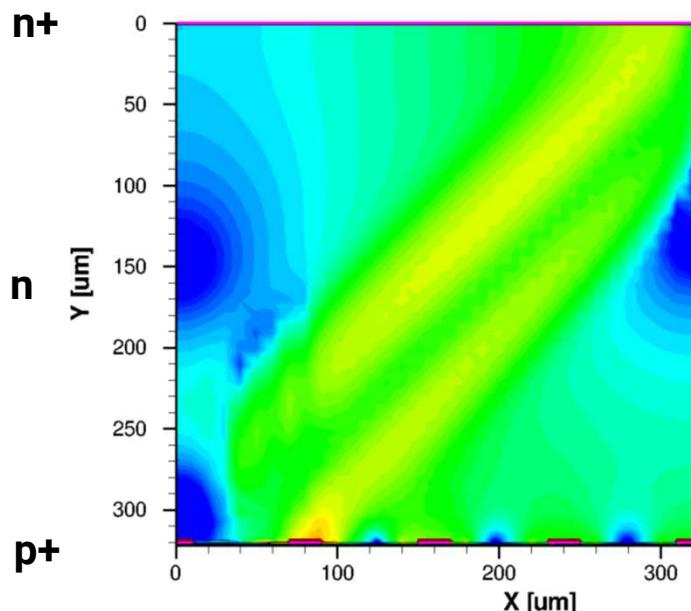
La colección de carga en un detector de silicio

Para un detector de silicio de $300 \mu\text{m}$ segmentado y completamente vaciado:

$$v_D = \mu(E) \cdot E \approx 50 \mu\text{m/s} \quad t = \frac{d}{v_D} \approx \frac{300}{50} \approx 6 \text{ ns}$$

Ejemplo: una simulación de densidad de carga en un detector de micropistas

MIP atraviesa el detector a 45° :



Krammer, Hartmann (2011), Sim by T. Eichhorn (KIT)



t = 1.8 ns



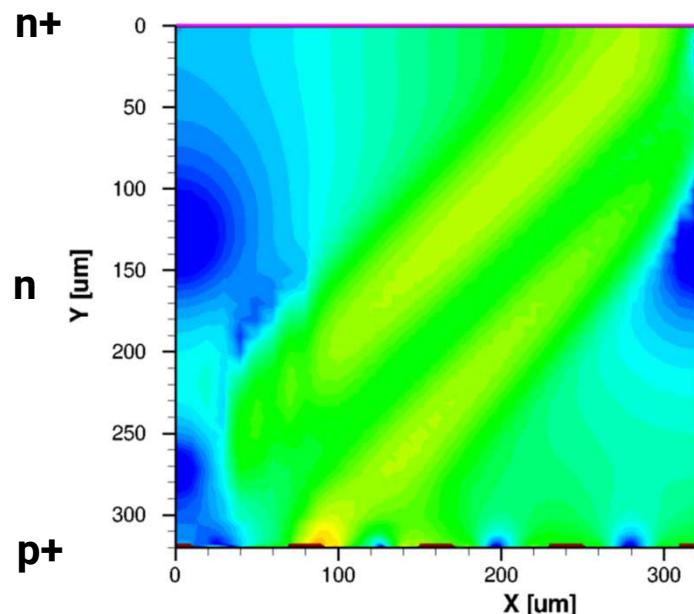
La colección de carga en un detector de silicio

Para un detector de silicio de $300 \mu\text{m}$ segmentado y completamente vaciado:

$$v_D = \mu(E) \cdot E \approx 50 \mu\text{m/s} \quad t = \frac{d}{v_D} \approx \frac{300}{50} \approx 6 \text{ ns}$$

Ejemplo: una simulación de densidad de carga en un detector de micropistas

MIP atraviesa el detector a 45° :



Krammer, Hartmann (2011), Sim by T. Eichhorn (KIT)



t = 2 ns



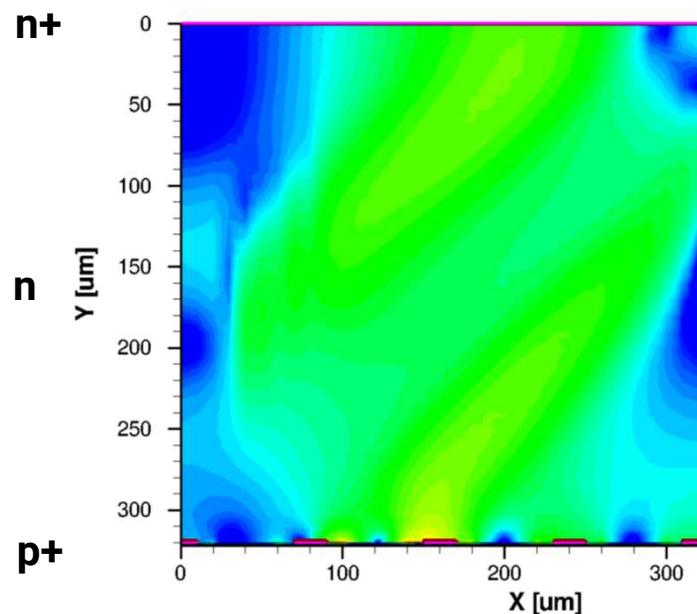
La colección de carga en un detector de silicio

Para un detector de silicio de $300 \mu\text{m}$ segmentado y completamente vaciado:

$$v_D = \mu(E) \cdot E \approx 50 \mu\text{m/s} \quad t = \frac{d}{v_D} \approx \frac{300}{50} \approx 6 \text{ ns}$$

Ejemplo: una simulación de densidad de carga en un detector de micropistas

MIP atraviesa el detector a 45° :



Krammer, Hartmann (2011), Sim by T. Eichhorn (KIT)



t = 3 ns



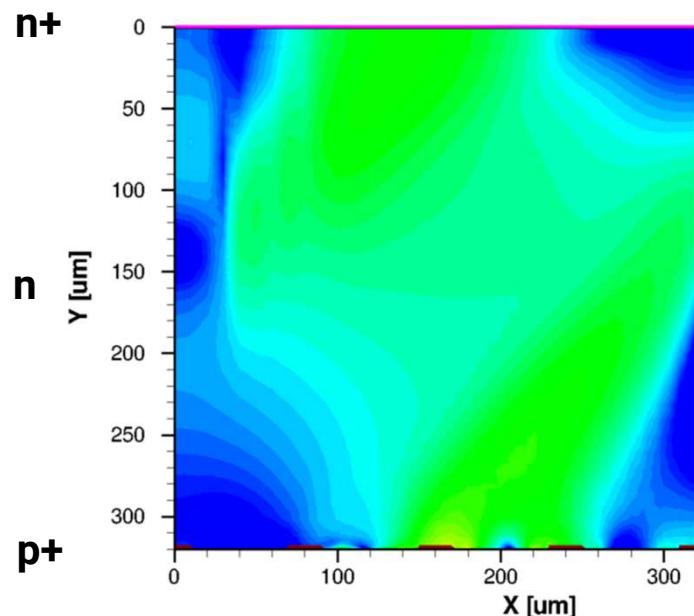
La colección de carga en un detector de silicio

Para un detector de silicio de $300 \mu\text{m}$ segmentado y completamente vaciado:

$$v_D = \mu(E) \cdot E \approx 50 \mu\text{m/s} \quad t = \frac{d}{v_D} \approx \frac{300}{50} \approx 6 \text{ ns}$$

Ejemplo: una simulación de densidad de carga en un detector de micropistas

MIP atraviesa el detector a 45° :



Krammer, Hartmann (2011), Sim by T. Eichhorn (KIT)



t = 4 ns



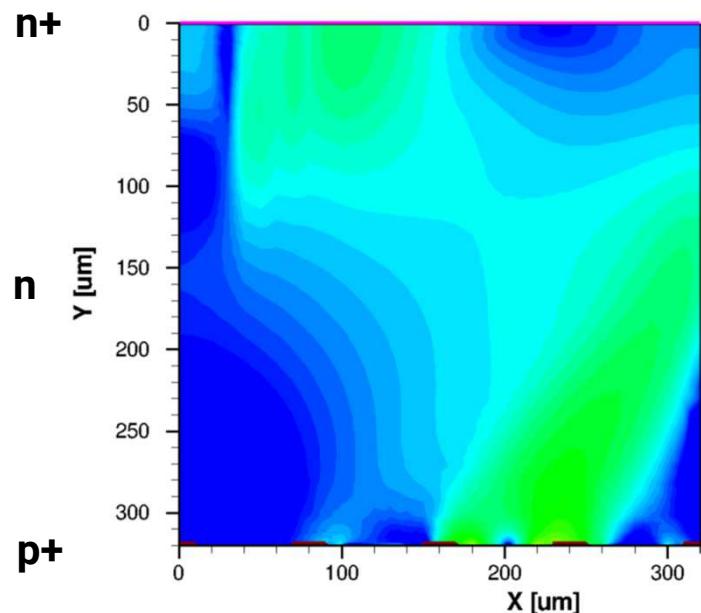
La colección de carga en un detector de silicio

Para un detector de silicio de $300 \mu\text{m}$ segmentado y completamente vaciado:

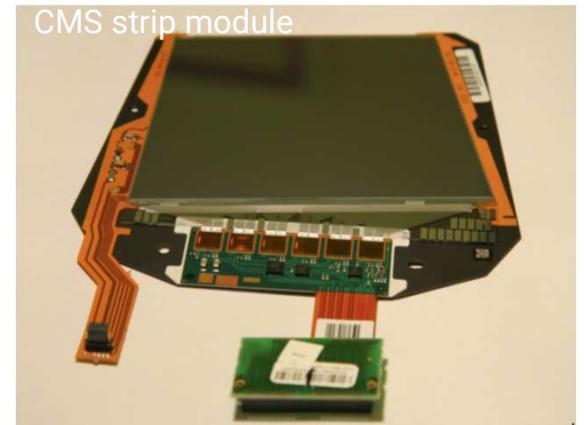
$$v_D = \mu(E) \cdot E \approx 50 \mu\text{m/s} \quad t = \frac{d}{v_D} \approx \frac{300}{50} \approx 6 \text{ ns}$$

Ejemplo: una simulación de densidad de carga en un detector de micropistas

MIP atraviesa el detector a 45° :



t = 5 ns



Krammer, Hartmann (2011), Sim by T. Eichhorn (KIT)



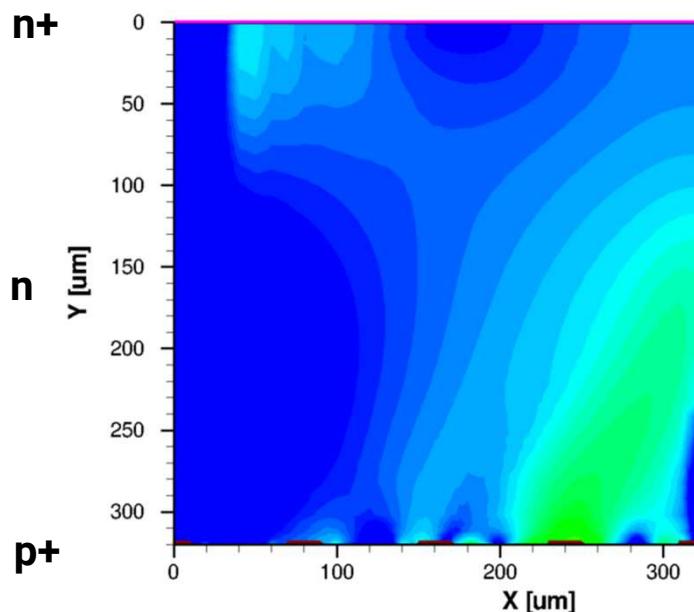
La colección de carga en un detector de silicio

Para un detector de silicio de $300 \mu\text{m}$ segmentado y completamente vaciado:

$$v_D = \mu(E) \cdot E \approx 50 \mu\text{m/s} \quad t = \frac{d}{v_D} \approx \frac{300}{50} \approx 6 \text{ ns}$$

Ejemplo: una simulación de densidad de carga en un detector de micropistas

MIP atraviesa el detector a 45° :



Krammer, Hartmann (2011), Sim by T. Eichhorn (KIT)



t = 6 ns



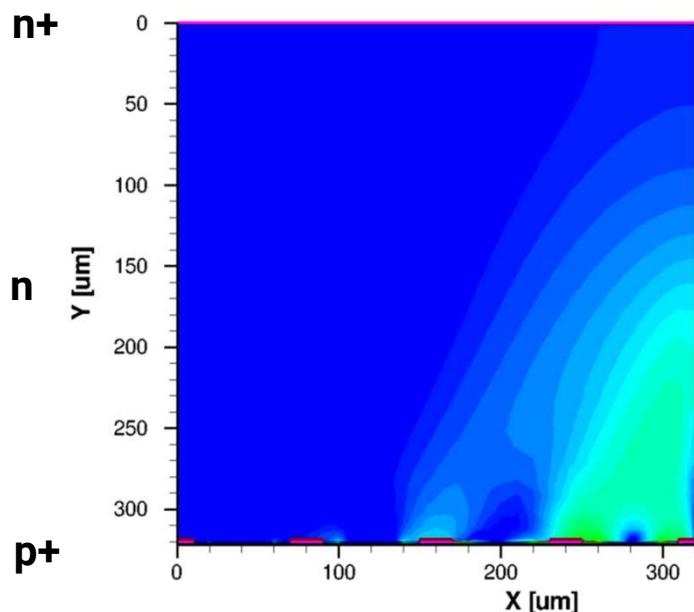
La colección de carga en un detector de silicio

Para un detector de silicio de $300 \mu\text{m}$ segmentado y completamente vaciado:

$$v_D = \mu(E) \cdot E \approx 50 \mu\text{m/s} \quad t = \frac{d}{v_D} \approx \frac{300}{50} \approx 6 \text{ ns}$$

Ejemplo: una simulación de densidad de carga en un detector de micropistas

MIP atraviesa el detector a 45° :



t = 7 ns



Todos los electrones han sido recolectados en el backplane

Krammer, Hartmann (2011), Sim by T. Eichhorn (KIT)

Tipos de detectores semiconductores





Tipos de detectores semiconductores

Existe una gran variedad de detectores de semiconductor

La inmensa mayoría de detectores de semiconductor de trazado (tracking) e imagen de la actualidad utilizan el **silicio como material base**

GaAs, CdTe, diamante CVD (deposición química de vapor), y Ge son semiconductores alternativos también utilizados como detectores en algunas aplicaciones específicas

Detectores tipo pad, micropistas y pixels

Pixeles híbridos

Pixeles 3D

Pixeles monolíticos

Dispositivos de acoplamiento de carga, (charged coupled devices, CCD)

Otros: Si PM, LGADs

No silicio: germanio, GaAs, CdTe, diamante



Tipos de detectores semiconductores

Existe una gran variedad de detectores de semiconductor

La inmensa mayoría de detectores de semiconductor de trazado (tracking) e imagen de la actualidad utilizan el **silicio como material base**

GaAs, CdTe, diamante CVD (deposición química de vapor), y Ge son semiconductores alternativos también utilizados como detectores en algunas aplicaciones específicas

Detectores tipo pad, micropistas y pixels

Pixeles híbridos

Estos detectores poseen una electrónica de lectura asociada

Pixeles 3D

Pixeles monolíticos

Dispositivos de acoplamiento de carga, (charged coupled devices, CCD)

Otros: Si PM, LGADs

No silicio: germanio, GaAs, CdTe, diamante

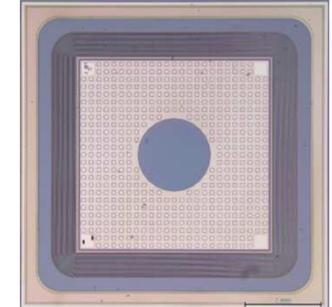
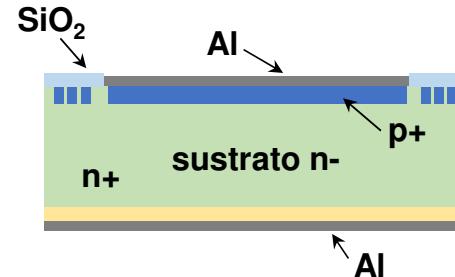


Detectores planares: pads, strips, pixels

Detectores tipo **pad**

El detector más sencillo. Diodo p-n superficial de **un solo canal** con anillos de guarda

Típicamente usado como “prueba de concepto”



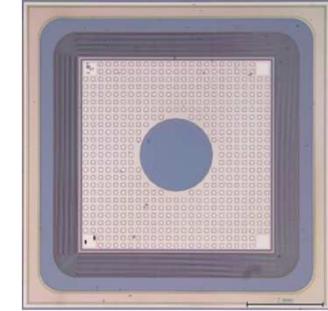
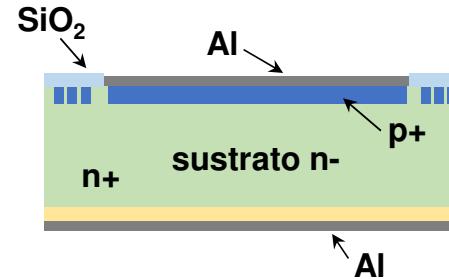


Detectores planares: pads, strips, pixels

Detectores tipo **pad**

El detector más sencillo. Diodo p-n superficial de **un solo canal** con anillos de guarda

Típicamente usado como “prueba de concepto”



Detectores de **micropistas** o “strips”:

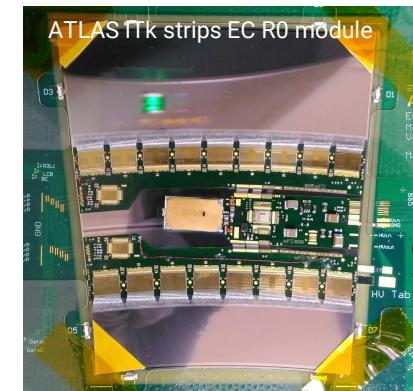
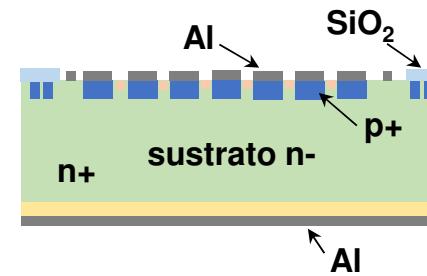
Diodos pn segmentados en strips delgados ($\sim 100 \mu\text{m}$, $75 \mu\text{m}$ pitch) que se extienden a lo largo de parte o toda una dimensión (2.5-5-10 cm)

Por sí solos proporcionan resolución en 1D

Se suelen combinar con una segunda capa de detectores rotada para obtener información en 2D

Sensores y electrónica de lectura conectada con “wire bonds”

N canales de lectura por sensor



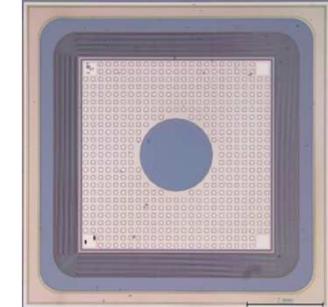
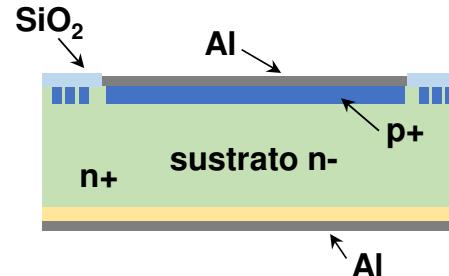


Detectores planares: pads, strips, pixels

Detectores tipo pad

El detector más sencillo. Diodo p-n superficial de **un solo canal** con anillos de guarda

Típicamente usado como “prueba de concepto”



Detectores de micropistas o “strips”:

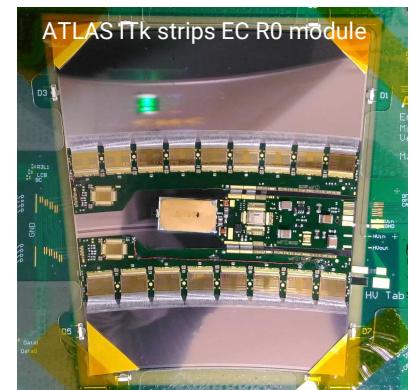
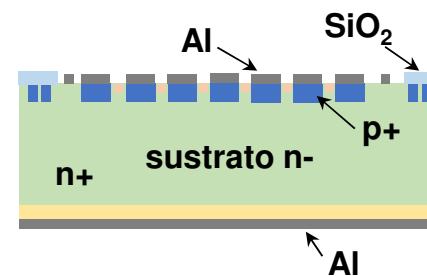
Diodos pn segmentados en strips delgados ($\sim 100 \mu\text{m}$, $75 \mu\text{m}$ pitch) que se extienden a lo largo de parte o toda una dimensión (2.5-5-10 cm)

Por sí solos proporcionan resolución en 1D

Se suelen combinar con una segunda capa de detectores rotada para obtener información en 2D

Sensores y electrónica de lectura conectada con “wire bonds”

N canales de lectura por sensor



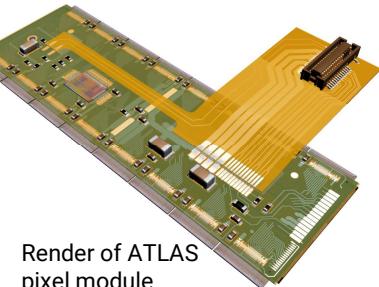
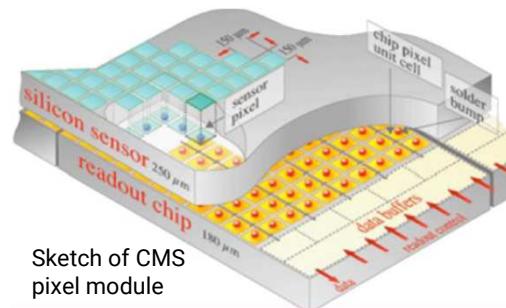
Detectores tipo pixel

Diodos pn segmentados en pequeños rectángulos (por ejemplo $50 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$) a lo largo de toda la superficie del sensor

Proporcionan información 2D

Sensores y electrónica de lectura conectada con “bump bonds”

$\sim N^2$ canales de lectura por sensor





Acoplamiento capacitivo y polarización

- La corriente de fugas I_L posee un componente térmico permanente (DC) que se amplifica en la electrónica
 - Incrementa el consumo
 - Genera calor
 - Genera **ruido**, pudiendo incluso saturar la electrónica
 - Reduce el rango dinámico del detector

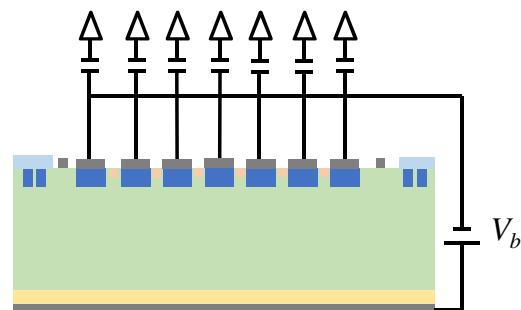
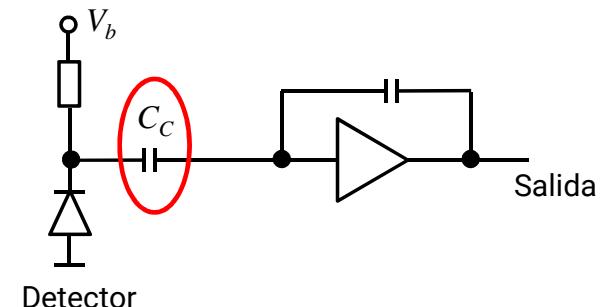
$$I_L^{gen} \propto T^2 \exp\left(-\frac{E_a}{2\kappa T}\right)$$



Acoplamiento capacitivo y polarización

- La corriente de fugas I_L posee un componente térmico permanente (DC) que se amplifica en la electrónica
Incrementa el consumo
Genera calor
Genera **ruido**, pudiendo incluso saturar la electrónica
Reduce el rango dinámico del detector
→ **Solución: acoplamiento capacitivo (AC coupling)** para cada canal

$$I_L^{gen} \propto T^2 \exp\left(-\frac{E_a}{2\kappa T}\right)$$

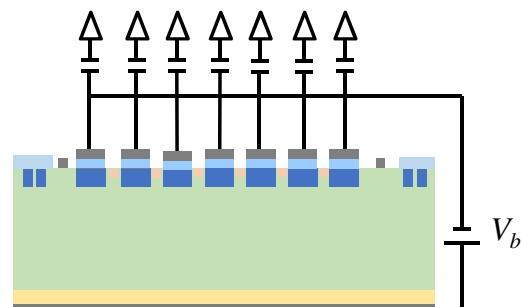
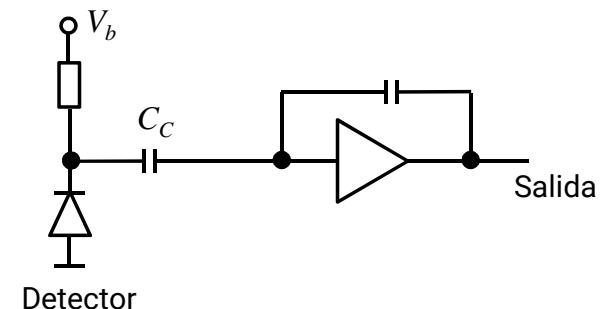




Acoplamiento capacitivo y polarización

- La corriente de fugas I_L posee un componente térmico permanente (DC) que se amplifica en la electrónica
Incrementa el consumo
Genera calor
Genera **ruido**, pudiendo incluso saturar la electrónica
Reduce el rango dinámico del detector
→ **Solución: acoplamiento capacitivo (AC coupling)** para cada canal
Integrados en el diseño: capa fina de SiO² entre el metal de contacto y el electrodo implantado

$$I_L^{gen} \propto T^2 \exp\left(-\frac{E_a}{2\kappa T}\right)$$

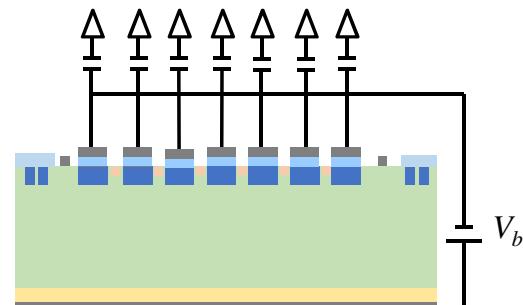
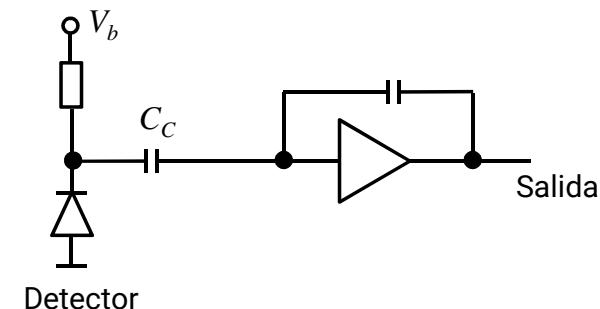




Acoplamiento capacitivo y polarización

- La corriente de fugas I_L posee un componente térmico permanente (DC) que se amplifica en la electrónica
 - Incrementa el consumo
 - Genera calor
 - Genera **ruido**, pudiendo incluso saturar la electrónica
 - Reduce el rango dinámico del detector
 - **Solución: acoplamiento capacitivo (AC coupling)** para cada canal
 - Integrados en el diseño: capa fina de SiO₂ entre el metal de contacto y el electrodo implantado
- Polarización: un solo contacto basta para polarizar el sensor: “bias ring”
 - Los electrodos de lectura han de estar al mismo potencial pero separados eléctricamente

$$I_L^{gen} \propto T^2 \exp\left(-\frac{E_a}{2\kappa T}\right)$$

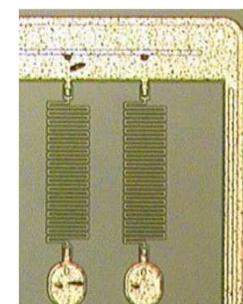
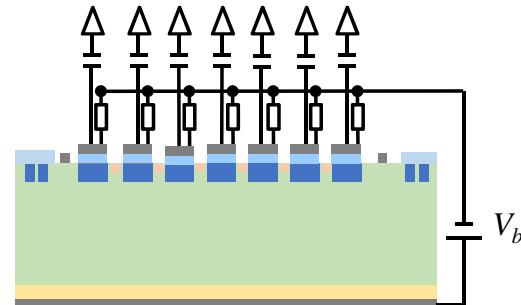
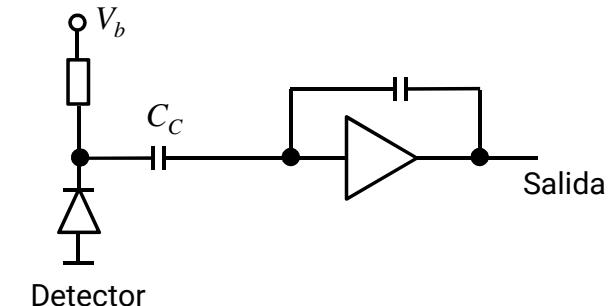




Acoplamiento capacitivo y polarización

- La corriente de fugas I_L posee un componente térmico permanente (DC) que se amplifica en la electrónica
 - Incrementa el consumo
 - Genera calor
 - Genera **ruido**, pudiendo incluso saturar la electrónica
 - Reduce el rango dinámico del detector
 - **Solución: acoplamiento capacitivo (AC coupling)** para cada canal
 - Integrados en el diseño: capa fina de SiO² entre el metal de contacto y el electrodo implantado
- Polarización: un solo contacto basta para polarizar el sensor: “bias ring”
 - Los electrodos de lectura han de estar al mismo potencial pero separados eléctricamente
 - **Solución: resistencias de polarización (bias resistors)** para cada canal
 - Generalmente fabricados en meandros de polisilicio (menos conductor que Si)

$$I_L^{gen} \propto T^2 \exp\left(-\frac{E_a}{2\kappa T}\right)$$





Conexiones con la electrónica de lectura

La conectividad y la lectura de los canales es un aspecto importante que guía el diseño de los detectores de micropistas y pixels

Micropistas: canales conectados uno a uno por microsoldaduras (“wire bonds”)

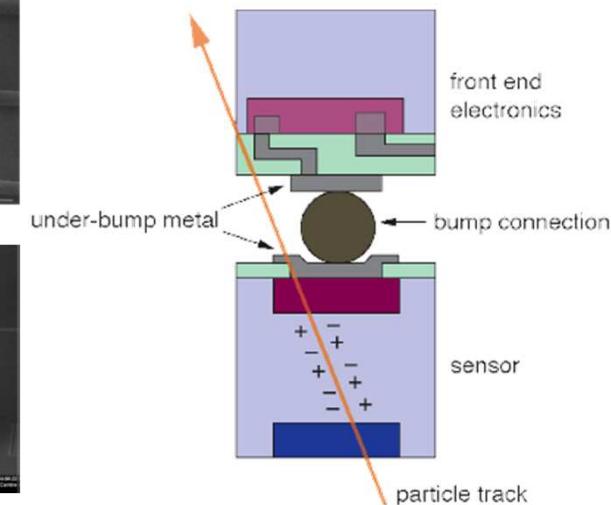
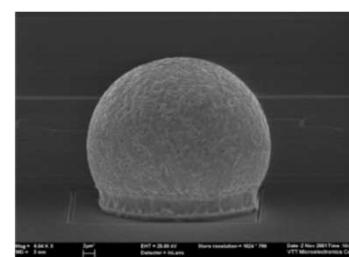
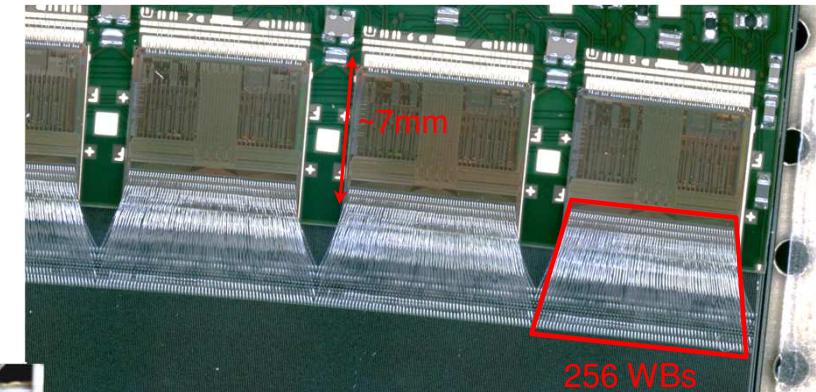
Hilos de aluminio ($25 \mu\text{m}$ diámetro), soldados por ultrasonidos a los contactos metálicos

Proceso estándar en microelectrónica

Pixel: canales conectados uno a uno por “bump bonds”

Bolas metálicas de In o Pb-Sn ($25-50 \mu\text{m}$ diámetro), soldadas a los contactos via flujo de soldadura

Proceso no tan estándar en microelectrónica: el desarrollo y I+D en física de partículas supuso un gran salto de calidad industrial





Ruido electrónico

La señal generada depende en esencia de la anchura de la región de vaciado y en la energía depositada por la partícula



Ruido electrónico

La señal generada depende en esencia de la anchura de la región de vaciado y en la energía depositada por la partícula

El ruido en un detector de silicio depende de numerosos parámetros:

Geometría

Polarización

Electrónica de lectura

Se determina en la entrada del amplificador de la electrónica de lectura (el Front-End) como “equivalent noise charge” (ENC) y generalmente se mide en electrones ($q_e = 1.6 \times 10^{-19} C$)



Ruido electrónico

La señal generada depende en esencia de la anchura de la región de vaciado y en la energía depositada por la partícula

El ruido en un detector de silicio depende de numerosos parámetros:

Geometría

Polarización

Electrónica de lectura

Se determina en la entrada del amplificador de la electrónica de lectura (el Front-End) como “equivalent noise charge” (ENC) y generalmente se mide en electrones ($q_e = 1.6 \times 10^{-19} C$)

Un buen detector siempre ha de maximizar la **proporción señal-ruido (Signal-to-noise ratio, SNR)**

Típicamente, $SNR \sim 15-20$ en un detector sin irradiar



Resolución espacial

Resolución espacial: el principal parámetro de un detector de posición

Depende tanto de procesos físicos como de parámetros del diseño del detector



Resolución espacial

Resolución espacial: el principal parámetro de un detector de posición

Depende tanto de procesos físicos como de parámetros del diseño del detector

Procesos físicos:

Fluctuaciones estadísticas de la pérdida de energía

Difusión de portadores de carga

Cuando los pares e-h se crean, la corriente de arrastre los mueve a los electrodos

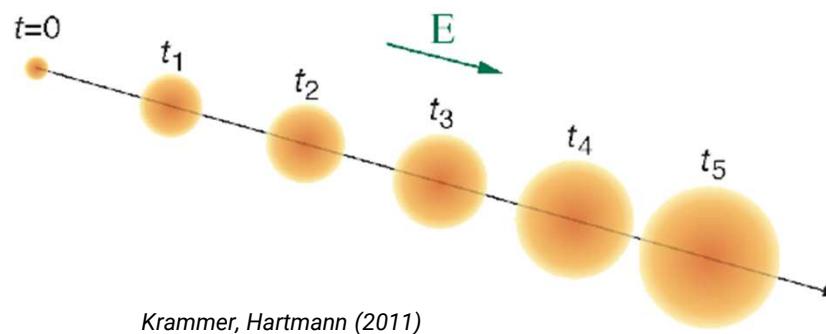
La distribución de carga se ensancha por difusión

Anchura de la distribución

$$\sigma_D = \sqrt{2Dt}$$

t : Tiempo de arrastre (drift time)

D : Coeficiente de difusión



Krammer, Hartmann (2011)



Resolución espacial

Resolución espacial: el principal parámetro de un detector de posición

Depende tanto de procesos físicos como de parámetros del diseño del detector

Parámetros de diseño:

Electrónica de lectura: binaria (hit – no hit) o de señal analógica (analogue readout)

Distancia entre electrodos d (pitch)

Proporción señal-ruido (SNR)



Resolución espacial

Resolución espacial: el principal parámetro de un detector de posición

Depende tanto de procesos físicos como de parámetros del diseño del detector

Parámetros de diseño:

Electrónica de lectura: binaria (hit – no hit) o de señal analógica (analogue readout)

Distancia entre electrodos d (pitch)

Proporción señal-ruido (SNR)

Para el caso unidimensional (detector de strip):

Lectura binaria

Posición: $x = \text{posición del strip}$ (centro)

$$\text{Resolución: } \sigma = \frac{d}{\sqrt{12}}$$

d : distancia entre electrodos (strip pitch)

Para $d = 75 \mu m \rightarrow \sigma = 22 \mu m$

Lectura analógica

$$\text{Posición: } x = x_1 + \frac{h_1}{h_1 + h_2}(x_2 - x_1) = \frac{h_1 x_1 + h_2 x_2}{h_1 + h_2}$$

x_1, x_2 : Posición central strip 1, 2

$h_1 h_2$: Señal en el strip 1, 2

$$\text{Resolución: } \sigma = \frac{d}{SNR}$$

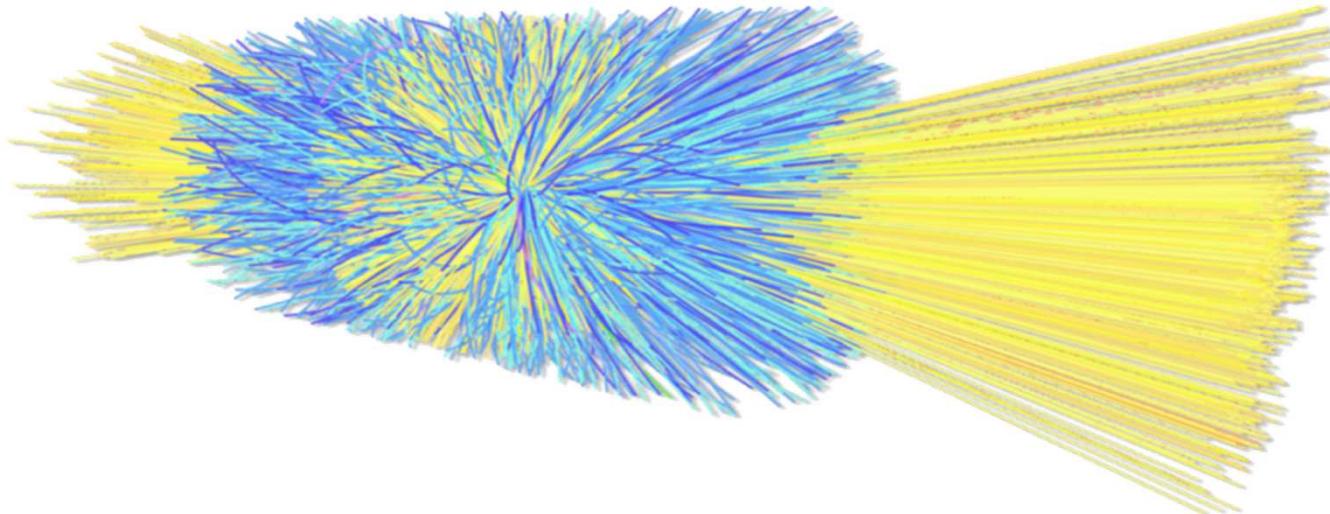
Para $d = 75 \mu m$ Para $SNR = 20 \rightarrow \sigma = 3.75 \mu m$



Efectos de la radiación

La señal, el ruido y la resolución espacial van de la mano en la determinación de la posición de una partícula en un detector de posición

¡La radiación y sus efectos en los detectores y su electrónica de lectura perturban dramáticamente todos estos parámetros!

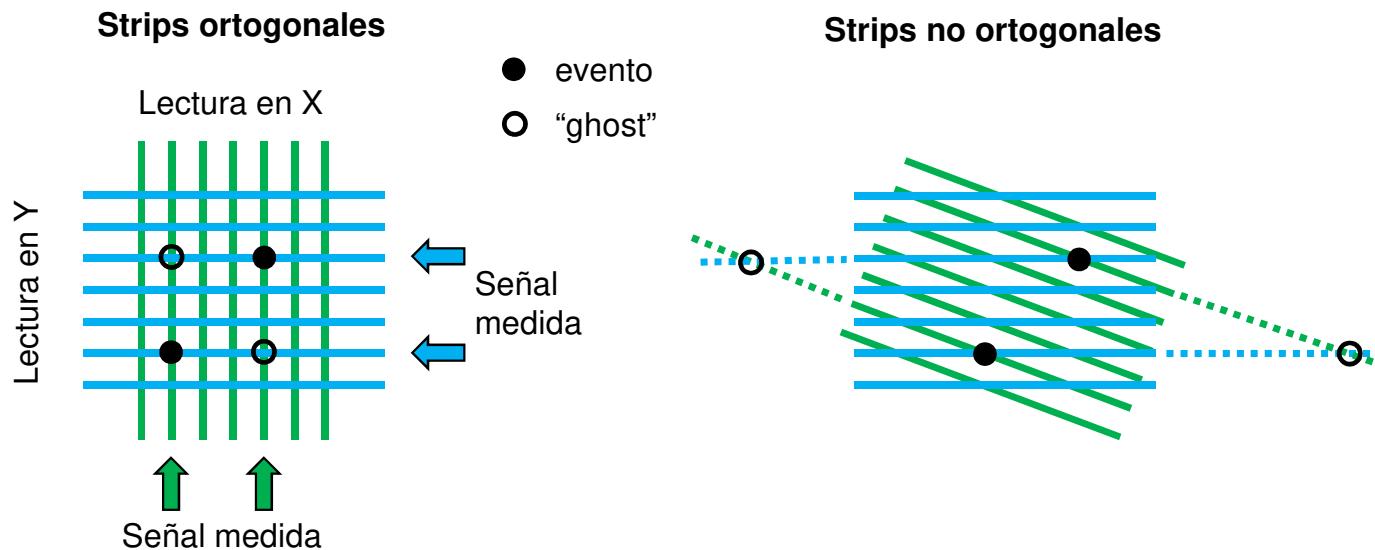




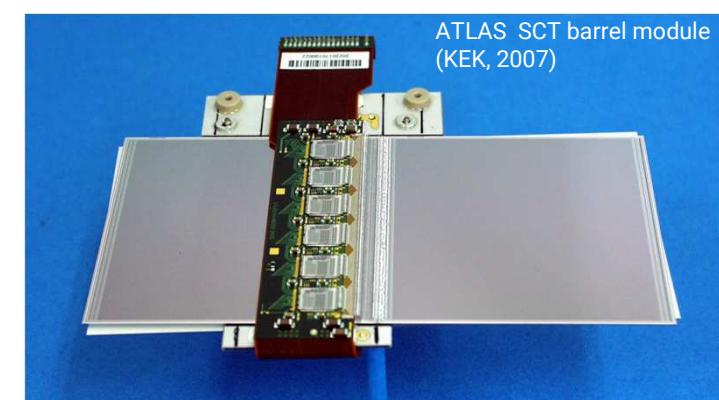
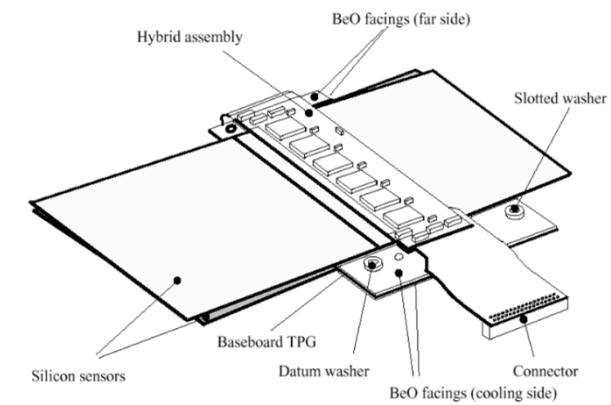
Detectores de strips: segunda dimensión

Detectores de micropistas: la determinación de la segunda dimensión de un evento se obtiene con una **segunda capa detectora** lo más cerca posible a **diferente ángulo**

Si se obtienen N lecturas simultáneas, se producen ambigüedades en la posición, más acusadas en strips ortogonales (estéreo ángulo = 90°)



Estéreo ángulos < 90 reducen la densidad de eventos falsos (fake hits), simplificando la reconstrucción de trazas en el detector

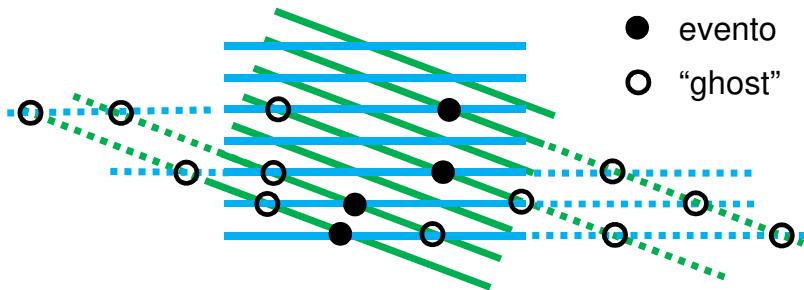




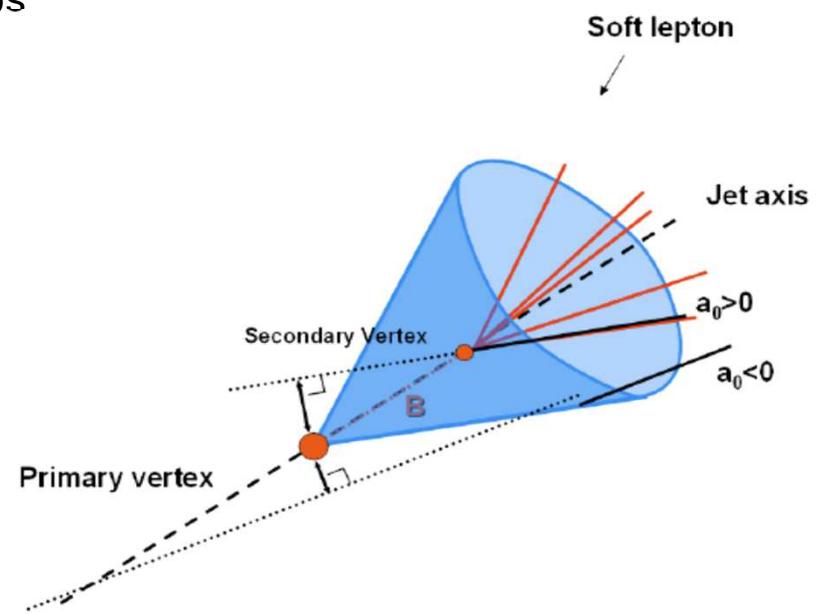
Strips vs. pixels

Obtener la resolución puntual con solamente una coordenada no es suficiente información para reconstruir un vértice secundario

Con muy alta densidad de partículas las ambigüedades en los strips se incrementan dramáticamente



→ Detectores de pixel permiten la reconstrucción 2D a altas densidades de partículas sin ambigüedad





Tecnología de pixeles híbrida

Es la opción tecnológica clásica para detectores de pixel

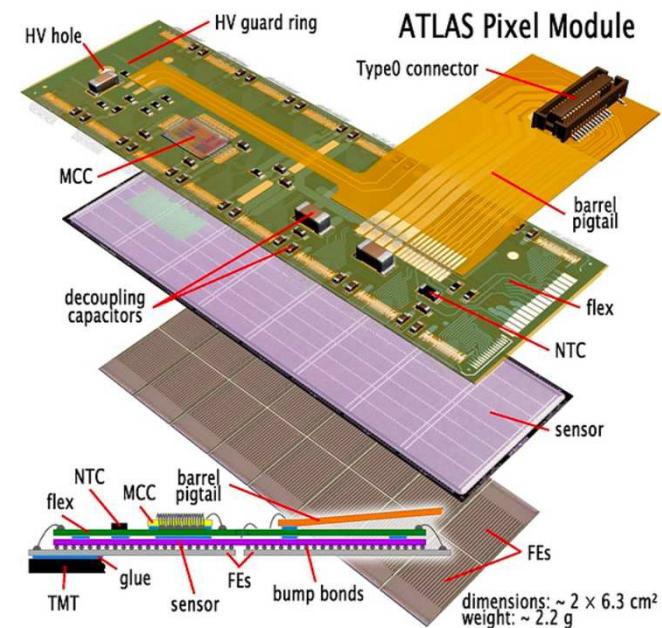
El chip de electrónica de lectura se monta directamente sobre el detector mediante bump bonds

El desarrollo del sensor y la electrónica puede ser separado (como en los detectores de micropistas)

 **Buena resolución** con dos coordenadas (dependiente del tamaño de pixel y la compartición de carga entre pixeles)

 Rápida lectura

 Muy resistente a la radiación





Tecnología de pixeles híbrida

Es la opción tecnológica clásica para detectores de pixel

El chip de electrónica de lectura se monta directamente sobre el detector mediante bump bonds

El desarrollo del sensor y la electrónica puede ser separado (como en los detectores de micropistas)

 **Buena resolución** con dos coordenadas (dependiente del tamaño de pixel y la compartición de carga entre pixeles)

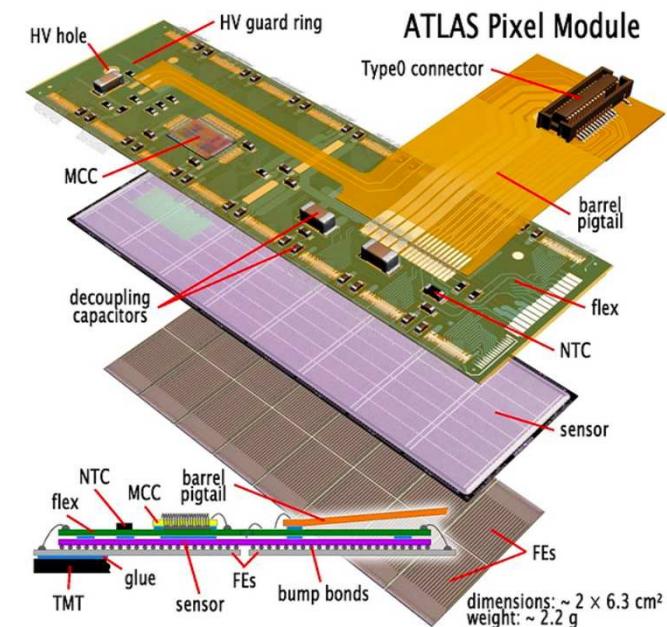
 Rápida lectura

 Muy resistente a la radiación

 Número de canales muy alto: $\sim N^2$ vs. N para un área dada → **(electrónica de) lectura muy compleja y mayor consumo**

 Mayor complejidad en la fabricación de los detectores de pixel supone un **coste más elevado**

 El área del pixel (y su resolución espacial) viene definida por el tamaño del chip de lectura





Tecnología de pixeles híbrida

Es la opción tecnológica clásica para detectores de pixel

El chip de electrónica de lectura se monta directamente sobre el detector mediante bump bonds

El desarrollo del sensor y la electrónica puede ser separado (como en los detectores de micropistas)

 **Buena resolución** con dos coordenadas (dependiente del tamaño de pixel y la compartición de carga entre pixeles)

 Rápida lectura

 Muy resistente a la radiación

 Número de canales muy alto: $\sim N^2$ vs. N para un área dada → **(electrónica de) lectura muy compleja y mayor consumo**

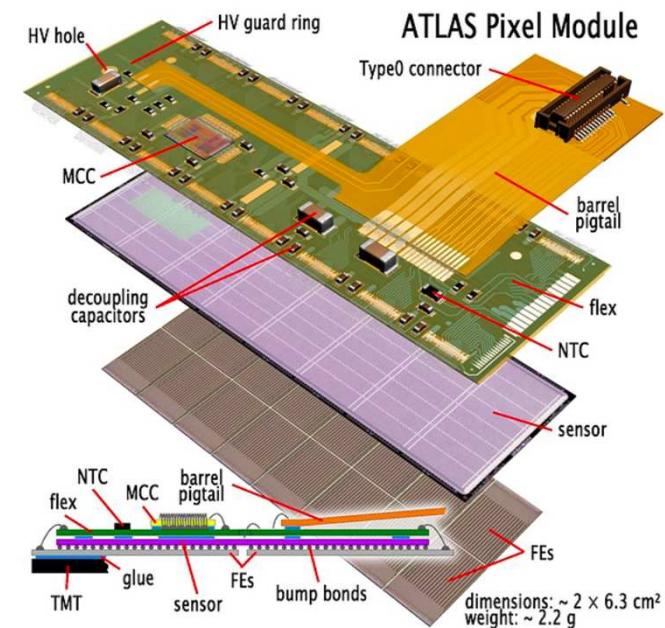
 Mayor complejidad en la fabricación de los detectores de pixel supone un **coste más elevado**

 El área del pixel (y su resolución espacial) viene definida por el tamaño del chip de lectura

Debido a su velocidad, segmentación, y resistencia a la radiación son la opción preferente para detectores de vértices (vertex detectors) cercanos al haz

CMS: 65 millones de canales, $150 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$

ATLAS: 80 millones de canales, $50 \mu\text{m} \times 425 \mu\text{m}$





Tecnologías alternativas para pixeles híbridos

Sensores pixel 3D como alternativa a los planares

Los electrodos se procesan en el interior del sustrato

Los pares e/h recorren mucha menos distancia en el detector

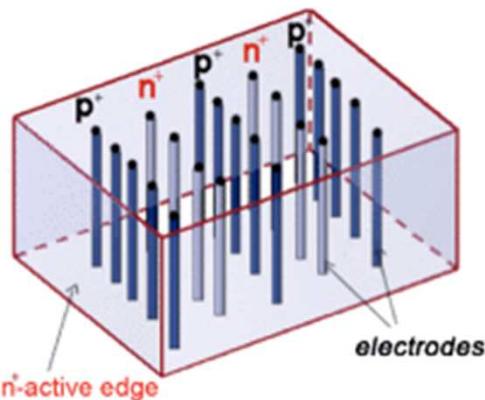
→ Tiempo de colección reducido

Mucho menor voltaje de vaciado

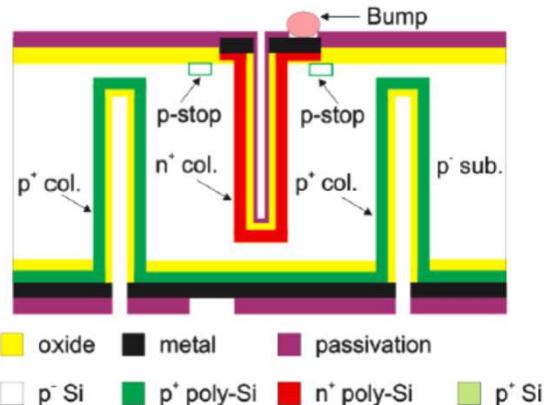
→ menor consumo

Menor carga compartida entre electrodos, lo que reduce la ambigüedad

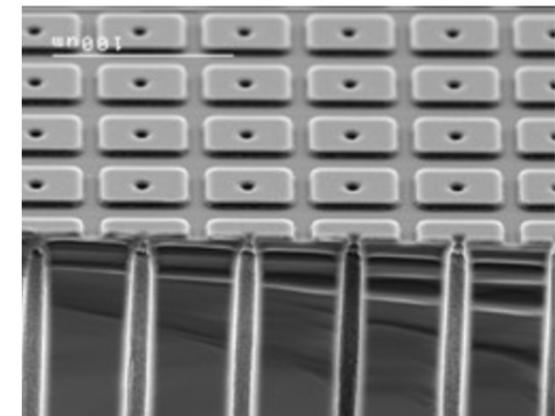
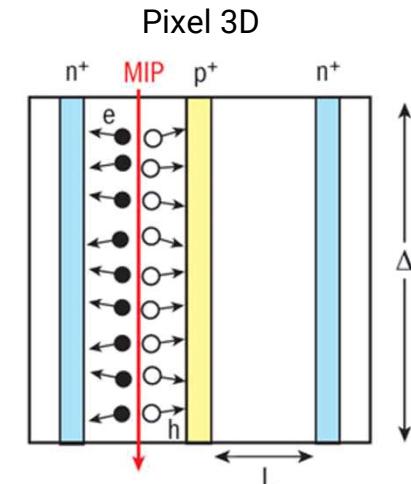
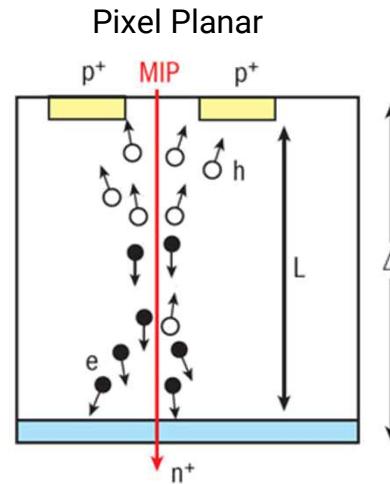
Mayor resistencia a la radiación



Obertino et al., <https://doi.org/10.1016/j.nima.2013.04.048>



Lange et al., arXiv:1511.02080

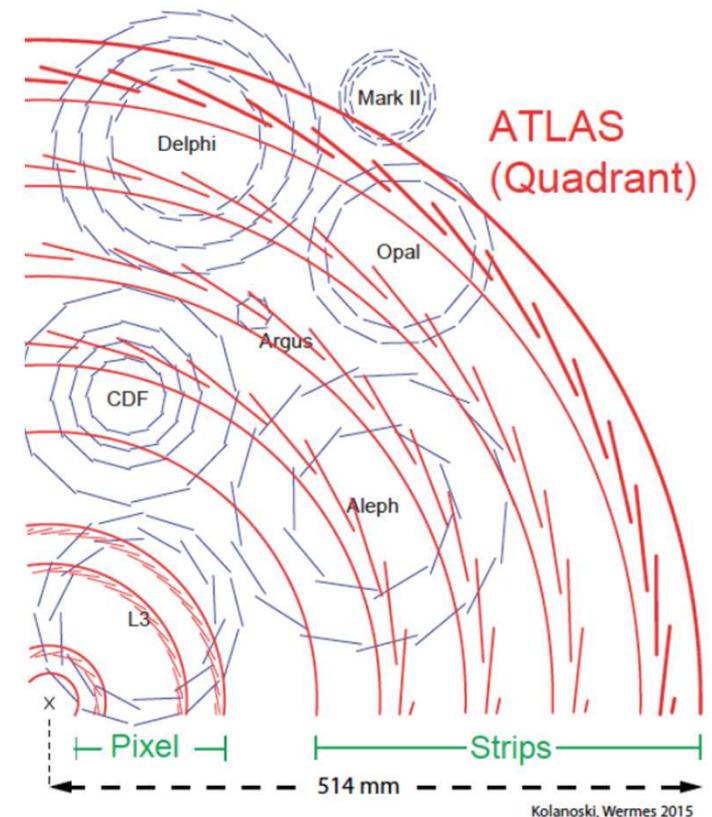
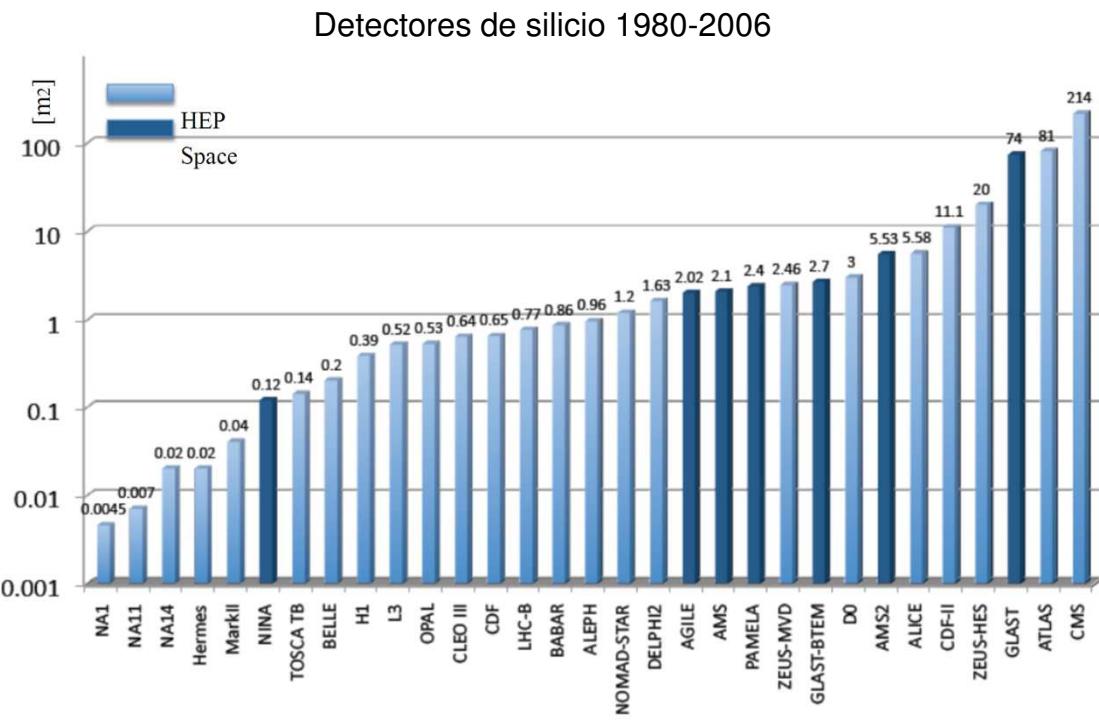


Pellegrini et al., IMB-CNM



Micropistas y pixeles híbridos como detectores de partículas

Silicio como detector en espacio y física de altas energías





Micropistas y pixeles híbridos como detectores de partículas

Silicio en altas energías:

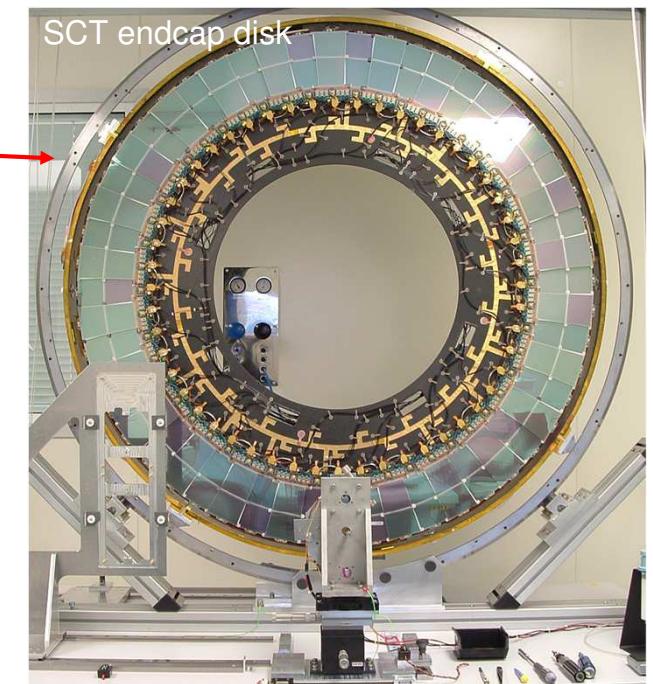
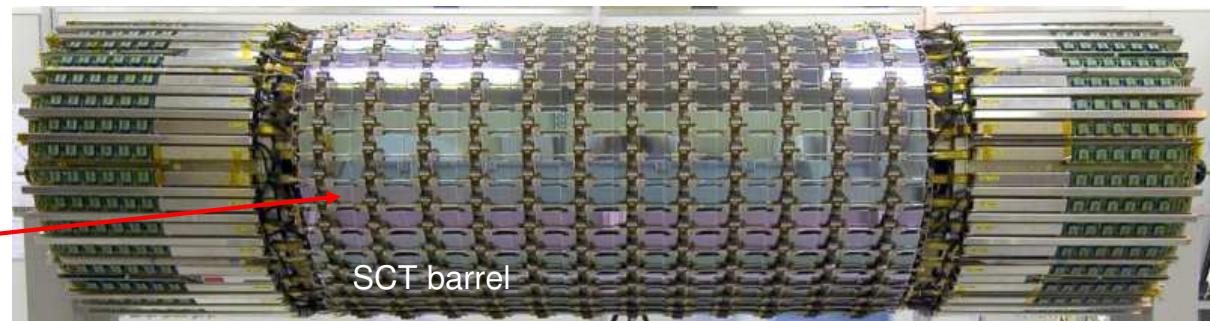
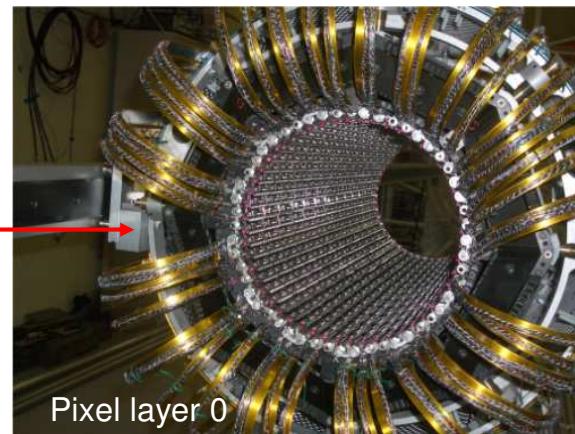
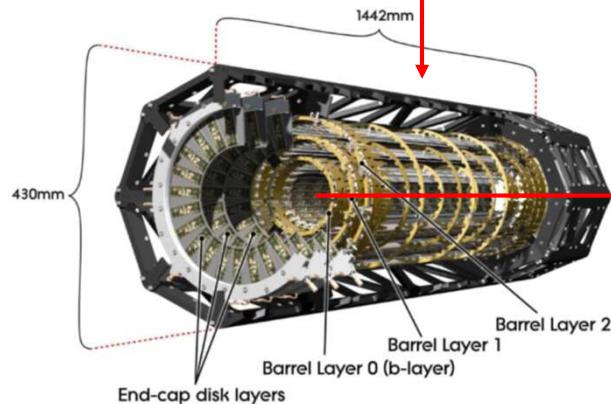
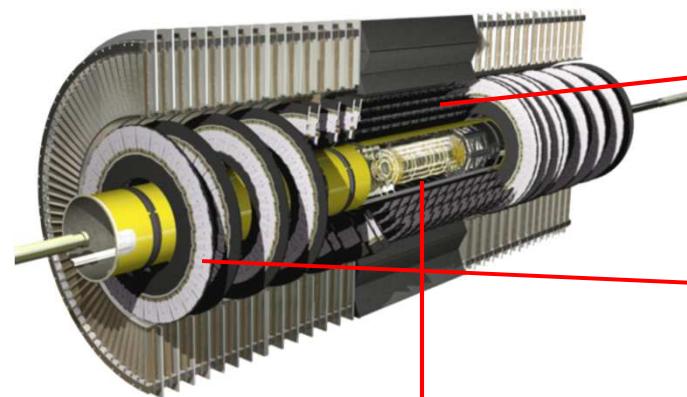
Todos los experimentos del LHC poseen detectores de silicio de vértices y de trazas

→ Micropistas o pixeles híbridos



Micropistas y pixeles híbridos como detectores de partículas

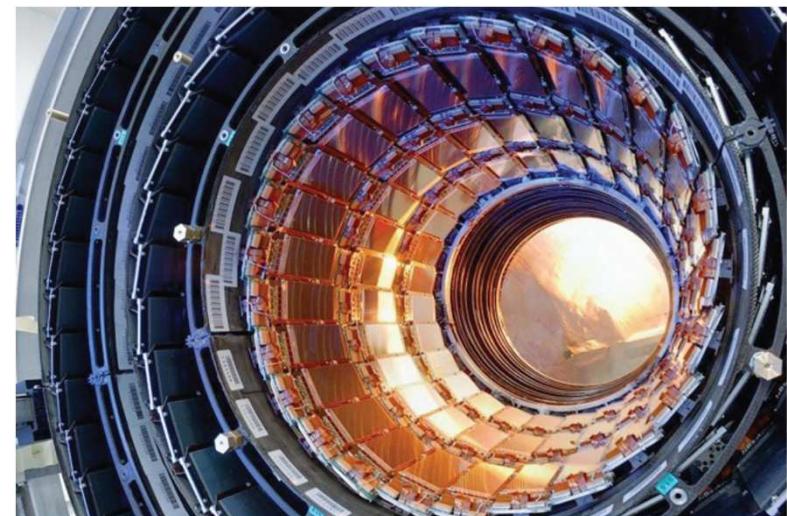
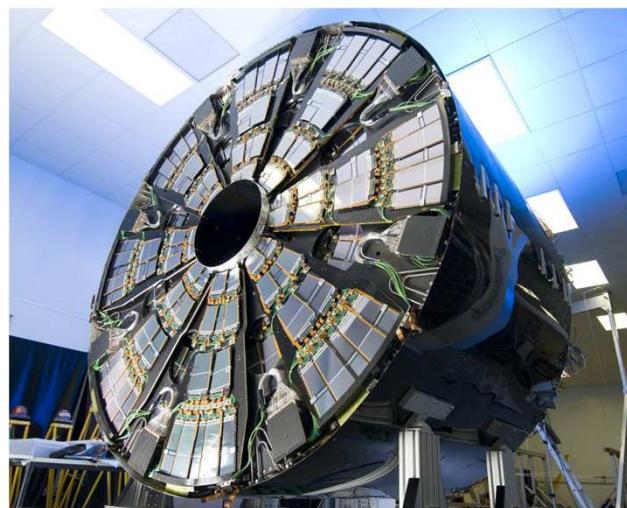
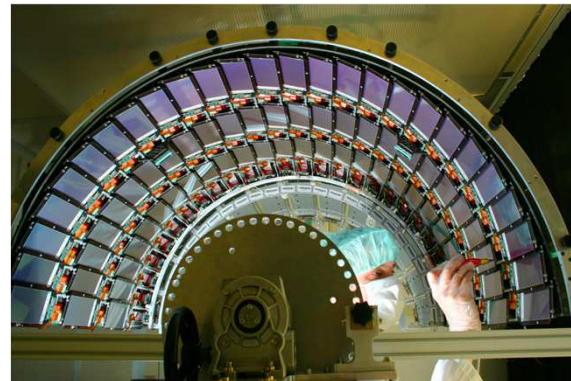
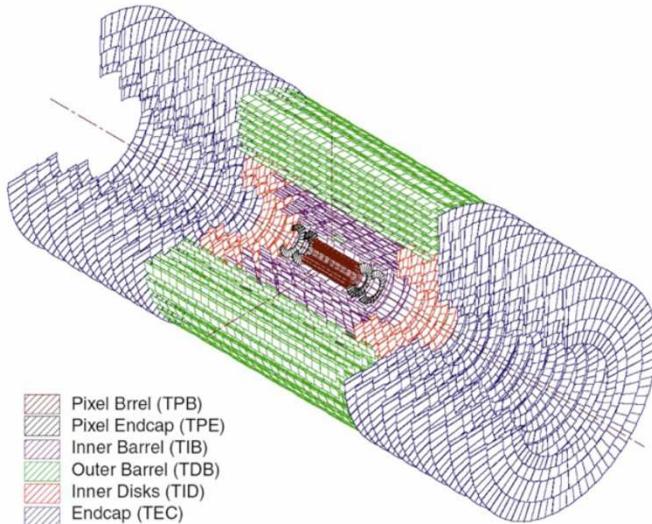
ATLAS: Pixels y strips





Micropistas y pixeles híbridos como detectores de partículas

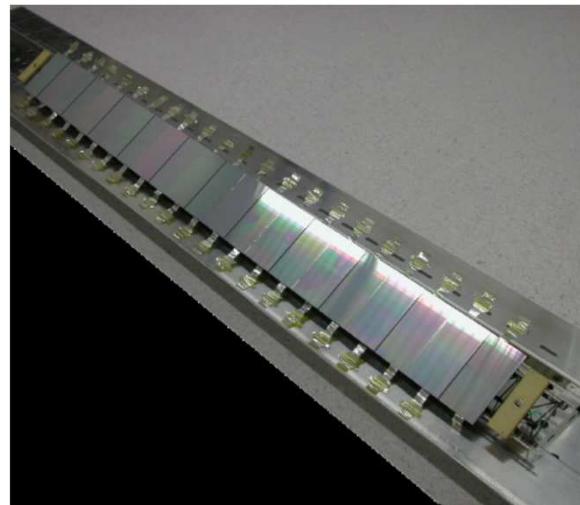
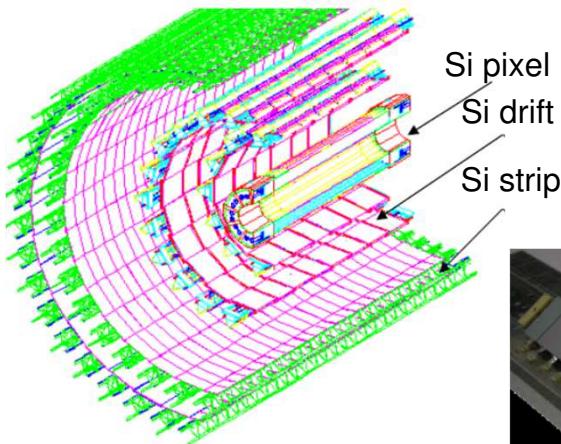
CMS: el mayor detector de silicio jamás construido hasta ahora, 70M canales, 200 m²



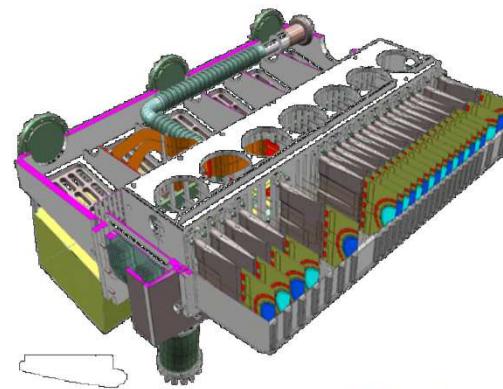


Micropistas y pixeles híbridos como detectores de partículas

ALICE: strips, pixels, drift



LHCb: VELO, strips, el más cercano al haz

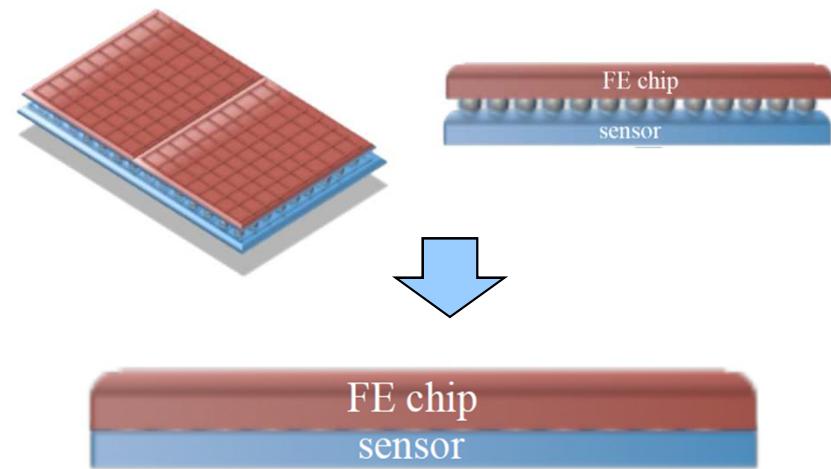




Sensores activos de pixel monolítico: MAPS

Nueva idea: **procesar el sensor y la electrónica en el mismo substrato de silicio**

La tecnología de CMOS monolítico asaltó el mercado con las cámaras digitales de los smartphones



Sensores activos de pixel monolítico: MAPS

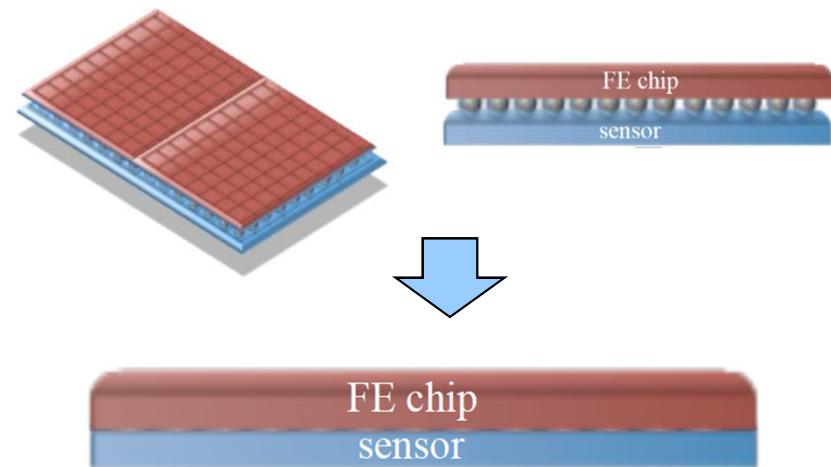
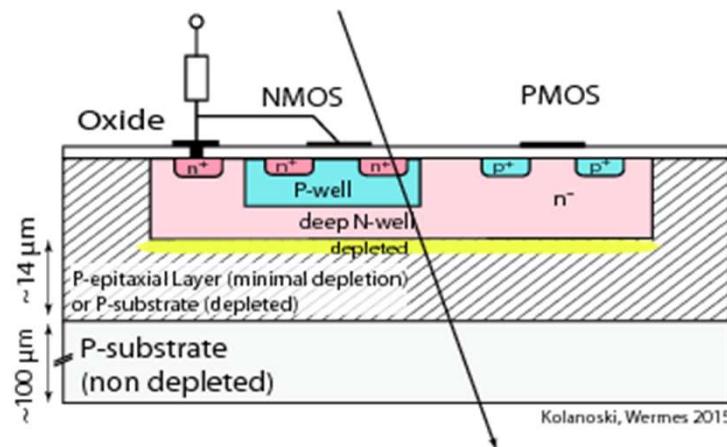
Nueva idea: **procesar el sensor y la electrónica en el mismo substrato de silicio**

La tecnología de CMOS monolítico asaltó el mercado con las cámaras digitales de los smartphones

Crecimiento de una capa de silicio epitaxial con alta resistividad en donde se produce absorción de fotones y la electrónica es implementada

→ **CMOS monolítico (Monolithic Active Pixel Sensors, MAPS)**: Uso de la capa epitaxial para colección de carga por difusión

→ **MAPS vaciado (Depleted MAPS, DMAPS)**: Uso de sustratos de alta resistividad en líneas de fabricación CMOS para colección de carga por arrastre , utilizando todo el volumen del sustrato





Sensores activos de pixel monolítico: MAPS

MAPS: Uso de la capa epitaxial para colección de carga por difusión

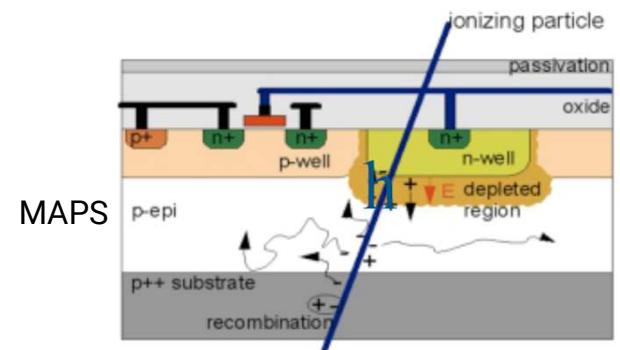
Corriente por difusión generada en la capa epitaxial es más lenta: ~ 100 ns

Capa epitaxial es fina (~15 - 20 μm): carga depositada menor, ~ 1500e $^-$ /MIP

Estructuras CMOS complejas solo pueden ser posibles fuera de la región de pixel activa

Es posible usar sustratos ultradelgados (<100 μm) y bajo consumo

Útil para aplicaciones en donde el tiempo de colección no es critico





Sensores activos de pixel monolítico: MAPS

MAPS: Uso de la capa epitaxial para colección de carga por difusión

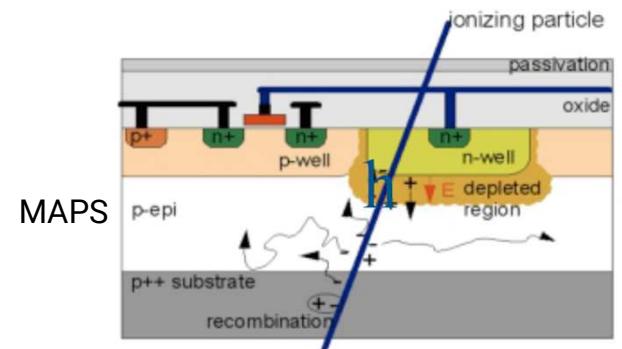
Corriente por difusión generada en la capa epitaxial es más lenta: ~ 100 ns

Capa epitaxial es fina ($\sim 15 - 20 \mu\text{m}$): carga depositada menor, $\sim 1500\text{e}^-/\text{MIP}$

Estructuras CMOS complejas solo pueden ser posibles fuera de la región de pixel activa

Es posible usar sustratos ultradelgados ($<100 \mu\text{m}$) y bajo consumo

Útil para aplicaciones en donde el tiempo de colección no es critico



MAPS vaciado (Depleted MAPS, DMAPS): Uso de sustratos de alta resistividad

Colección de carga por arrastre , utilizando todo el volumen del sustrato

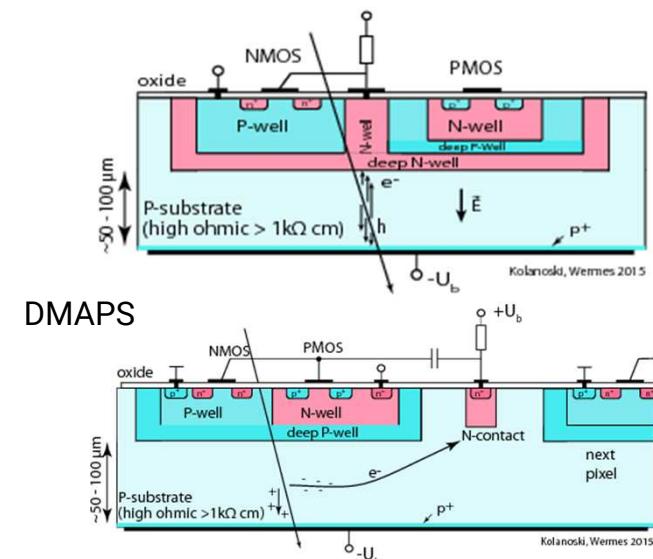
→ Tiempo de colección de carga comparable a pixeles híbridos

Permite alcanzar regiones de vaciado de hasta $150 \mu\text{m}$ bajo el electrodo de colección

→ Carga depositada mayor que en MAPS convencional

Estructuras CMOS complejas son posibles

Útiles para aplicaciones de alta tasa de partículas (high rate) y ambientes muy radioactivos





Algo intermedio: DEPFETs

DEPFETs: Electrónica activa dentro de cada pixel del sensor

Un transistor MOSFET dentro del sustrato de cada pixel

→ Etapa de amplificación interna

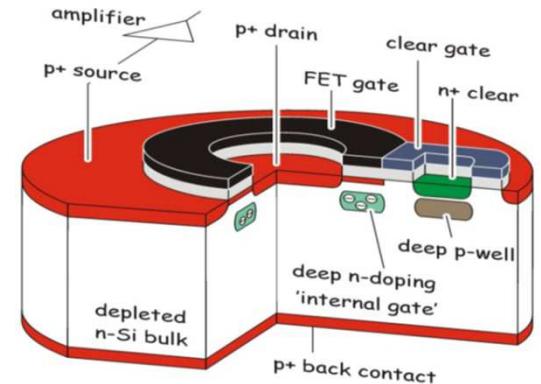
Señal elevada debido al vaciado completo del sustrato

Ruido extremadamente bajo debido a la baja capacitancia del electrodo de colección: $\sim 1-2 \text{ e}^-$ a T ambiente!

→ Excelente SNR

→ Dispositivos delgados

Tiempos de colección largos (shaping time): $\sim \mu\text{s}$



Bähr et al., doi:10.1140/epjc/s10052-017-5474-5



Algo intermedio: DEPFETs

DEPFETs: Electrónica activa dentro de cada pixel del sensor

Un transistor MOSFET dentro del sustrato de cada pixel

→ Etapa de amplificación interna

Señal elevada debido al vaciado completo del sustrato

Ruido extremadamente bajo debido a la baja capacitancia del electrodo de colección: $\sim 1-2 \text{ e}^-$ a T ambiente!

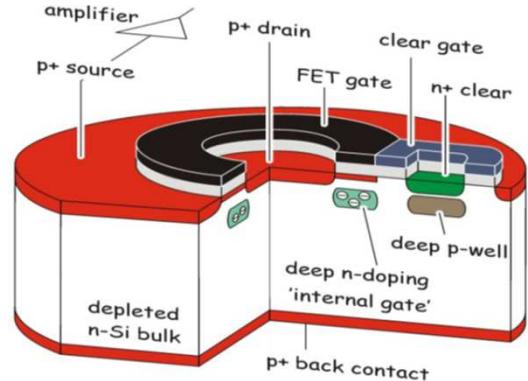
→ Excelente SNR

→ Dispositivos delgados

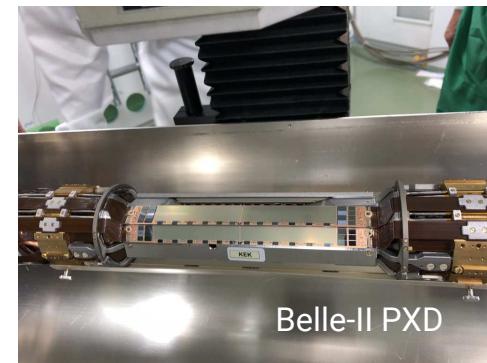
Tiempos de colección largos (shaping time): $\sim \mu\text{s}$

Aplicaciones:

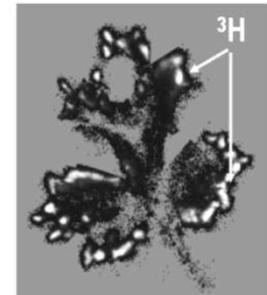
- Experimentos de física de partículas para partículas con bajo momento ($< 20 \text{ GeV}$) ⇒ Belle II detector
- Astronomía de rayos X (1 keV)
- Autoradiografía con tritio en moléculas biológicas (2.5 keV)



Bähr et al., doi:10.1140/epjc/s10052-017-5474-5



Belle-II PXD



Belle-II Collaboration

Wermes et al.,
arXiv:physics/0312135v1



Charged Coupled Devices (CCDs)

Los **dispositivos de carga acoplada (Charged coupled Devices, CCDs)** eran la base de las videocámaras durante décadas, hasta la aparición de los MAPS

Detección de fotones

Una capa de silicio epitaxial funciona como volumen activo

Una pequeña capa de óxido junto con contactos metálicos forma uniones MOS en la superficie

Las cargas recogidas se transportan a la salida moviéndose en la interfaz entre óxido y semiconductor mediante señales alternas en los electrodos (“bucket chain”)

Los píxeles se leen de manera secuencial, con frecuencias que pueden alcanzar \sim MHz

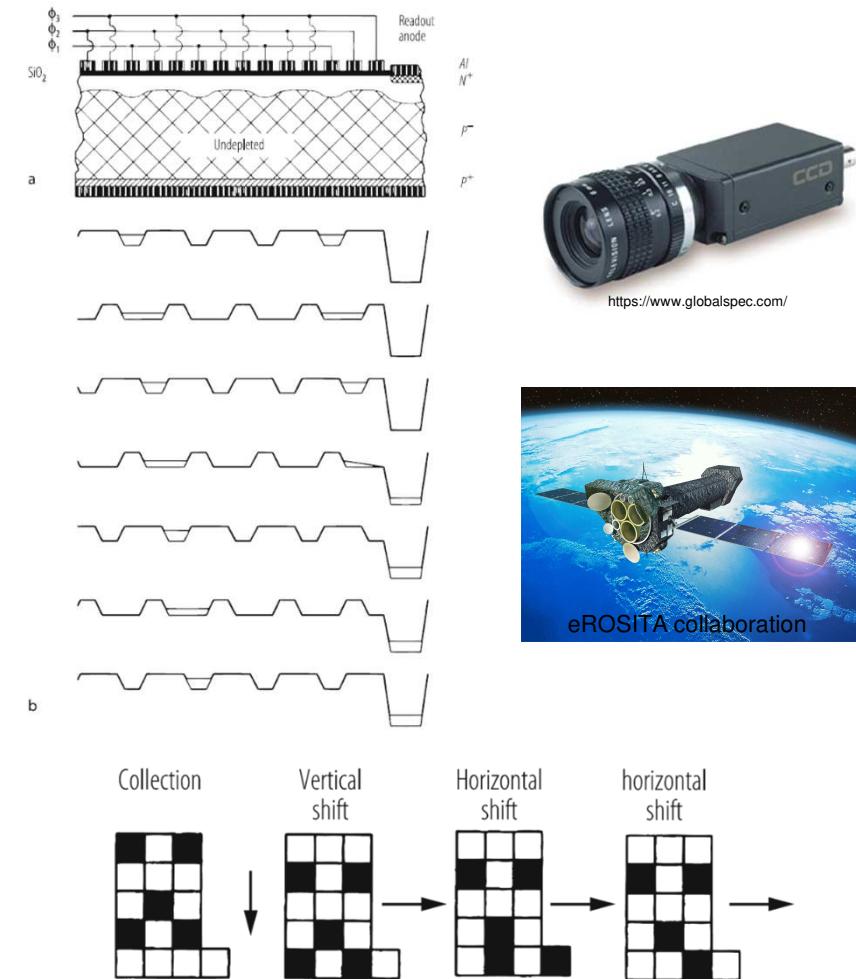
El color se obtiene con filtros en cada celda

Aplicaciones en imagen óptica:

Cámaras de vídeo

Astronomía de rayos X: eROSITA X-rays telescope

Física de partículas (baja tasa de partículas): Experimento SLD





Detectores ultrarrápidos: SiPMs y LGADs

Detectores “4D”: resolución espacial (buena) y temporal (excelente)

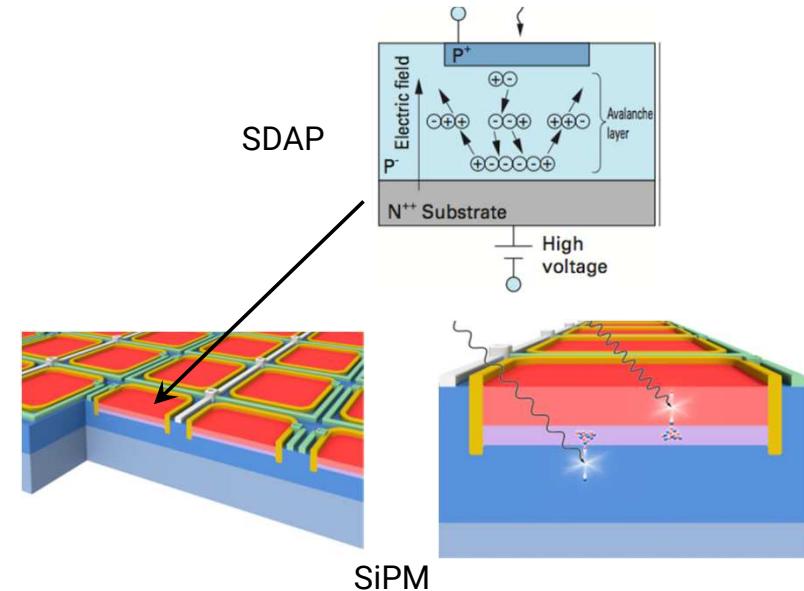
Hacen uso de **amplificación por avalancha** del diodo de silicio, operando en el régimen de Geiger-Müller (single diode avalanche photodiode)

Resoluciones temporales del orden de ~ 30-100 ps!!

Fotomultiplicadores de Silicio (Silicon photomultipliers, SiPMs):

Grandes matrices de diodos de fotomultiplicación por avalancha SDAP

Excelentes para cristalografía, aplicaciones médicas





Detectores ultrarrápidos: SiPMs y LGADs

Detectores “4D”: resolución espacial (buena) y temporal (excelente)

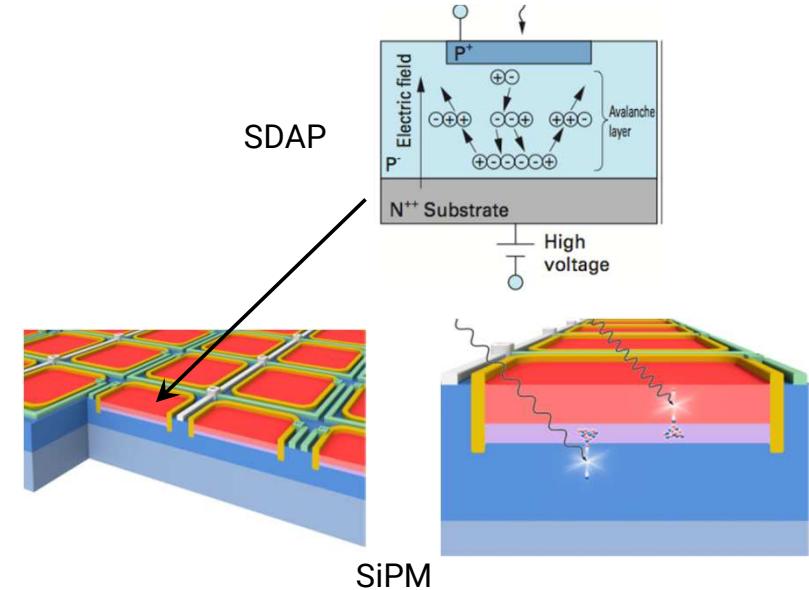
Hacen uso de **amplificación por avalancha** del diodo de silicio, operando en el régimen de Geiger-Müller (single diode avalanche photodiode)

Resoluciones temporales del orden de ~ 30-100 ps!!

Fotomultiplicadores de Silicio (Silicon photomultipliers, SiPMs):

Grandes matrices de diodos de fotomultiplicación por avalancha SDAP

Excelentes para cristalografía, aplicaciones médicas



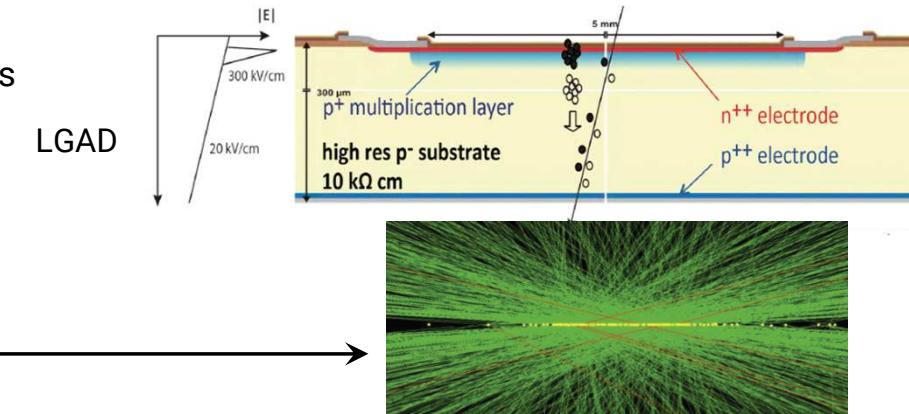
Detectores de avalancha de baja ganancia (low gain avalanche detectors, LGADs)

Utilizan finas de multiplicación de carga para su uso en física de altas energías

La amplificación se mantiene controlada en una región cercana al electrodo para mantener información en energía

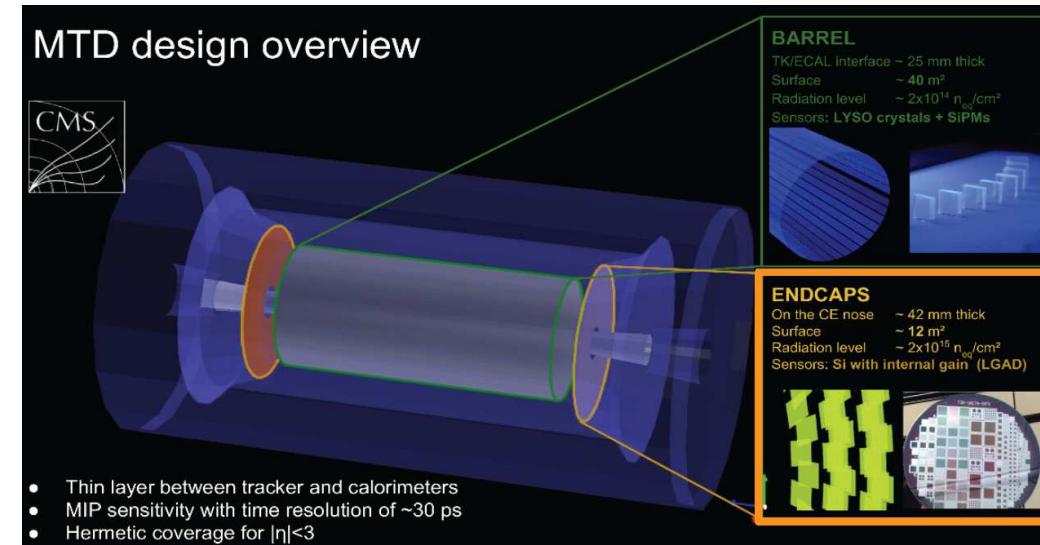
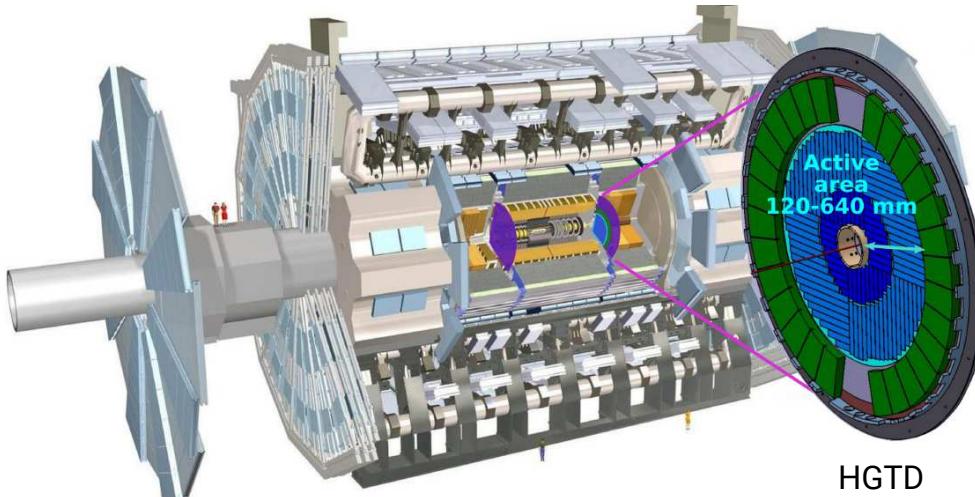
Resolución temporal se mantiene

→ Muy útil para separar vértices primarios en condiciones de alto apilamiento





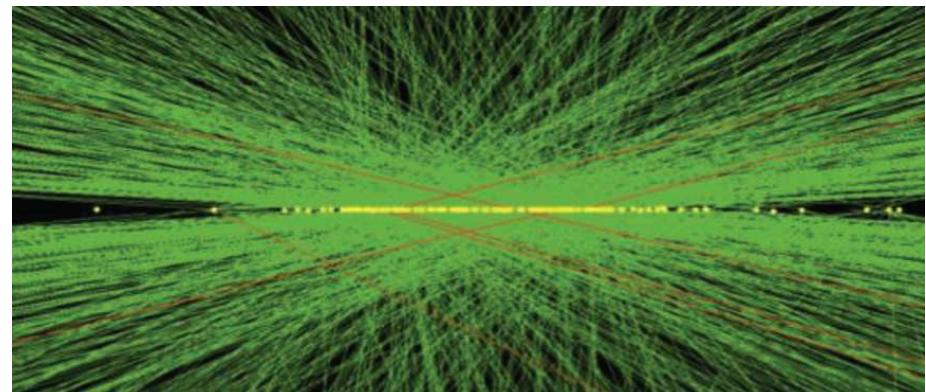
Detectores ultrarrápidos: SiPMs y LGADs



La mejora de los detectores ATLAS y CMS para el HL-LHC tienen planeada la inclusión de capas de detección 4D

ATLAS: LGADs

CMS: SiPM y LGADs





Otros materiales semiconductores (I)

Otros semiconductores se convierten en más atractivos que el silicio cuando demandas especiales juegan en contra de las ventajas del silicio ($Z=14$)

→ eficiencia de detección de rayos X $\propto Z^5$



Otros materiales semiconductores (I)

Otros semiconductores se convierten en más atractivos que el silicio cuando demandas especiales juegan en contra de las ventajas del silicio ($Z=14$)

→ eficiencia de detección de rayos X $\propto Z^5$

Ge

Mayor resolución en energía:

- $Z=32$
- $E_g = 0.7 \text{ eV}$
- $\text{MIP} \sim 2.96 \text{ eV}$

Requiere refrigeración para mantener I_L bajo control

Usado en experimentos que requieren de muy alta resolución en energía

→ Física nuclear o astropartículas

Detección de WIMPs



Otros materiales semiconductores (I)

Otros semiconductores se convierten en más atractivos que el silicio cuando demandas especiales juegan en contra de las ventajas del silicio ($Z=14$)

→ eficiencia de detección de rayos X $\propto Z^5$

Ge

Mayor resolución en energía:

- $Z=32$
- $E_g = 0.7$ eV
- MIP ~ 2.96 eV

Requiere refrigeración para mantener I_L bajo control

Usado en experimentos que requieren de muy alta resolución en energía

→ Física nuclear o astropartículas

Detección de WIMPs

GaAs

Semiconductor compuesto III-V

$Z \sim 32$

$E_g = 1.43$

Red cristalina con muchas impurezas

→ Vida media de los portadores muy reducida: $\sim 10 - 20$ ns

Alta movilidad de los portadores

→ Electrónica de conmutación (switching)

Muy resistente a radiación ionizante

→ Aplicaciones militares



Otros materiales semiconductores (I)

Otros semiconductores se convierten en más atractivos que el silicio cuando demandas especiales juegan en contra de las ventajas del silicio ($Z=14$)

→ eficiencia de detección de rayos X $\propto Z^5$

Ge

Mayor resolución en energía:

- $Z=32$
- $E_g = 0.7$ eV
- MIP ~ 2.96 eV

Requiere refrigeración para mantener I_L bajo control

Usado en experimentos que requieren de muy alta resolución en energía

→ Física nuclear o astropartículas

Detección de WIMPs

GaAs

Semiconductor compuesto III-V

$Z \sim 32$

$E_g = 1.43$

Red cristalina con muchas impurezas

→ Vida media de los portadores muy reducida: $\sim 10 - 20$ ns

Alta movilidad de los portadores

→ Electrónica de conmutación (switching)

Muy resistente a radiación ionizante

→ Aplicaciones militares

CdTe, Cd(Zn)Te

Semiconductor compuesto II-VI

$Z \sim 50$

$E_g = 1.44 - 2.2$ eV

Propiedades no homogéneas de colección de carga

Sección eficaz de absorción de fotones muy superior al Si

→ Astronomía de rayos X

→ Imagen por rayos X



Otros materiales semiconductores (II)

Diamante CVD

Diamante policristalino obtenido mediante deposición química de vapor (Chemical Vapor Deposition, CVD)

Estructura de crecimiento característica

Alta movilidad de portadores ($1600\text{-}1800\text{ cm}^2/\text{Vs}$), pero tiempos de vida muy reducidos (1 ns)

Estructuras de grano de la red policristalina conllevan distorsiones en la reconstrucción espacial

→ Baja resolución espacial

$Z=6$ (carbono)

$E_g = 5.5\text{ eV}$ (casi aislante)

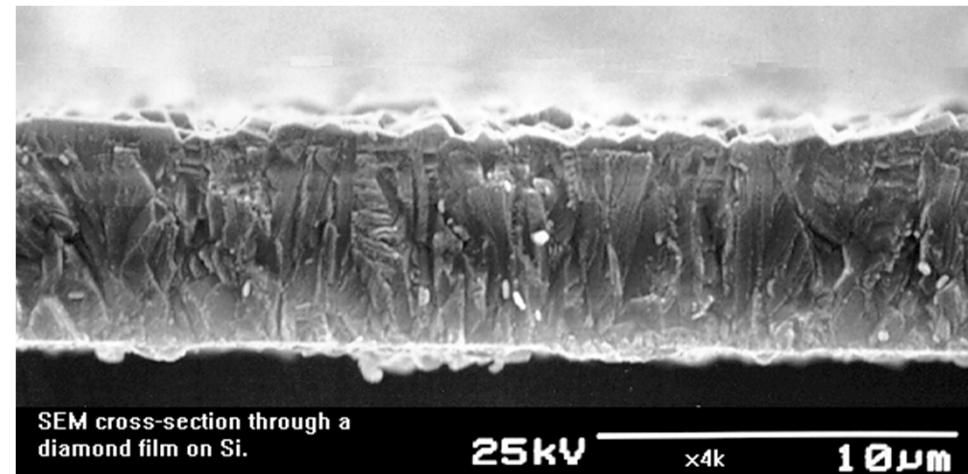
→ Detección de fotones

→ Corriente de fugas casi nula

Extremadamente resistente a la radiación

→ Puede operar a temperatura ambiente incluso en ambientes muy radioactivos

→ Aplicaciones de dosimetría



Efectos de la radiación en detectores semiconductores (un resumen muy poco detallado)





Efectos de la radiación en detectores de semiconductor

Los efectos de la radiación a escala atómica causan efectos macroscópicos en los detectores



Efectos de la radiación en detectores de semiconductor

Los efectos de la radiación a escala atómica causan efectos macroscópicos en los detectores

Ionización: Efectos superficiales

- Captura de carga en las regiones de óxido y trampas en la capa intersticial óxido-semiconductor
 - **Críticos para la electrónica** (crecida en la superficie del sustrato, capas de óxido fino)
- En detectores: incremento de la corriente de fugas, carga acumulada en regiones de óxido



Efectos de la radiación en detectores de semiconductor

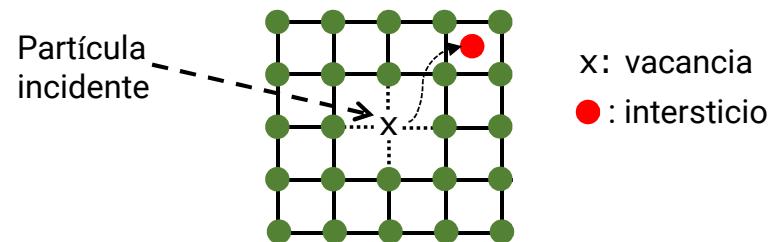
Los efectos de la radiación a escala atómica causan efectos macroscópicos en los detectores

Ionización: Efectos superficiales

- Captura de carga en las regiones de óxido y trampas en la capa intersticial óxido-semiconductor
 - **Críticos para la electrónica** (crecida en la superficie del sustrato, capas de óxido fino)
- En detectores: incremento de la corriente de fugas, carga acumulada en regiones de óxido

Desplazamiento: Efectos de sustrato

- Pérdida de energía no ionizante (NIEL): desplazamiento de átomos de la red cristalina
 - Creación de vacancias, intersticios y otros defectos compuestos en el sustrato del semiconductor (divacancias, pares de Frenkel, centros E,...)
- **Principal mecanismo de daño para detectores**





Efectos de la radiación en detectores de semiconductor

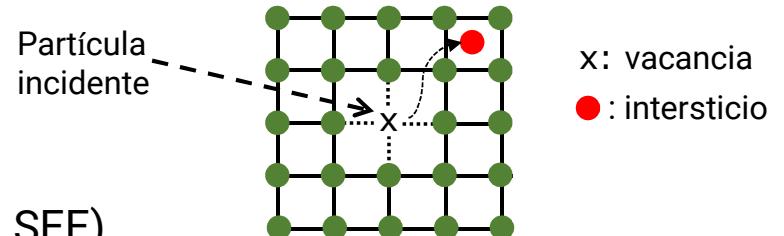
Los efectos de la radiación a escala atómica causan efectos macroscópicos en los detectores

Ionización: Efectos superficiales

- Captura de carga en las regiones de óxido y trampas en la capa intersticial óxido-semiconductor
 - **Críticos para la electrónica** (crecida en la superficie del sustrato, capas de óxido fino)
- En detectores: incremento de la corriente de fugas, carga acumulada en regiones de óxido

Desplazamiento: Efectos de sustrato

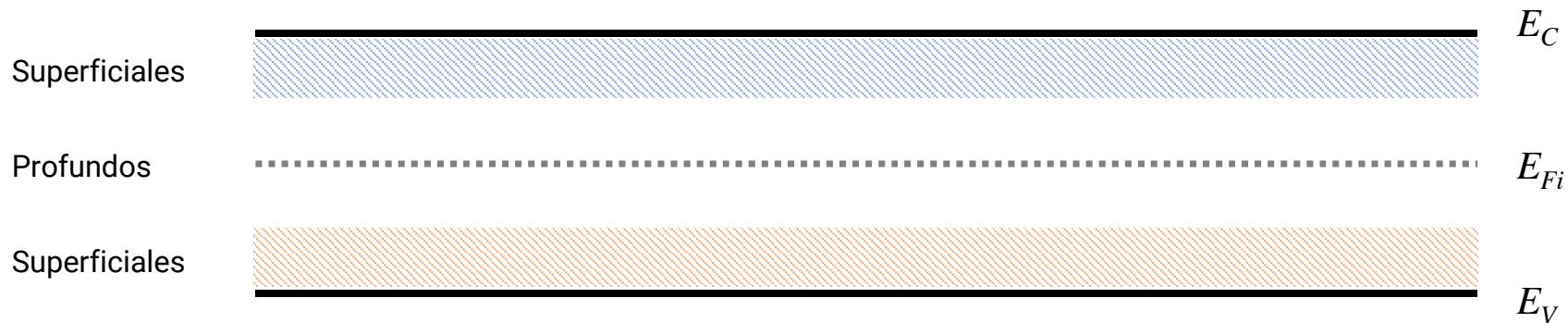
- Pérdida de energía no ionizante (NIEL): desplazamiento de átomos de la red cristalina
 - Creación de vacancias, intersticios y otros defectos compuestos en el sustrato del semiconductor (divacancias, pares de Frenkel, centros E,...)
- **Principal mecanismo de daño para detectores**



Otros: efectos por eventos aislados (Single Event Effects, SEE)

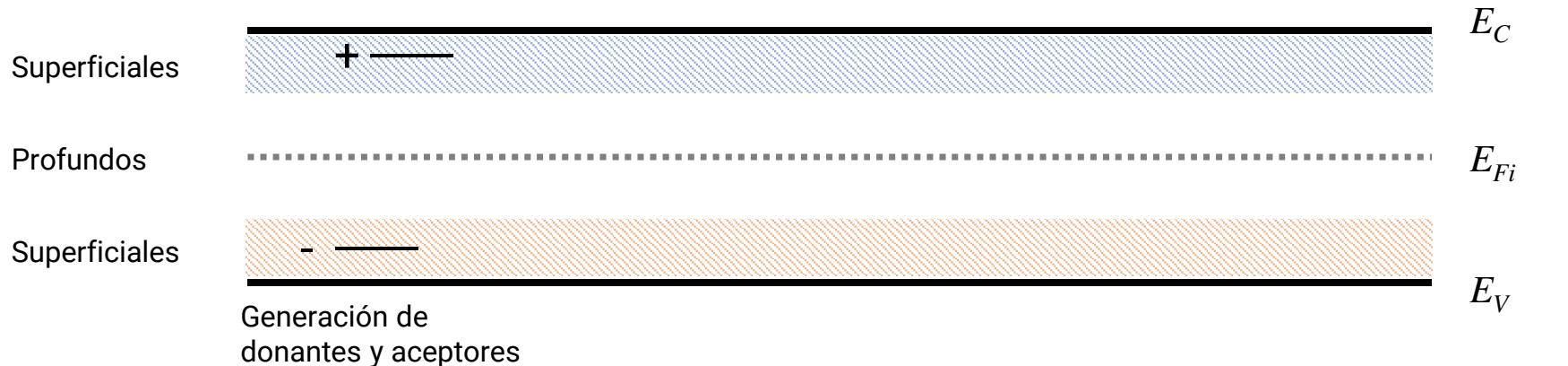
Efectos de la radiación en detectores de semiconductor

Los defectos en la periodicidad de la red cristalina del semiconductor se traducen en la creación de niveles de energía en la banda de energía prohibida (bandgap)



Efectos de la radiación en detectores de semiconductor

Los defectos en la periodicidad de la red cristalina del semiconductor se traducen en la creación de niveles de energía en la banda de energía prohibida (bandgap)

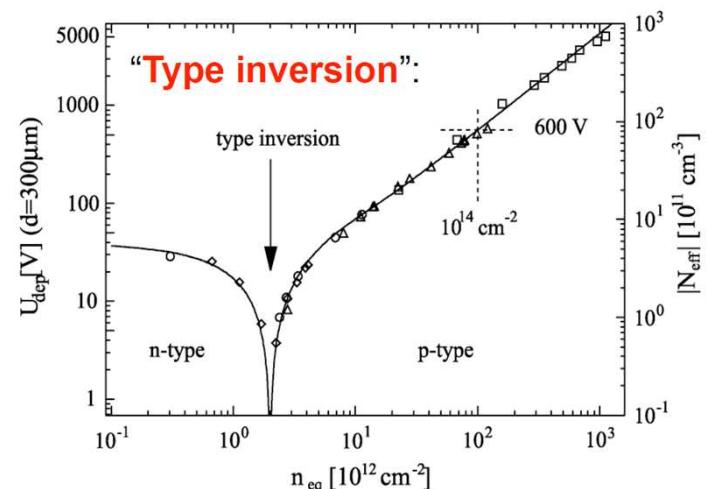


Generación de donantes y aceptores:

Cambio en la concentración de dopaje efectiva (N_{eff})

$$V_{dep} = d^2 N_{eff} \frac{q}{e\epsilon\epsilon_0}$$

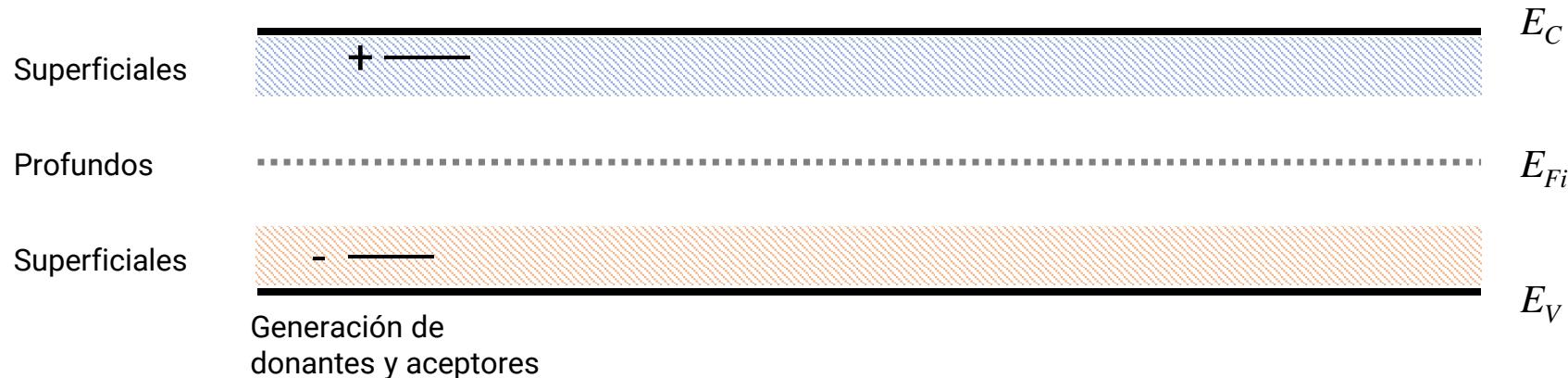
- Incremento en el voltaje de vaciado V_{dep}
- Operación en condiciones de semi-vaciado (underdepleted)
- En condiciones extremas: **inversión de tipo**





Efectos de la radiación en detectores de semiconductor

Los defectos en la periodicidad de la red cristalina del semiconductor se traducen en la creación de niveles de energía en la banda de energía prohibida (bandgap)

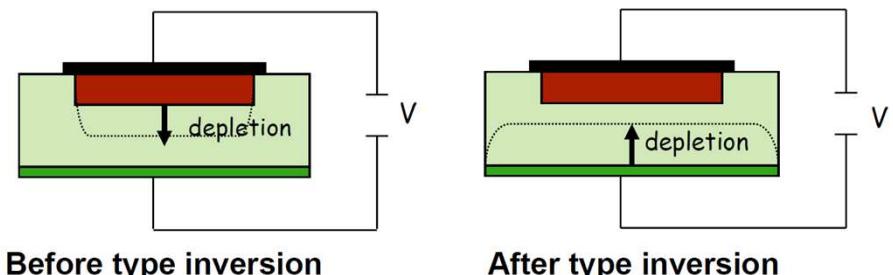


Generación de donantes y aceptores:

Cambio en la concentración de dopaje efectiva (N_{eff})

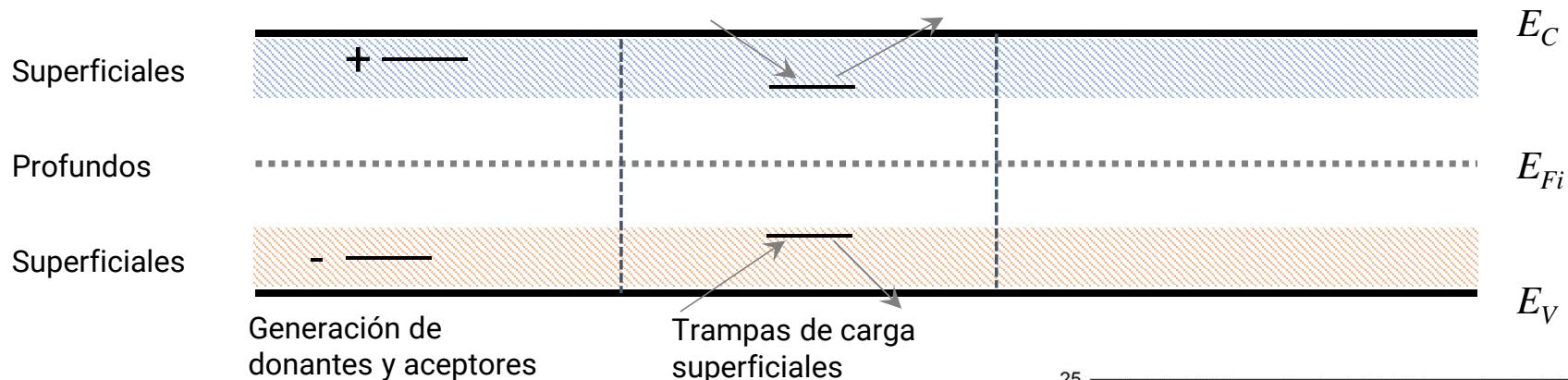
$$V_{dep} = d^2 N_{eff} \frac{q}{e\epsilon\epsilon_0}$$

- Incremento en el voltaje de vaciado V_{dep}
- Operación en condiciones de semi-vaciado (underdepleted)
- En condiciones extremas: **inversión de tipo**



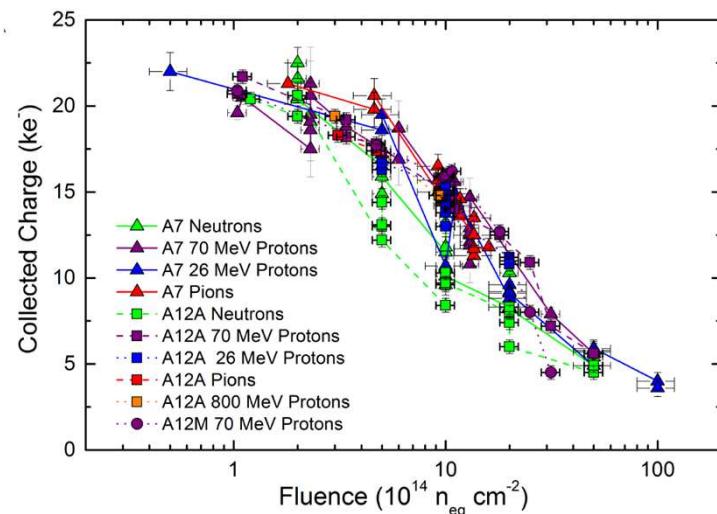
Efectos de la radiación en detectores de semiconductor

Los defectos en la periodicidad de la red cristalina del semiconductor se traducen en la creación de niveles de energía en la banda de energía prohibida (bandgap)



Trampas de carga superficiales:

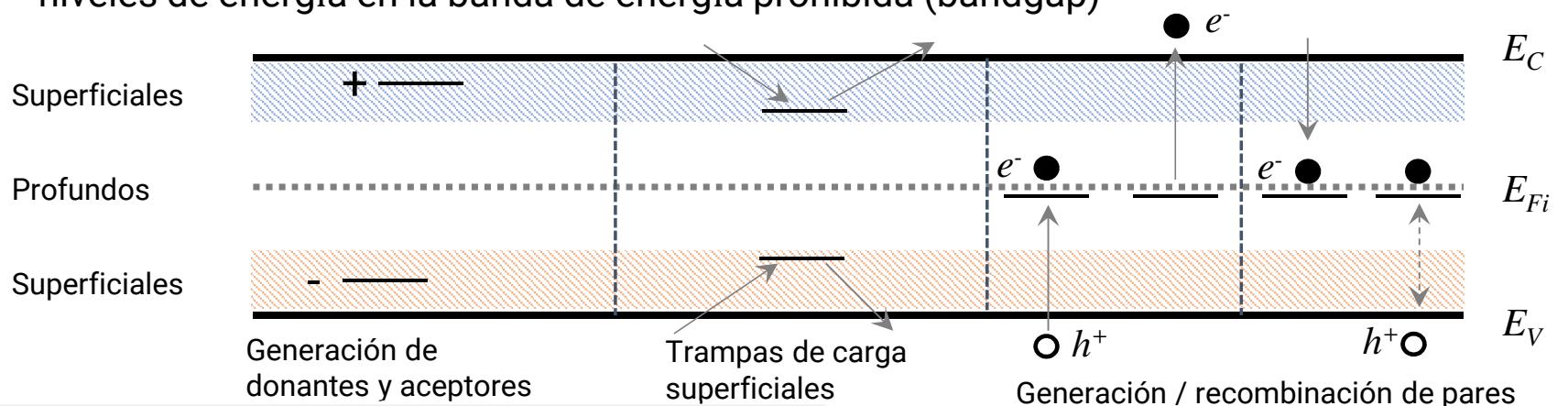
- Trampas temporales para portadores de carga
- Disminución de la carga recogida
- Reducción de la **eficiencia de colección de carga**





Efectos de la radiación en detectores de semiconductor

Los defectos en la periodicidad de la red cristalina del semiconductor se traducen en la creación de niveles de energía en la banda de energía prohibida (bandgap)



Generación y recombinación:

Incremento de la generación y recombinación térmica de e/h en el centro de la banda prohibida (midgap)

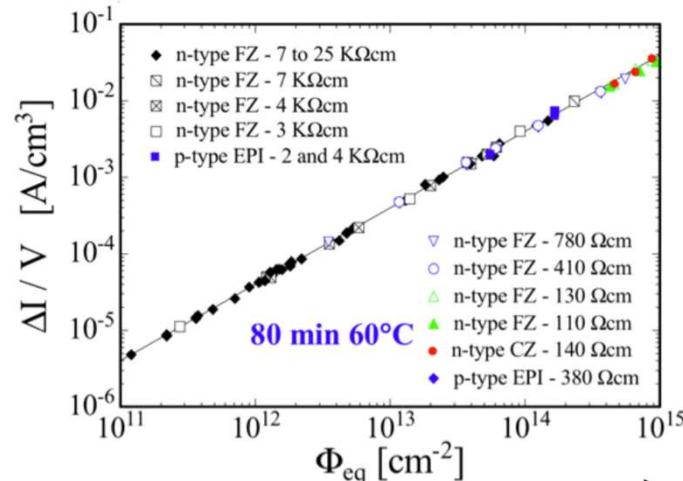
→ Incremento lineal de la **corriente de fugas I_L**

$$\alpha = \frac{\Delta I}{V \Phi_{eq}}$$

α : constante para varios ordenes de magnitud de fluencia

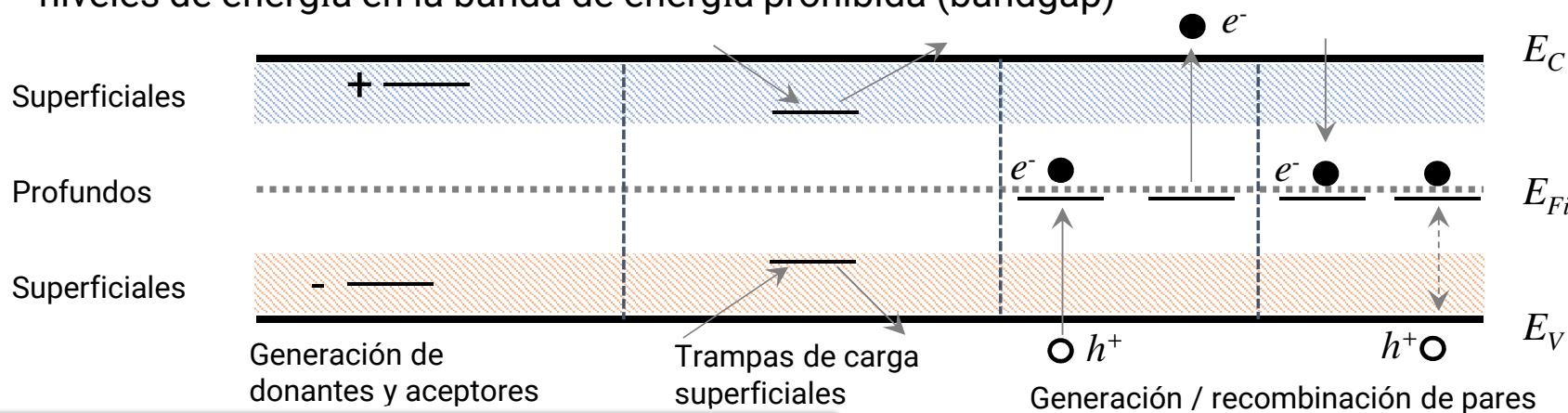
→ Incremento del **ruido** y de la avalancha térmica (thermal runaway)

→ **Mitigado enfriando el detector**



Efectos de la radiación en detectores de semiconductor

Los defectos en la periodicidad de la red cristalina del semiconductor se traducen en la creación de niveles de energía en la banda de energía prohibida (bandgap)



Generación y recombinación:

Incremento de la generación y recombinación térmica de e/h en el centro de la banda prohibida (midgap)

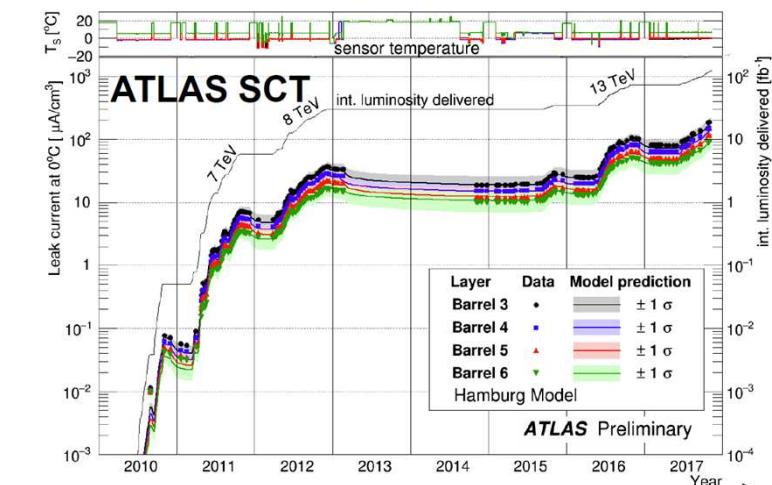
→ Incremento lineal de la **corriente de fugas I_L**

$$\alpha = \frac{\Delta I}{V \Phi_{eq}}$$

α : constante para varios ordenes de magnitud de fluencia

→ Incremento del **ruido** y de la avalancha térmica (thermal runaway)

→ **Mitigado enfriando el detector**





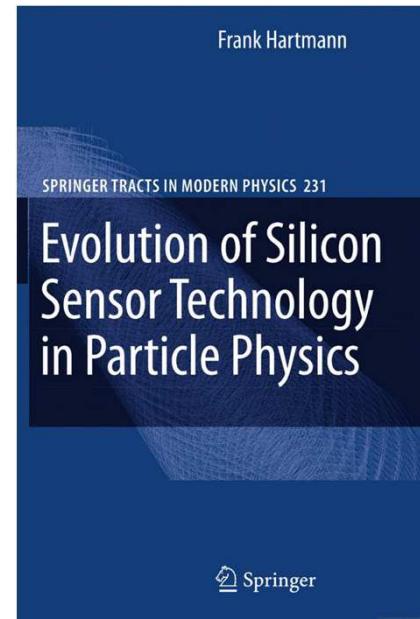
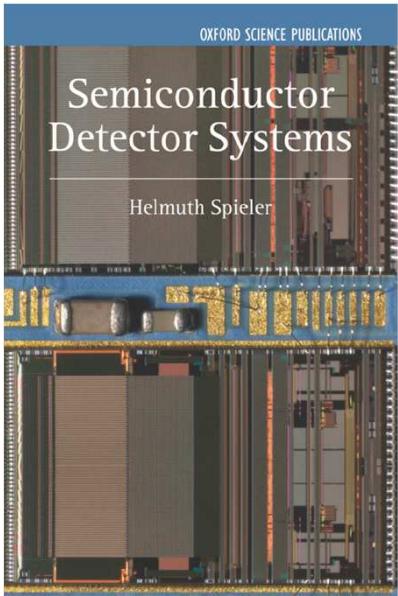
En resumen...

- Los detectores de semiconductor son de una importancia capital en muchas aplicaciones cotidianas así como en la física nuclear, fotónica y de partículas
- El silicio es de largo el semiconductor más usado
- El principio de funcionamiento general se basa en una unión pn polarizada en inversa
- Los detectores de micropistas y pixel son de largo los más comunes y no parece que vaya a cambiar en un futuro cercano
- La I+D para detectores de semiconductor siempre sigue los límites de la tecnología



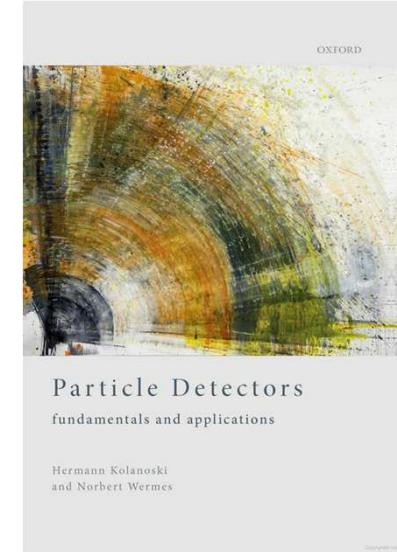
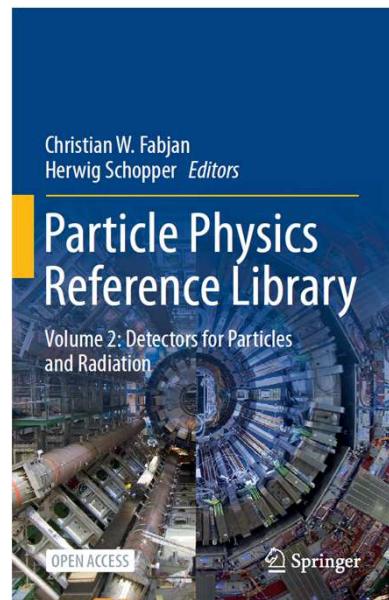
Bibliografía

H. Spieler, *Semiconductor detector systems*, 2005



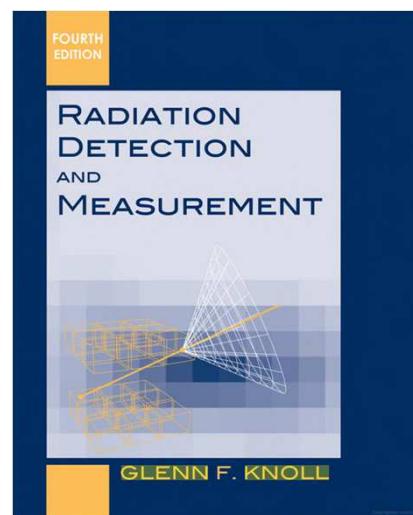
F. Hartmann, *Evolution of silicon sensor technology in particle physics*, 2009

G. Lutz, R. Klanner, [Particle physics reference library volumen 2](#), chapter 5: Solid state detectors, 2020



N. Wermes, H. Kolanoski, *Particle detectors*, 2020

G.F. Knoll, *Radiation detection and measurement*, 2010 (4th edition)



-  <http://laconga.redclara.net>
-  contacto@laconga.redclara.net



lacongaphysics



Latin American alliance for
Capacity buildiNG in Advanced physics
LA-CoNGA physics



Cofinanciado por el
programa Erasmus+
de la Unión Europea

El apoyo de la Comisión Europea para la producción de esta publicación no constituye una aprobación del contenido, el cual refleja únicamente las opiniones de los autores, y la Comisión no se hace responsable del uso que pueda hacerse de la información contenida en la misma.