

DETECTORES DE SEMICONDUCCIÓN

1. Introducción.
2. Propiedades básicas de los semiconductores.
 - 2.1. Estructura energética en bandas.
 - 2.2. Portadores de carga en los semiconductores.
 - 2.3. Concentración de portadores intrínsecos de carga.
 - 2.4. Movilidad de los portadores.
 - 2.5. Recombinación.
3. Semiconductores dopados.
 - 3.1. Desplazamiento del nivel de Fermi con el dopado.
 - 3.2. Semiconductores compensados. Detectores n-i-p.
4. La unión p-n: formación de la región de desertización.
 - 4.1. Potencial de contacto.
 - 4.2. Capacidad de la unión p-n.
 - 4.3. Uniones con alimentación inversa.
5. Características de los semiconductores como detectores.
 - 5.1. Potencial para la desertización total.
 - 5.2. Energía promedio para la creación de un par electrón – hueco.
 - 5.3. Linealidad.
 - 5.4. Corriente de fugas.
 - 5.5. Factor de Fano y resolución intrínseca.
 - 5.6. Sensibilidad y eficiencia intrínseca.
6. Estructuras de diodo para la construcción de detectores de silicio.
 - 6.1. Diodos de unión obtenida por difusión.
 - 6.2. Detectores de barrera superficial.
 - 6.3. Diodos obtenidos por implantación de iones.
7. Detectores de posición.
 - 7.1. Motivaciones físicas.
 - 7.2. Detectores de microstrips.
 - 7.2.1. Detectores microstrips de doble cara.
 - 7.2.2. Detectores pixel.



1. Introducción

✚ Están basados en **materiales semiconductores cristalinos**: Si, Ge,...

☛ Se utilizan en Física Nuclear y en prácticamente todos los experimentos de Física de Altas Energías, tanto en colisionadores como en experimentos de blanco fijo.

☛ **Física Nuclear:**

- Detección de partículas cargadas (α, β).
- Espectrometría γ .

☛ **Física de Altas Energías:**

- Detectores de trazas (μ -strips, pixels)
- Reconstrucción de vértices en desintegraciones de quarks pesados:

$$b \rightarrow c \rightarrow s \quad (\tau_b \approx 10^{-12} \text{ s})$$

- $I = \beta c \gamma \tau$ → Se necesitan resoluciones del orden de las micras.

☛ **Otras aplicaciones:**

- Espectrómetros en satélites espaciales.
- Detectores para diagnóstico médico.



1. Introducción (cont.)

Características fundamentales

- ☞ Tiempo de respuesta del orden de 10 ns.
- ☞ Resolución espacial del orden de 10 μm .
- ☞ Flexibilidad en el diseño.
- ☞ Poca cantidad de material (0.003 X_0 para un detector típico de 300 μm de espesor).
- ☞ Excelentes propiedades mecánicas.
- ☞ Respuesta lineal con la energía depositada.

☞ Elevada resolución energética. Se necesita 10 veces menor energía para crear un par (e^-, h^+) que para (e^-, I^+) en gases → mejor resolución que en los gases.

<i>Excitación Si</i>	→	3.6 eV
<i>Ionización Ar</i>	→	30 eV
<i>Fotoelectrón en un centelleador</i>	→	300 eV

Principio de operación

- ☞ El paso de la radiación ionizante genera pares “electrón - hueco” que son recolectados por un campo eléctrico.

Desventajas

- ☞ Requieren sistemas de criogenia (excepto el Si).
- ☞ La estructura cristalina se daña con la radiación.



2. Propiedades básicas de los semiconductores.

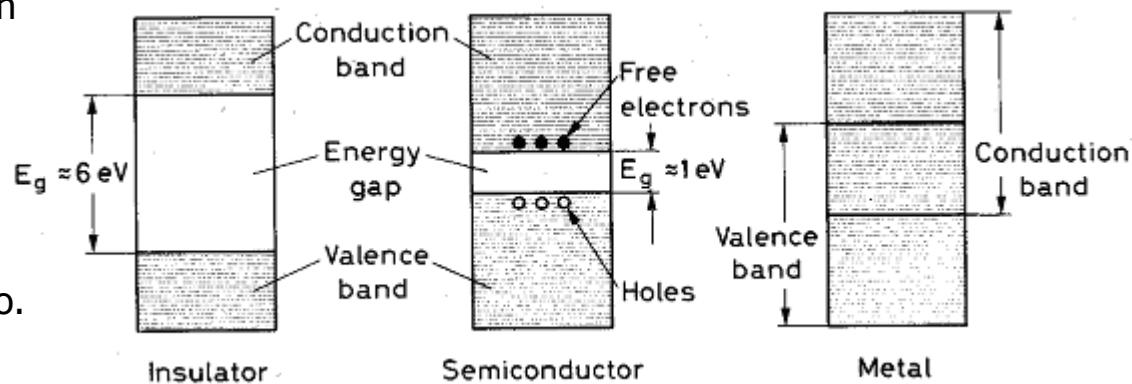
2.1. Estructura energética en bandas.

Consideraremos, en primer lugar, **semiconductores intrínsecos** ("puros"). Sin embargo, las impurezas juegan un papel muy importante: **pueden ampliar o limitar las características del material.**

Los niveles de las capas atómicas exteriores presentan una estructura en bandas:

- ☞ Banda de valencia.
- ☞ Banda prohibida (gap). No existen niveles energéticos disponibles.
- ☞ Banda de conducción.

Las bandas de **valencia** y **conducción** son regiones energéticas con niveles discretos muy próximos entre sí y que pueden considerarse como un continuo.

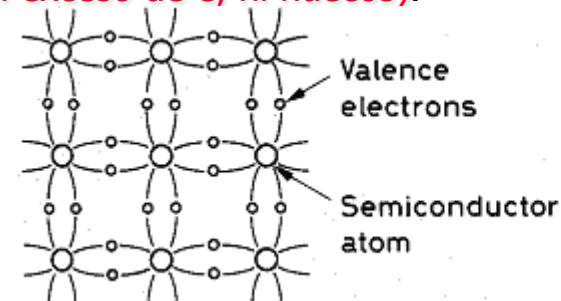
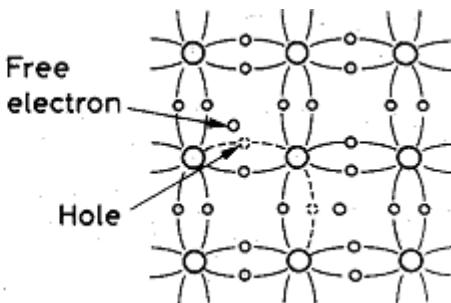


A temperatura ambiente se produce la excitación de algunos electrones desde la banda de valencia a la de conducción, donde los electrones se mueven libremente por el cristal. Aplicando un campo eléctrico se observará una pequeña corriente.

2.2. Portadores de carga en los semiconductores.

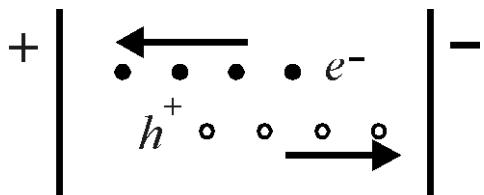
- Los átomos de **Si** y **Ge** presentan una estructura con **4 enlaces covalentes** (ni exceso de e-, ni huecos).

⇨ A **0 °K** los electrones están en la banda de valencia formando enlaces covalentes entre los átomos de la red.



⇨ A **temperaturas superiores** (ambiente), algunos electrones de la banda de valencia pueden pasar a la de conducción, generándose **huecos** en las posiciones que estos ocupaban. Los huecos pueden ser ocupados por **electrones de la banda de valencia** situados en enlaces vecinos.

- Los **huecos** actuarán como **portadores de carga +** → Corriente de huecos en la banda de valencia.
- Los **electrones** serán **portadores de carga -** → Corriente de electrones en la banda de conducción.



- ⇨ En un **semiconductor** ambas corrientes contribuyen a la corriente eléctrica.
- ⇨ En un metal **conductor** la carga es transportada únicamente por los electrones.

2.3. Concentración de portadores intrínsecos de carga.

- En el semiconductor se alcanza el **equilibrio**, en la concentración de pares **electrón – hueco**, cuando las condiciones son estables.

Equilibrio dinámico:

- ↗ Pares que se generan constantemente por excitación térmica.
- ↗ Electrones y huecos que se recombinan.

$$n_i = \text{concentración de } e^- = \text{concentración de } h^+$$

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp \left\{ \frac{-E_g}{2kT} \right\} = A T^{3/2} \exp \left\{ \frac{-E_g}{2kT} \right\}$$

300 °K →

Ge:	$n_i \approx 2.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$	→ 1 en 10^9
Si:	$n_i \approx 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$	→ 1 en 10^{12}

N_c, N_v → Densidades de estados en las bandas de conducción y valencia
(dependencia con $T^{3/2}$, estadística de Fermi-Dirac).

E_g → Anchura de la banda prohibida a 0 °K

k → Constante de Boltzmann

T → Temperatura



2.4. Movilidad de los portadores.

- Al aplicar un campo eléctrico externo los electrones y los huecos se desplazarán a través del semiconductor, con velocidades:

$$v_e = \mu_e E \quad v_h = \mu_h E \quad (\mu_e, \mu_h \rightarrow \text{movilidades})$$

Para un material dado:

$$\mu = f(T, E)$$

Propiedades del Silicio y Germanio	Si	Ge
Número atómico: Z	14	32
Peso atómico: A	28.1	72.6
Densidad [g/cm ³]	2.33	5.32
Constante dieléctrica (relativa)	12	16
Resistividad intrínseca (300 K) [Ωcm]	230000	45
Energía del gap (300 K) [eV]	1.1	0.7
Energía del gap (0 K) [eV]	1.21	0.785
Movilidad de electrones (300 K) [cm ² /Vs]	1350	3900
Movilidad de huecos (300 K) [cm ² /Vs]	480	1900

Dependencia con el campo

- Para Si a T normales (T = 300º K)

En el momento en que $\mu^\pm \propto 1/E$, la velocidad se satura, alcanzando un valor límite ($v \approx 10^7$ cm/s).

Parte de la energía cinética de los electrones y huecos se pierde por colisiones con los átomos de la red.

$E < 10^3 V/cm$	\rightarrow	$\mu^\pm = cte$	\rightarrow	$v^\pm \propto E$
$10^3 < E < 10^4 V/cm$	\rightarrow	$\mu^\pm \propto E^{-1/2}$	\rightarrow	$v^\pm \propto \sqrt{E}$
$E > 10^4 V/cm$	\rightarrow	$\mu^\pm \propto 1/E$	\rightarrow	$v^\pm \approx cte$



2.4. Movilidad de los portadores. (cont.)

Dependencia con la temperatura

En el intervalo $100 < T < 400^\circ \text{ K}$ $\rightarrow \mu \propto T^{-m}$

☞ m depende del tipo de material.

$$\text{Si :} \begin{cases} m = 2.5 & (e^-) \\ m = 2.7 & (h^+) \end{cases}$$

$$\text{Ge :} \begin{cases} m = 1.66 & (e^-) \\ m = 2.33 & (h^+) \end{cases}$$

☞ μ^\pm determinan la corriente en el semiconductor $\rightarrow J = \rho \cdot v$

- J : densidad de corriente
- $\rho = e \cdot n_i$: densidad de carga
- v : velocidad

$$J = e \cdot n_i (\mu_e + \mu_h) E$$

☞ En semiconductores: Ambos portadores contribuyen a la corriente.

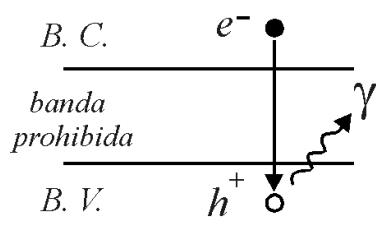
↗ Conductividad: $\sigma = e \cdot n_i (\mu_e + \mu_h)$, ya que $J = \sigma \cdot E$

↗ Resistividad = $1 / \sigma$

2.5. Recombinación.

CONCEPTO: Un electrón se puede recombinar con un hueco al pasar de la banda de conducción a la de valencia, emitiéndose un fotón.

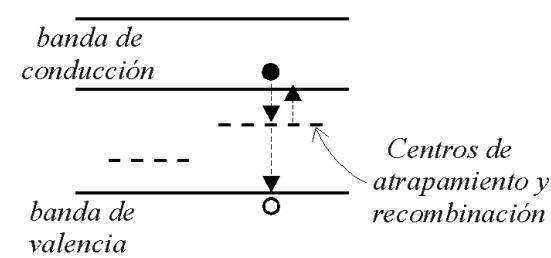
☞ Recombinación directa: proceso contrario al de generación del par (e^- , h^+)



✓ Si éste es el único proceso: $\tau^\pm \approx 1\text{ s}$

✓ Sin embargo, se observa experimentalmente que la vida media de los portadores es: $\tau^\pm \approx 10^2 - 10^3\text{ }\mu\text{s}$. Ya que hay presencia de impurezas y defectos en la red!!!!

☞ Generación de centros de recombinação (impurezas en la red cristalina)



✗ Presencia de impurezas con niveles energéticos en la banda prohibida del cristal puro. El electrón es atrapado en uno de estos niveles.

✗ Posteriormente, el electrón vuelve a la banda de conducción y al capturar un hueco ambos se aniquilan.

✗ La impureza queda en su estado original y puede atrapar un nuevo electrón.

La presencia de impurezas reduce el tiempo en el que los portadores de carga están libres. Lo cual da lugar a una pérdida de carga y por tanto de resolución. Concentración límite $\approx 10^{10}\text{ imp/cm}^3$.

☞ Centros de atrapamiento: Impurezas que capturan electrones o huecos y que los liberan después de un cierto tiempo característico. Este tiempo debe ser mucho menor que el de recolección de la carga.

2.5. Recombinación. (cont.)

■ Otra fuente de recombinación y atrapamiento son los **defectos estructurales de la red**.

- Defectos puntuales:** Vacantes en la red, átomos entre los puntos de la red.
- Dislocaciones:** Desplazamiento de una línea de átomos.

CAUSAS:

- Durante el crecimiento del cristal
- Deformaciones y tensiones
- Por choque térmico
- Bombardeo con radiación

☞ **No siempre la presencia de ciertos elementos en los cristales puros lleva a efectos negativos. En algunos casos pueden aumentar las características del material → “impurezas dopantes”**

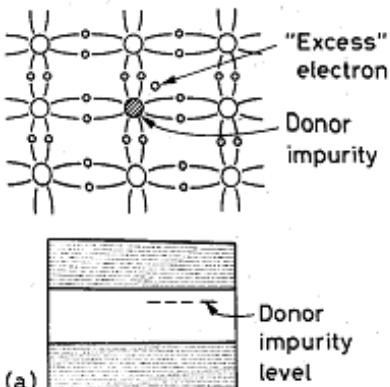
- ☞ Creación en la banda prohibida de niveles muy próximos a la banda de valencia o a la de conducción.



3. Semiconductores dopados.

- Son los denominados **semiconductores extrínsecos** → Átomos con exceso o defecto de un electrón de valencia en la capa más externa.
 - W Alteración en el balance de electrones y huecos. W Aumento de un tipo de portadores de carga.
 - El **silicio** y el **germanio** son **tetravalentes** (ni exceso de e^- ni de h^+).

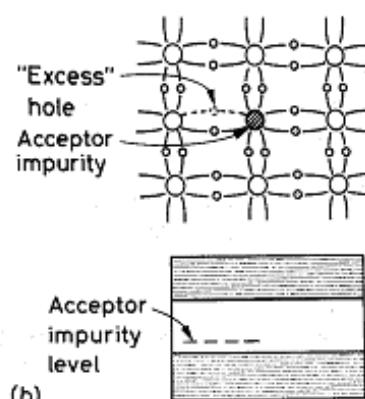
Dopante pentavalente → **semiconductor tipo-n**.



- A temperaturas normales el e^- extra es fácilmente **excitado a la banda de conducción** y aumenta la conductividad.
- Puede que se recombine con un h^+ → **Disminuye la concentración de huecos.**

electrones → portadores mayoritarios
huecos → portadores minoritarios

Dopante trivalente → **semiconductor tipo-p**.



- Defecto de electrones y exceso de huecos en la banda de valencia.
- Los e^- de la banda de valencia pasan fácilmente a los niveles creados en la banda prohibida (próxima a la de valencia) → **Se generan huecos.**

electrones → portadores minoritarios
huecos → portadores mayoritarios

$$np = n_i^2 = AT^3 \exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right)$$

W Elemento dadores: As, P, Sb → Tipo-n
W Elemento aceptores: Ga, B, In → Tipo-p } $\sim 10^{13} \text{ at/cm}^3$ ($\sim 1/10^9$)

W n: concentración de e^-

W p: concentración de h^+

W n_i : concentraciones intrínsecas

3. Semiconductores dopados. (cont.)

- Por ser el semiconductor neutro: $N_D + p = N_A + n$

En un semiconductor tipo-n $\rightarrow N_A = 0 ; n \gg p$

☒ N_D : concentración de dadores

☒ N_A : concentración de aceptores

$$n \approx N_D \quad p \approx n_i^2 / N_D$$

↓
Impurezas

Por tanto, La conductividad: $\sigma = 1/\rho \approx eN_D \mu_e$ (en general: $\sigma = e(n\mu_e + p\mu_h)$)

- En un semiconductor de tipo-n los portadores mayoritarios son los electrones, mientras que en el de tipo p son los huecos, cumpliéndose en cada momento la ley de acción de masas:

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

Por tanto, al dopar un semiconductor aumenta el número de portadores mayoritarios (electrones en tipo n, huecos en tipo p) y disminuye el número de portadores minoritarios.

- Consideremos la distribución de Fermi-Dirac: $f_D(E)$ que proporciona la probabilidad de que un estado de energía E esté ocupado por un electrón:

$$f_D(E) = \{ 1 + \exp [(E - E_F)/kT] \}^{-1}$$

☒ E_F : nivel de Fermi (energía para la cual la probabilidad de ocupación es del 50%).

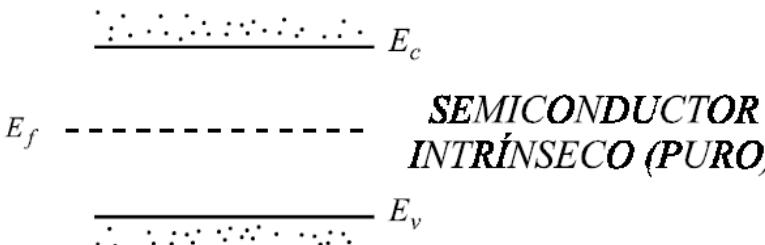
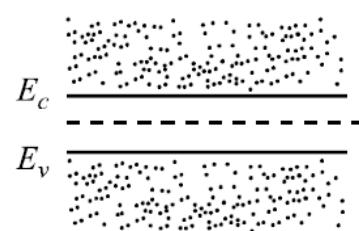
Nota:

Cuando $E = E_F \rightarrow \exp [(E - E_F)/kT] = 1$ y $f_D(E_F) = 1/2 \rightarrow$ la probabilidad es el 50%

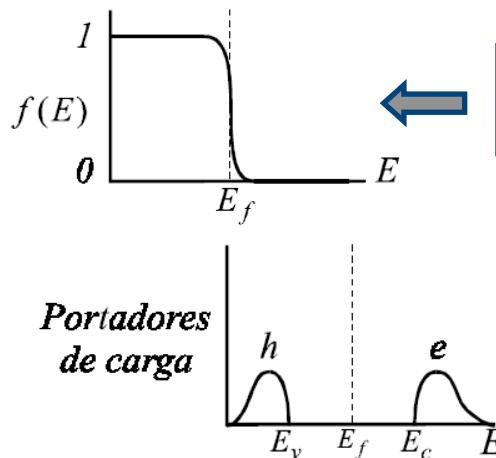
✓ $k = 8.61735 \times 10^{-5} \text{ eV} \cdot K^{-1}$, para $T = 300^\circ K$, $kT = 0.025852 \text{ eV}$



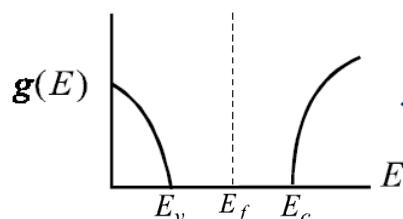
3. Semiconductores dopados. (cont.)



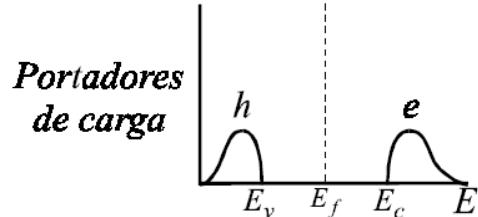
Distribución de los portadores de carga en un semiconductor intrínseco. Las concentraciones dependen de la separación entre las bandas.



Distribución de Fermi

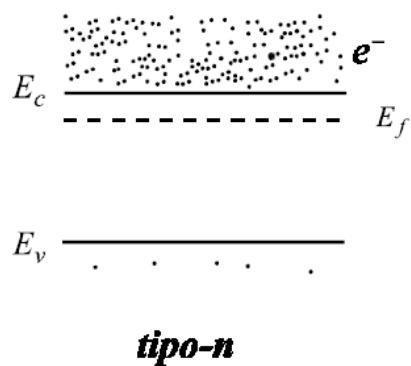


Densidad de estados $g(E)$ por debajo y por arriba de la banda prohibida

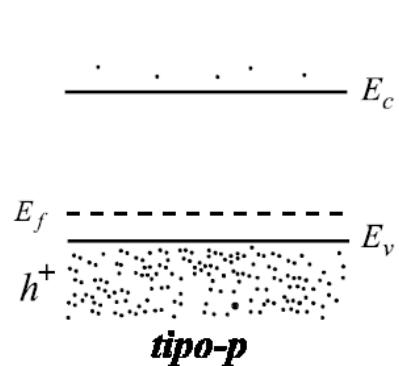


$f \cdot g \rightarrow$ concentración de e^- en la B.C.
 $(1-f) \cdot g \rightarrow$ concentración de h^+ en la B.V.

Concentraciones de portadores de carga



tipo-n



tipo-p

SEMICONDUCTOR EXTRÍNSECO (DOPADO)

Distribución de los portadores de carga en un semiconductor de tipo-n y tipo-p, respectivamente.

3.1. Desplazamiento del nivel de Fermi con el dopado.

- En un material de tipo-n la concentración de portadores viene dominada por:

☞ **N_c** : Densidad efectiva de estados al comienzo de la banda de conducción.

☞ **$E_c - E_f$** : Separación energética entre el nivel de Fermi y dichos estados.

↗ Aproximadamente: $n = f \cdot g \approx N_c \cdot \exp [-(E_c - E_f)/kT]$

☞ Definiendo de modo semejante los huecos: $p = (1 - f) \cdot g \approx N_v \cdot \exp [-(E_f - E_v)/kT]$

- Para un material intrínseco: $n_o = p_o = n_i$

$$E_f = \frac{E_c + E_v}{2} = E_i \quad \rightarrow \quad \text{Valor medio entre la banda de valencia y la de conducción.}$$

- En el caso general, por la ley de acción de masas: $n_i^2 = N_c N_v \exp [-E_g/kT]$ con $E_g = E_c - E_v$

↗ Por tanto: $n = n_i \exp [(E_f - E_i)/kT] \quad p = n_i \exp [(E_i - E_f)/kT]$ (E_f el del material dopado)

- G La desviación de un semiconductor dopado al material intrínseco se representa por la separación entre sus niveles de Fermi.
- G El término más importante en la concentración de portadores intrínsecos es la temperatura.
- G La resistividad ρ de un material depende de las concentraciones de electrones y huecos, y de sus movilidades.

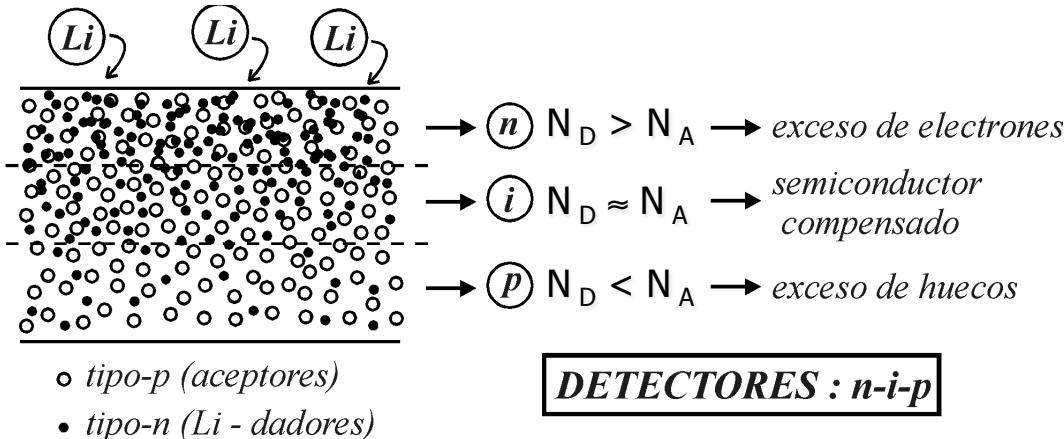
$$\rho = \frac{1}{e(\mu_n \cdot n + \mu_p \cdot p)}$$



3.2. semiconductores compensados. Detectores n-i-p.

¿Qué ocurre si se añaden impurezas **n** y **p** a un semiconductor? → Efecto de cancelación.

- ☞ Los electrones extra de los átomos dadores serán capturados por los huecos de las impurezas aceptoras.



En función de las concentraciones:

$N_D > N_A \rightarrow$ semiconductor **tipo-n**

$N_D < N_A \rightarrow$ semiconductor **tipo-p**

$N_D = N_A \rightarrow$ semiconductor **tipo-i**

≈ propiedades de los intrínsecos

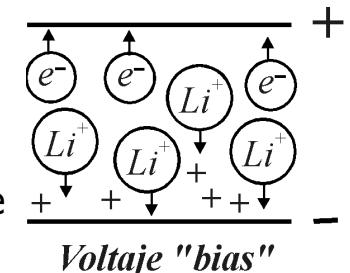
- ✚ **Método (como creo detector n-i-p):** Difundir **Li** (dador) sobre la superficie de un material **tipo-p** (ej.: Silicio).

- ☞ La superficie se convertirá en un material **tipo-n**.
- ☞ La concentración de **Li** decrece de forma gaussiana con la profundidad.
- ☞ Mediante un voltaje inverso "**bias**", los átomos de **Li** van penetrando en la **zona-p** (decrece su concentración en la **zona-n**). Los campos eléctricos locales impiden que $N_D > N_A$.

☒ Inversión del campo local: $Li^+ \uparrow$

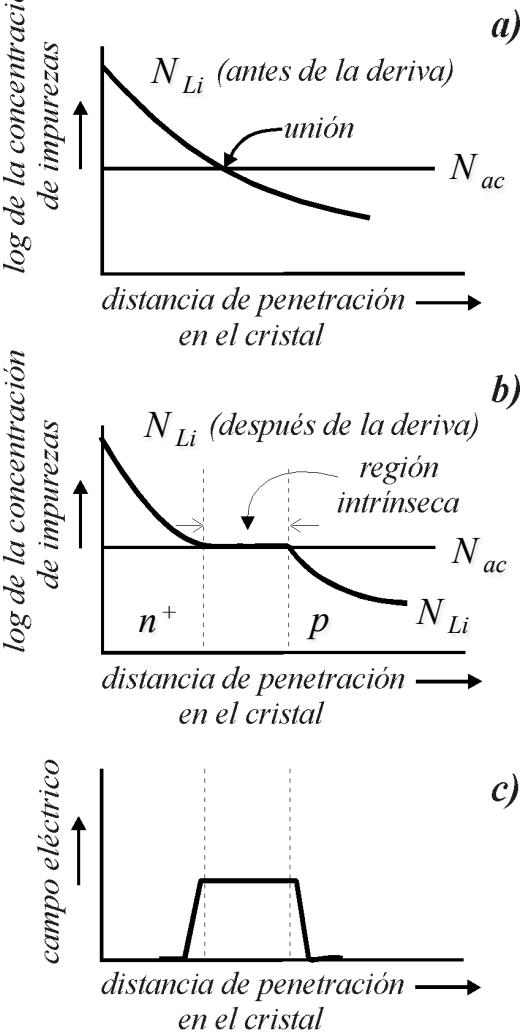
- ☞ Se alcanza un equilibrio $N_D = N_A \rightarrow$ "Región compensada"

- ☞ Se necesita refrigerar el material para mantener la compensación (sobre todo en Ge).



3.2. semiconductores compensados. Detectores n-i-p. (cont.)

- Veamos como son la concentración de impurezas y el campo eléctrico en función de la distancia de penetración en el cristal:



- When lithium ions (Li^+) diffuse into silicon, the acceptor impurity profile (a) is formed.
- When applying an inversion bias voltage and increasing temperature, during a short time interval, the profile changes according to figure (b).
- Se produce la **región intrínseca** entre las zonas de tipo **n^+** y **p** .
- When returning to ambient temperature and operating with inverted potential, the residual carriers of the intrinsic region are dragged towards its borders → appears the field of figure (c).
- La **zona de detección** es ahora la **región intrínseca** más las zonas de desertización adyacentes en los materiales de tipo **n^+** y **p** .

- G Los detectores de Si(Li) están particularmente indicados para el estudio de partículas pesadas muy energéticas (protón, α) y para electrones.
- G Para la detección de radiación γ se prefieren los detectores **n-i-p** de Ge. Dado que el número atómico del silicio es pequeño (14 para Si, 32 para Ge) y por tanto la eficiencia también es menor.



4. La unión p-n: formación de la región de desertización.

¿Qué ocurre cuando se ponen en contacto dos materiales?

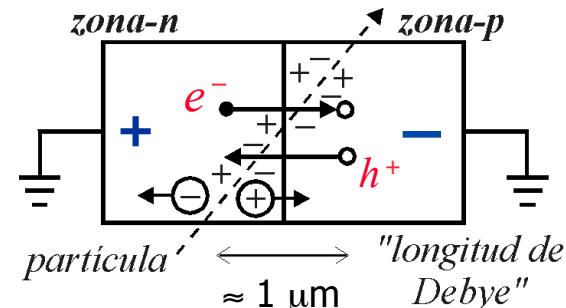
- ☞ Ej.:  metal / semiconductor
-  semiconductor **n** / semiconductor **p**
-  difusión de **impurezas p** sobre una de las caras de un material **tipo n**

- ☞ Aparece un flujo de cargas por difusión o deriva que genera una región de carga espacial y un campo eléctrico que se opone a una migración mayor de cargas.
 - ☞ Difusión de e^- de **n** a **p** → zona **n con carga +**
 - ☞ Difusión de h^+ de **p** a **n** → zona **p con carga -**

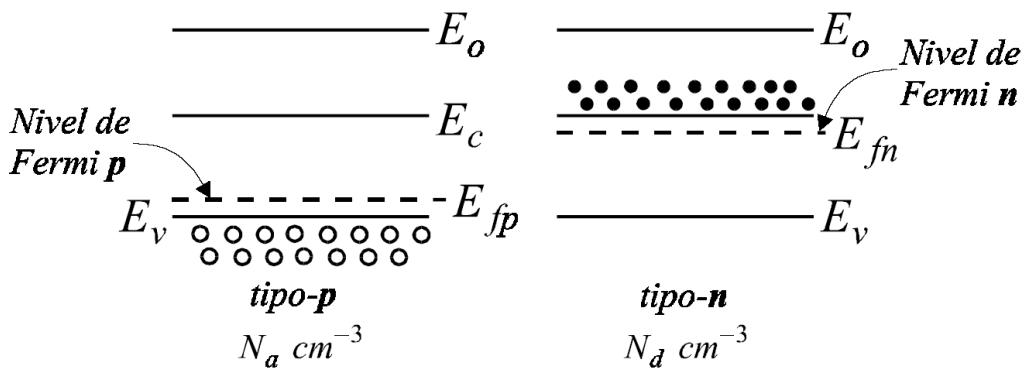
- ☞ La región con carga se denomina: "Región de desertización o agotamiento"
- ☞ No existen portadores libres por la existencia del campo eléctrico.
 - ☞ Región sin portadores de carga.
 - ☞ Aparece un gradiente de E en la zona de la **unión p-n**.

- ☞ Si una partícula ionizante atraviesa la región de desertización produciendo pares $e^- h^+$, éstos serán separados por la acción del campo y se generará una señal eléctrica detectable.
- ☞ Alcanzado el equilibrio, las líneas potenciales quedan deformadas y el nivel de Fermi es el mismo en ambas partes.

Se genera una diferencia de potencial a través de la unión → "**POTENCIAL DE CONTACTO**"

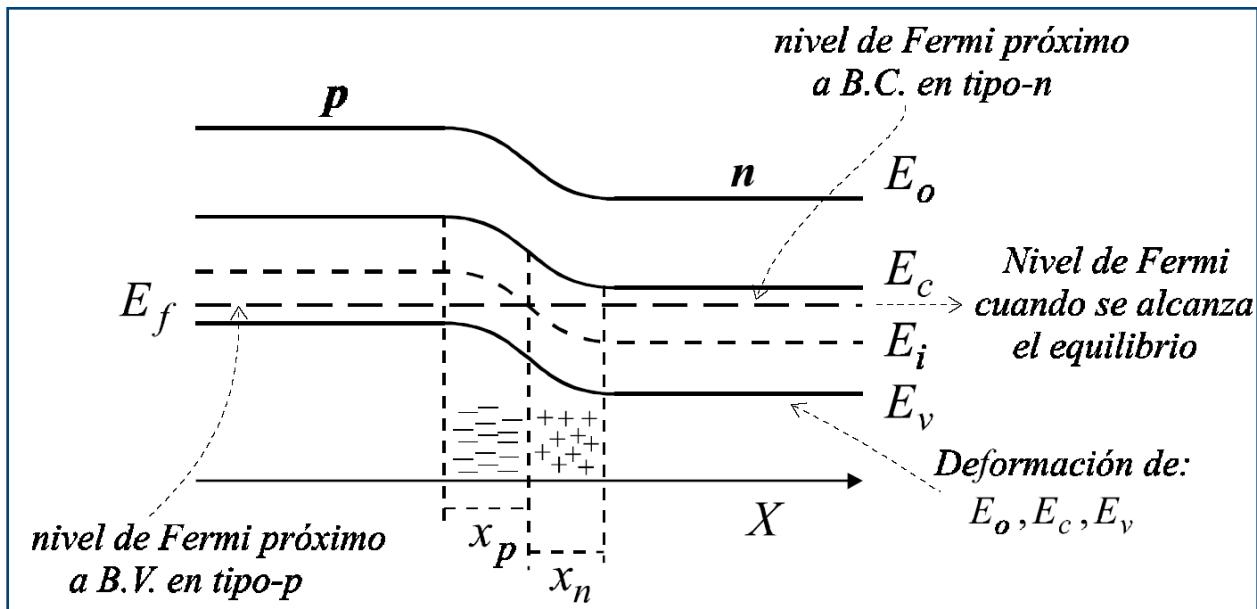


4. La unión p-n: formación de la región de desertización. (cont.)



Niveles de energía en silicio **tipo p** y **tipo n** cuando se encuentran aislados eléctricamente.

Al poner en contacto ambos semiconductores el nivel de Fermi es constante a través de todo el material. Las bandas se curvan de acuerdo con la región de carga generada.



4.1. Potencial de contacto

Gradiente de E en la unión p-n

Exceso de huecos

☞ Si $V_0 = \phi_i$ es el potencial de contacto y $N_a >> N_d$:

$$d = x_n + x_p = \left[\frac{2\epsilon V_o}{e} \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) \right]^{1/2} \rightarrow d \approx \left(\frac{2\epsilon V_o}{e N_d} \right)^{1/2} \approx x_n$$

☞ La región de desertización está en la zona-n.

☞ En un semiconductor tipo-n: $1/\rho_n = \sigma \approx e N_d \mu_e$, con lo cual $\rightarrow d \approx (2\epsilon V_o \rho_n \mu_e)^{1/2}$

☞ Análogamente si: $N_d >> N_a \rightarrow$ La región de desertización está en la zona-p y $d \approx x_p \approx (2\epsilon V_o \rho_p \mu_h)^{1/2}$

Si : $\begin{cases} \epsilon \approx 12 \cdot \epsilon_0 \\ \mu_e \approx 1350 \\ \mu_h \approx 480 \end{cases} \rightarrow d \approx \begin{cases} 0.53 (\rho_n V_o)^{1/2} \mu m \\ 0.32 (\rho_p V_o)^{1/2} \mu m \end{cases}$

Ge : $\begin{cases} \epsilon \approx 16 \cdot \epsilon_0 \\ \mu_e \approx 3900 \\ \mu_h \approx 1900 \end{cases} \rightarrow d \approx \begin{cases} 1.0 (\rho_n V_o)^{1/2} \mu m \\ 0.7 (\rho_p V_o)^{1/2} \mu m \end{cases}$

$V_o \rightarrow \text{Voltios} ; \rho \rightarrow \Omega \cdot \text{cm} ; \epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r ; \mu \rightarrow \text{cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$

Valores típicos de la zona de desertización
son del orden de la micra

4.2. Capacidad de la unión p-n.

- La unión p-n actúa como un condensador plano.

Capacidad:

Condensador dispositivo
que almacena carga

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

A : Área de la zona de desertización.

d : Profundidad

Si : $\frac{C}{A} \approx \begin{cases} 2 \times 10^4 (\rho_n V_o)^{-1/2} \text{ pF/cm}^2 & \text{tipo n} \\ 3 \times 10^4 (\rho_p V_o)^{-1/2} \text{ pF/cm}^2 & \text{tipo p} \end{cases}$

Ge : $\frac{C}{A} \approx \begin{cases} 1.4 \times 10^4 (\rho_n V_o)^{-1/2} \text{ pF/cm}^2 & \text{tipo n} \\ 2 \times 10^4 (\rho_p V_o)^{-1/2} \text{ pF/cm}^2 & \text{tipo p} \end{cases}$



4.3. Uniones con alimentación inversa.

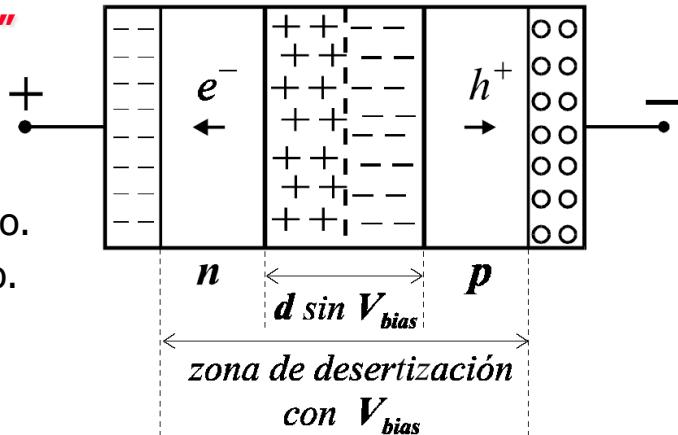
- La anchura de la zona de desertización, que se genera al poner en contacto p-n, no es suficiente para obtener una buena eficiencia de recolección de carga cuando pasa una partícula.

Solución: Ensanchar la zona de desertización y por tanto el volumen sensible para detectar la radiación.

- Aplicar una **alimentación inversa** a la unión p-n → "V - bias"

- Voltaje – en zona p
- Voltaje + en zona n

- Los h^+ de la zona p se irán hacia el polo negativo.
- Los e^- de la zona n se irán hacia el polo positivo.



Efecto neto: Ensanchamiento de la región de desertización.

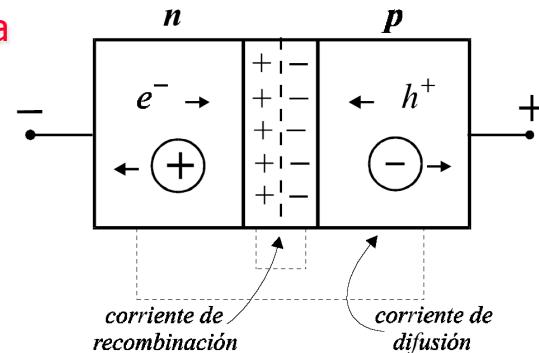
- El V externo ayuda a la recolección de la carga.
- Existe una limitación en el voltaje aplicable determinada por la resistencia del semiconductor. Si se sobrepasa el valor límite la unión se rompe y se convierte en conductor.
- Los pares generados por el paso de la radiación son transportados eficientemente.
- No existe aportación de los portadores mayoritarios capaces de vencer la barrera de potencial incrementada por V_{bias} .
- El flujo de corriente se debe íntegramente a la generación de pares $e^- h^+$.

"CORRIENTE DE GENERACIÓN"

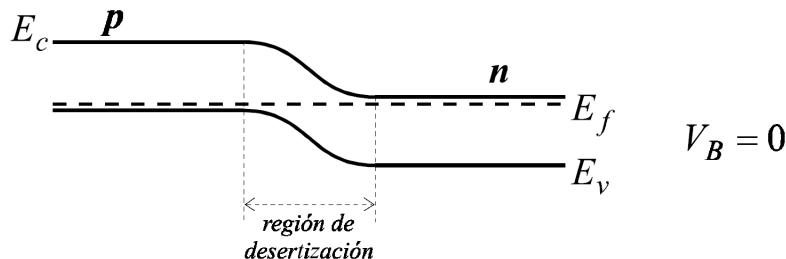
4.3. Uniones con alimentación inversa. (cont.)

- Si se aplicara un voltaje directo $V_B < 0 \rightarrow$ la región de desertización se haría más estrecha.

- La barrera de potencial no es suficiente para impedir que los portadores mayoritarios la atraviesen.
- En una unión p-n alimentada directamente, el flujo de corriente se debe íntegramente a la recombinación.

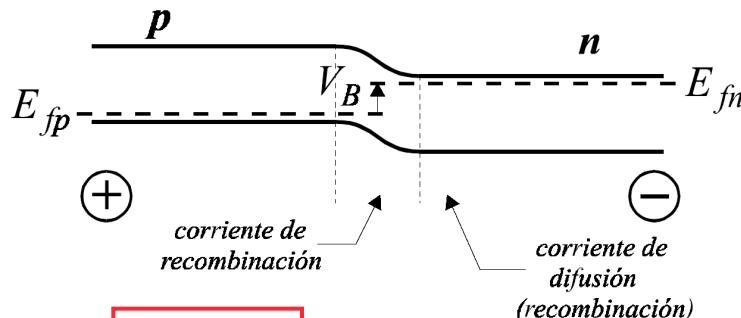


- Efecto de aplicar un voltaje al semiconductor en la región de la unión:



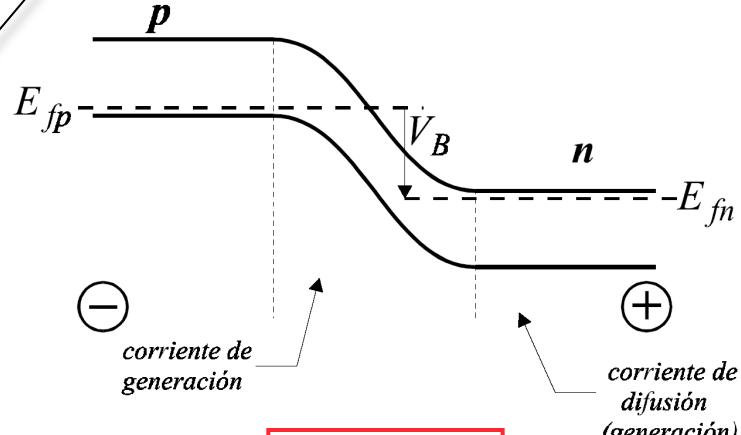
$$E_{fn} = E_{fp}$$

Si $V_B \neq 0$ el nivel de Fermi ya no es el mismo en los dos semiconductores.



$$V_B = 0.6 V$$

$$E_{fn} \neq E_{fp}$$



$$V_B = -1.2 V$$

5. Características de los semiconductores como detectores.

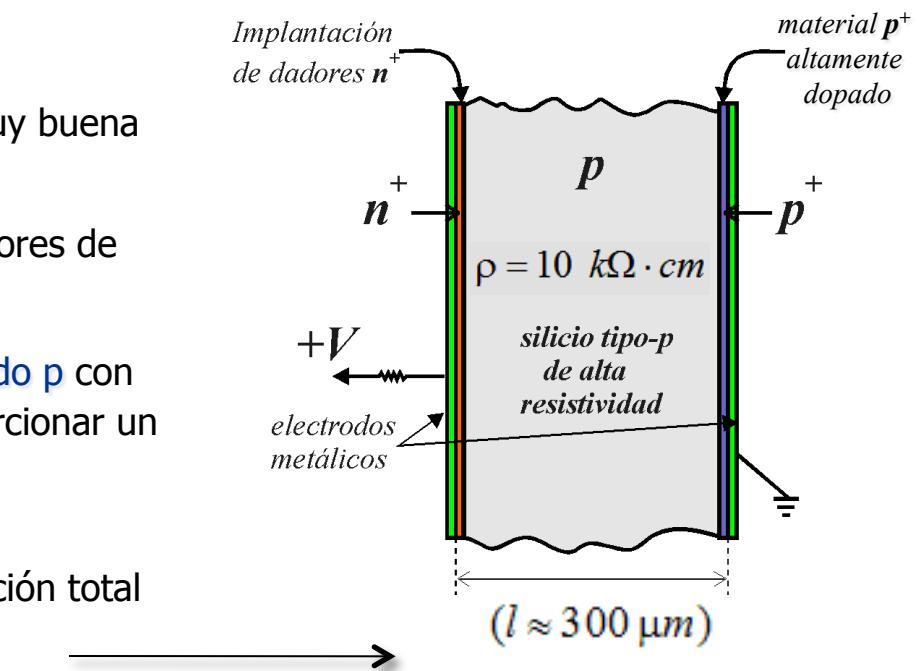
- Disponemos ya de suficiente información para calcular las características de un detector típico de partículas.

Construcción de un diodo

Partamos de un **detector de silicio de tipo p** de muy buena calidad.

- Parte frontal:** Implantación de átomos dadores de electrones.
- Parte trasera:** Implantación de **silicio dopado p** con alta concentración (**p⁺**) , con el fin de proporcionar un electrodo a tierra de baja resistividad.

Aplicando **+V** a la cara n se consigue la desertización total del detector.



Será posible recoger toda la carga generada por el paso de una partícula cargada.

Si la desertización no es total se perderá señal por recombinación.



5.1. Potencial para la desertización total

En el ejemplo anterior el potencial necesario para alcanzar la desertización total del detector es ≈ 105 V.

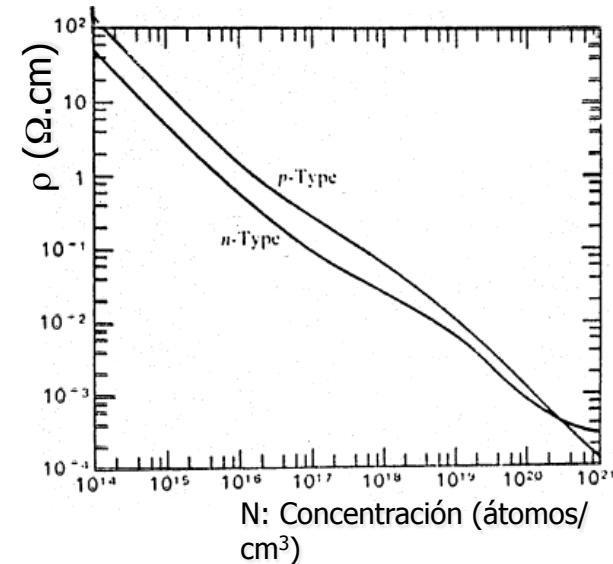
Teniendo en cuenta que $N_d \gg N_a$; $x_n \approx 0$; $d \approx x_p$; $V \gg V_o$

Queremos llegar a $l = x_p$, es decir **desertizar la zona p**.

$$x_n + x_p \approx x_p = \left[\frac{2\epsilon}{e} (V + V_o) \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) \right]^{1/2} \approx \left[\frac{2\epsilon}{e} \cdot \frac{V}{N_a} \right]^{1/2}$$

De la figura

$$\rho = f(N_a) \Rightarrow N_a \approx 10^{14} \cdot \frac{150}{\rho}$$



$$V = \frac{e}{2\epsilon} \cdot \frac{10^{14} \cdot 150}{\rho} \cdot l^2 \Rightarrow V = \frac{11.6 \cdot l^2}{\rho} \quad \begin{cases} l \approx 300 \mu\text{m} \\ \rho = 10^4 \Omega \cdot \text{cm} \end{cases} \Rightarrow V \approx 105 \text{ Volts}$$

5.2. Energía promedio para la creación de un par electrón - hueco.

- Para la generación de un par electrón - hueco en un semiconductor, se requiere mucha menos energía que para crear un par ($e^- I^+$) en un gas o para emitir un fotón en un centelleador.

☞ Por tanto, mayor estadística y mejor resolución.

- ☒ Factor **10** respecto a gases.
- ☒ Factor **10^2** para centelleadores.

☞ Independientemente del tipo y energía de la radiación, la energía necesaria para generar un par electrón - hueco es:

	<i>Si</i>	<i>Ge</i>
300 °K	3.62 eV	---
77 °K	3.81 eV	2.96 eV



5.3. Linealidad.

- Si la **región de desertización es suficientemente ancha** para que las partículas pierdan toda su energía y se paren en ella, la respuesta del semiconductor debe ser lineal con la energía.

$$\left. \begin{array}{l} \omega: \text{energía promedio } e^- h^+ \\ E: \text{energía de la radiación} \end{array} \right\} n^o \text{ de pares} = \frac{E}{\omega}$$

- La carga recogida en los electrodos dependerá del número de pares generados y de la eficiencia de recolección.

$$Q = \frac{n \cdot E}{\omega}; \quad n : \text{eficiencia de recolección}$$

- El voltaje observado: $V = \frac{Q}{C} = \frac{n \cdot E}{\omega \cdot C}$ → La altura del pulso es lineal con E, e independiente del tipo de radiación

☞ Si la **desertización no es suficiente** mediremos **ΔE** , la cual no es lineal con E.

- La respuesta será lineal en tanto que el alcance de las partículas sea menor que la anchura de desertización.



5.4. Corriente de fugas.

El diodo con V_{bias} no es totalmente **no-conductor**.

Siempre hay una corriente que circula a través de la unión p-n: "**Corriente de fugas**", pequeña y sujeta a fluctuaciones.

Se manifiesta como **ruido** en la respuesta del detector y modifica su resolución → La mínima señal detectable deberá superar la señal del ruido.

CAUSAS:

Movimiento de portadores minoritarios.

- huecos de n a p
 - electrones de p a n
- $\sim nA/cm^2$

Generación térmica de pares por centros de recombinación y atrapamiento → $\sim \mu A/cm^2$

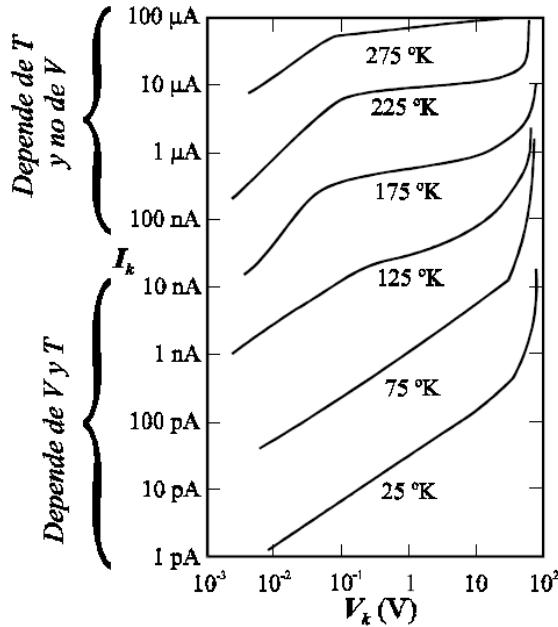
Depende de la concentración de estos centros y del volumen de la zona.

Fuga de corriente en la superficie (elementos químicos, contaminantes, ambiente,...)



5.4. Corriente de fugas. (cont.)

En la figura se ven las **curvas de corriente/voltaje** para una unión en silicio, en función de la temperatura.



A altas temperaturas, la corriente de fugas está dominada por la generación térmica de pares.

Este efecto tiene lugar en aproximadamente una longitud de difusión desde el extremo de la región de desertización → **Corriente de difusión.**

La longitud de difusión de los portadores minoritarios:

$$D = \frac{kT}{e} \mu \quad \rightarrow \text{Relación de Einstein}$$

$$L_D = \sqrt{D\tau}$$

μ → movilidad

τ → vida media de los portadores minoritarios ($\sim 100 \text{ ns} \rightarrow 1 \text{ ms}$)

A temperatura ambiente: $\begin{cases} D_n = 34.6 \text{ cm}^2/\text{s} \rightarrow \text{para e}^- \\ D_p = 12.3 \text{ cm}^2/\text{s} \rightarrow \text{para h}^+ \end{cases}$

La corriente de difusión es prácticamente independiente de **V_{bias}** y depende fuertemente de **T**.

A **T ≤ 100 °K** la **corriente de difusión** es prácticamente despreciable y domina la **corriente de generación**.

La corriente de fugas depende de **V**, ya que depende de la anchura de desertización, que va como **V^{1/2}**.

INFLUYE: el tiempo de exposición a la radiación (*radiation damage*), la pureza del cristal y el tamaño.

5.5. Factor de Fano y resolución intrínseca.

La resolución energética intrínseca depende de:

- ☞ Estadística de Poisson en producción de pares: número de portadores de carga.
- ☞ Factor de Fano.

☞ Para silicio y germanio → $F \approx 0.12$, lo que contribuye a la buena resolución de estos detectores.

$$R = 2.35 \sqrt{\frac{F}{J}} = 2.35 \sqrt{\frac{F \cdot \omega}{E}}$$

☞ Hay factores, como por ejemplo la electrónica que degradan y reducen la resolución.

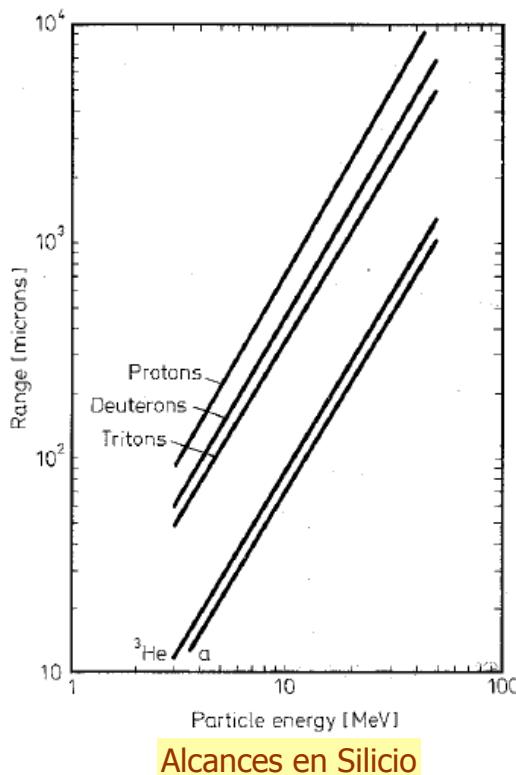
Ejemplo:

Partículas α de 5 MeV → Resolución nominal: 0.07 % = **3.5 KeV**
 → Resolución real ~ 18 KeV



5.6. Sensibilidad y eficiencia intrínseca.

- Para partículas cargadas la eficiencia intrínseca de detección es prácticamente del **100 %**.
- ↗ El límite en la sensibilidad se debe a las corrientes de fugas y al ruido electrónico que establecen un límite inferior para la altura de pulso que se puede detectar.



- ☞ La anchura de desertización se debe elegir de modo que las partículas depositen suficiente energía para que la señal supere al ruido.
 - ☑ Esta anchura debe ser mayor que el alcance de las partículas.
- ☞ Para la detección de radiación γ es preferible el **Germanio**, por poseer mayor número atómico. El problema es que requiere un sistema de criogenia, ya que E_{gap} es pequeña y a temperatura ambiente aparecen corrientes de fuga.
- ☞ Para detectar **Rayos-X de $E \leq 30 \text{ KeV}$** es preferible el **silicio**. El límite de la capa K en Ge está en **11 KeV**, mientras que en silicio es **~1.8 KeV**.



6. Estructuras de diodo para la construcción de detectores de Silicio.

- En el proceso de fabricación se pueden obtener tanto detectores **tipo p**, como detectores **tipo n**. Los más usados son los de **tipo n**.
- El silicio debe poseer **alta pureza y resistividad** (varios $\text{K}\Omega\cdot\text{cm}$).
 - ☞ Ambas condiciones van unidas.
- De acuerdo con la técnica de fabricación, los detectores de silicio se clasifican en tres tipos:
 - ☒ Detectores de difusión.
 - ☒ Detectores de barrera superficial.
 - ☒ Detectores por implantación de iones



6.1. Diodos de unión obtenida por difusión.

En la fabricación se llevan a cabo dos tipos de difusiones:

- Para formar el diodo.
- Para conseguir el electrodo de base.

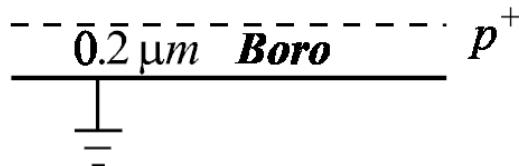
Partiendo de una lámina de **silicio de tipo-p**, moderadamente contaminada, **se difunde fósforo** en una de sus caras. De este modo se constituye la **capa n+** y por consiguiente la **unión p-n**.

El proceso tiene lugar a **T=1100º C**, lo cual representa una desventaja, se reduce la vida media de los portadores y aumenta el ruido (elevadas corrientes de fuga)

En la otra cara **se difunde boro**, consiguiéndose de este modo una **alta contaminación de tipo p+** y por tanto un **buen contacto para el electrodo de la base** del detector.



Silicio tipo-p



- Las partículas entran por la **capa n**, la cual debe ser lo más delgada posible para que la pérdida de energía en ella sea despreciable.
- Las partículas **deben tener energía suficiente para atravesar la capa n+**.
- No son muy usados, pero son resistentes.



6.2. Detectores de barrera superficial.

- Son los más usados para la detección de partículas cargadas.

☞ Se trata de una unión **semiconductor - metal**:

Ejemplos:

 **Silicio n – Au**

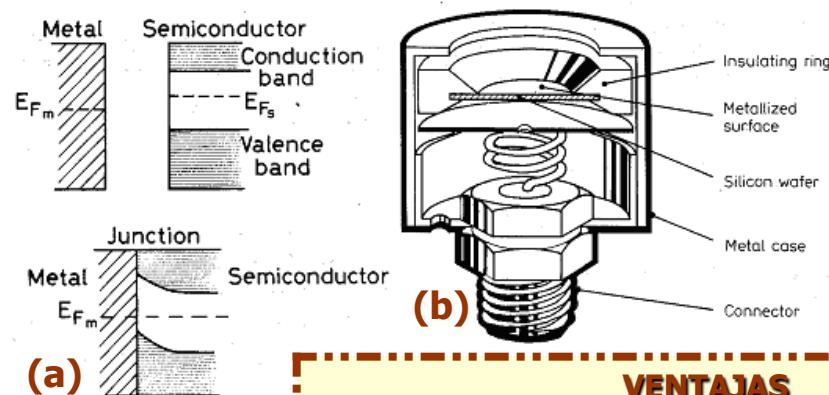
 **Silicio p - Al**

☞ Debido a la diferencia en los niveles de Fermi aparece un **potencial de contacto** → Baja el nivel de Fermi en el semiconductor.

☞ El efecto es similar al de la unión **p-n** y se genera la desertización:

Barreras de SCHOTTKY → ~ 5 mm

FABRICACIÓN: A temperatura ambiente.



- ✓ Limpieza del óxido (SiO_2) mediante aguafuerte.
- ✓ Se deposita una fina capa de Au ($\approx 40 \mu\text{g/cm}^2$) por evaporación al vacío.

(a) Formación de la **barrera de Schottky**.

(b) Esquema de un **detector de barrera superficial**.

VENTAJAS

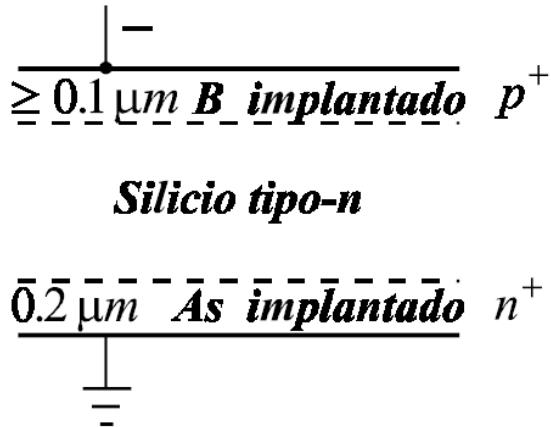
- H Se fabrican a T normales .
- H Diferentes espesores y regiones de desertización.
- H Sirven para medir dE/dx .
- H Mejor resolución que los de difusión.

DESVENTAJAS

- H Sensibles a la luz. (visible ~ 2 - 4 eV)
- H Sensibles a la contaminación superficial
- H Se contaminan con el aceite de la bomba de vacío.

6.3. Diodos obtenidos por implantación de iones.

- El diodo puede formarse mediante un **proceso de implantación de iones**. Esta técnica se utiliza para fabricar **detectores de μ -strips** (se vera más adelante)
 - Los iones son acelerados y repartidos uniformemente sobre la superficie de una lámina de silicio de **tipo-n**.



- Iones **B⁺** en una de las caras para conseguir un **material de tipo-p**.
- Iones de **As** en la otra para obtener un **electrodo de baja resistividad (n)**.
- Cuanto más baja es la energía de los iones más fina es la capa **n⁺** ó **p⁺** que se consigue.



7. Detectores de posición.

7.1. Motivaciones Físicas.

- El desarrollo de los detectores de semiconducción se debe en gran medida a los **experimentos de Altas Energías** en el ámbito de la Física de sabores pesados.

En **altas energías** los detectores de semiconducción se utilizan como detectores de posición.

- ☞ Trazado de las partículas
- ☞ Cuanto menor es la vida media más precisión se necesita en los detectores.

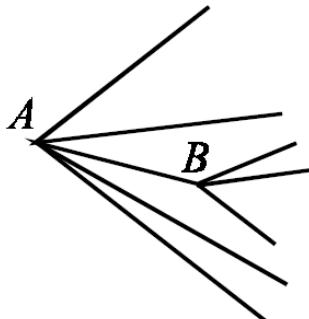
- Según el orden de magnitud de la vida media se utilizarán distintos tipos y tamaños de detectores para su detección e identificación, así como distintas técnicas.

☞ **Partículas estables:**

- Cámaras de hilos, cámaras de deriva
- Calorímetros, Cherenkovs, TOF

☞ **Partículas de vida corta:**

- Mediante la reconstrucción de su desintegración a partículas estables.
 - Reconstrucción de vértices (μvtx).
 - Estudio de parámetros de impacto.
 - Identificación de secundarios.



CLASIFICACIÓN DE LAS PARTÍCULAS POR SU VIDA MEDIA

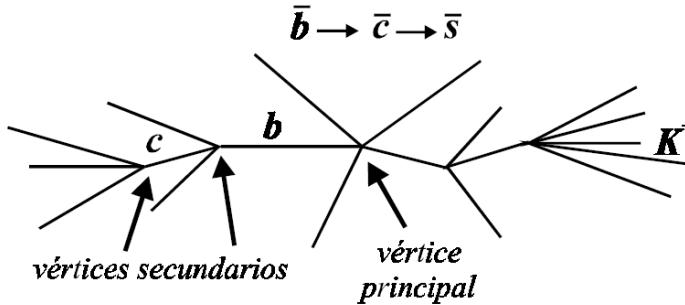
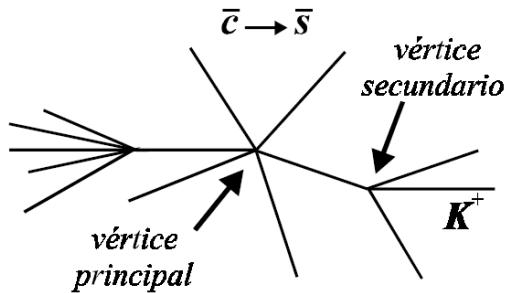
$$\text{ESTABLES: } \tau \geq 10^{-8} \text{ s} \Rightarrow c\tau \approx \lambda_{des} \geq 1 \text{ m}$$

$$\text{VIDA LARGA: } \tau \geq 10^{-10} \text{ s} \Rightarrow c\tau \approx cm$$

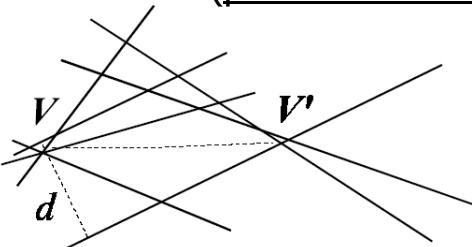
$$\text{VIDA CORTA: } \tau \approx 10^{-12} - 10^{-13} \text{ s} \Rightarrow \lambda \approx 100 \mu\text{m}$$

7.1. Motivaciones Físicas. (cont.)

- En la década de los 70 se descubren el lepton τ y partículas con **quarks c - b** en experimentos con energías cerca del umbral de producción.
 - Los detectores de μ -vértices enriquecen las señales de hadrones con quarks pesados y de leptones τ .



- Los sucesos pueden estudiarse en el hiperespacio de sus variables cinemáticas y de microvértice (parámetros de impacto).

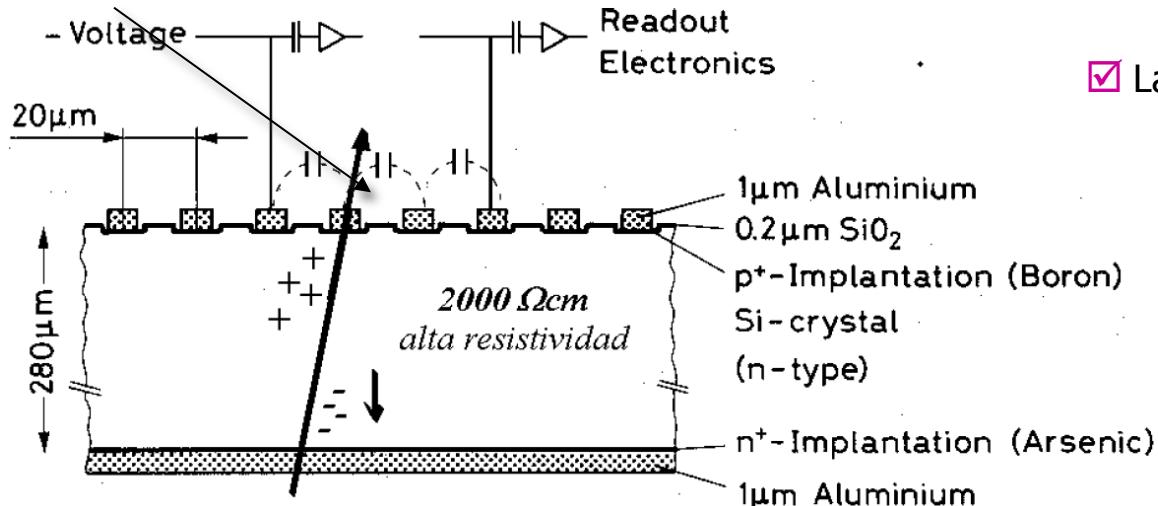


- Las trazas que no proceden del vértice principal tienen parámetros de impacto grandes → **Se necesita gran precisión en la zona próxima al vértice.**
- Muy importante también la identificación de partículas (K, extrañas) proporcionada por los contadores Cerenkov.

- Las partículas con **vidas medias muy cortas** ($10^{-16} - 10^{-23}$ s, $\tau_c \leq \text{nm}$) sólo son observables a través de sus productos de desintegración como "picos" en las **distribuciones de masas invariantes**, o a través del **incremento en la sección eficaz** en la vecindad de la energía de resonancia de la partícula (Ej.: $\pi^+ p \rightarrow \Delta^{++}$) → **Fórmula de Breit-Wigner**.

7.2. Detectores de micro-strips.

ESTRUCTURA: Tiras (strips) de lectura separada en intervalos de $20 \mu\text{m}$. En general la lectura se efectúa cada $60 \mu\text{m}$ y se utiliza el método de la división de carga capacitiva.

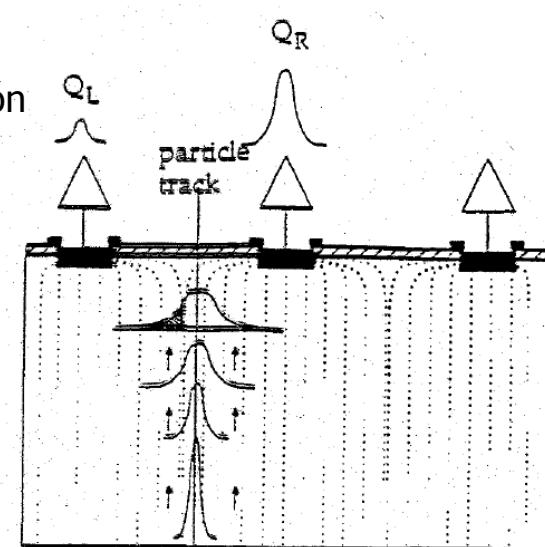


La respuesta es muy rápida:

$$\tau_{\text{recolección}} \approx 10 \text{ ns}$$

$$\sigma_x \approx 2 \mu\text{m}$$

- ☞ Para un detector de anchura $d \approx 300 \mu\text{m}$ se consigue la desertización total con $V \approx 160$ Volts.
- ☞ $dE/dx \approx 39 \text{ KeV}/100 \mu\text{m}$ para una m.i.p.
- ☞ Se generan $\approx 100 \text{ e}^-\text{h}^+/\mu\text{m}$ → 30.000 pares en el detector.
- ☞ La carga se divide entre strips vecinos a causa de la difusión de la nube de carga.
- ☞ Parte de la carga es recolectada por el strip de la izquierda: Q_L . El resto por el de la derecha: Q_R .
- ☞ En la figura se observan las líneas del campo eléctrico en el detector.



7.2.1. Detectores micro-strips de doble cara.

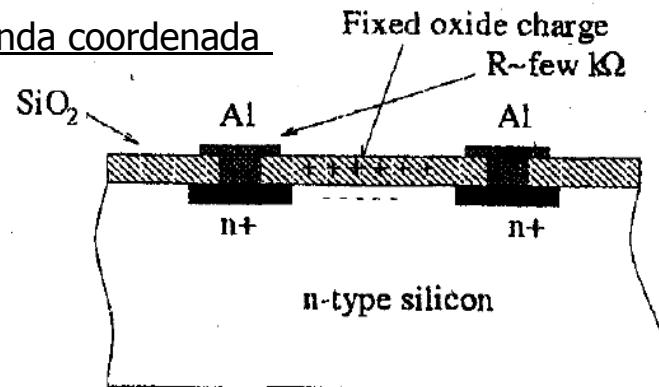
- Un detector de micro-strips sólo proporciona una coordenada con buena precisión.

☞ La segmentación de la cara posterior proporciona la segunda coordenada sin añadir material a la trayectoria de la partícula.

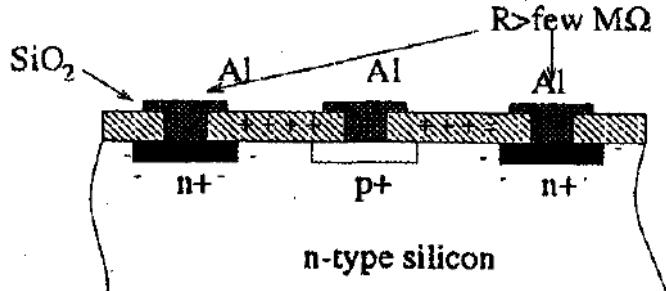
☞ La simple subdivisión de los contactos en ambas caras del detector induce una acumulación de cargas negativas en el sustrato n, debido a la presencia de cargas positivas en la interfase Si-SiO₂.

☞ La resistencia decae hasta varios kΩ y la carga de la señal se distribuye sobre muchos electrodos.
 ☞ La subdivisión no resulta efectiva.

☞ Una de las soluciones consiste en implantar strips de tipo p+ entre los n⁺, su función es bloquear e interrumpir el proceso de conducción.



No se puede mostrar la imagen. Puede que su equipo no tenga suficiente memoria para abrir la imagen o que ésta esté dañada. Reinicie el equipo y, a continuación, abra el archivo de nuevo. Si sigue apareciendo la x roja, puede que tenga que borrar la imagen e insertarla de nuevo.



Detector DS (Double Sided) de Hammamatsu (DELPHI) →

7.2.2. Detectores pixel.

- ✚ Mediante una matriz de pequeños diodos se puede obtener información bidimensional con un único detector → Se denomina en general **Silicon Pad Detector**.
 - ☞ La lectura individual de cada canal implicaría la instalación de un número reducido de elementos.
 - ☞ La solución es diseñar **la electrónica de lectura en forma de matriz**, donde cada canal de lectura ocupa exactamente la misma superficie que el elemento del detector → Constituye lo que se denomina **Silicon Pixel Detector**.

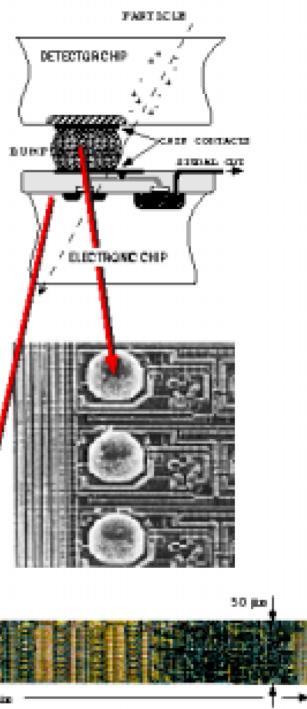
The Hybrid Pixel Detector

A hybrid pixel detector is made of 3 basic elements:

A matrix Si of diodes;

A chip with a matrix of electronic channels matching the detection elements;

A "bump bonding" connection between the two;

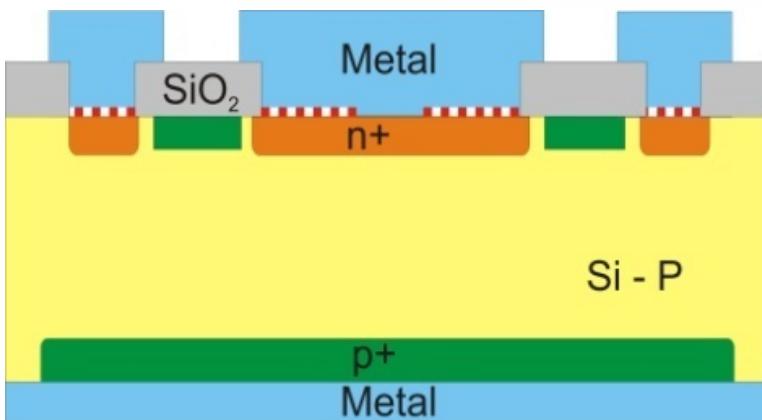
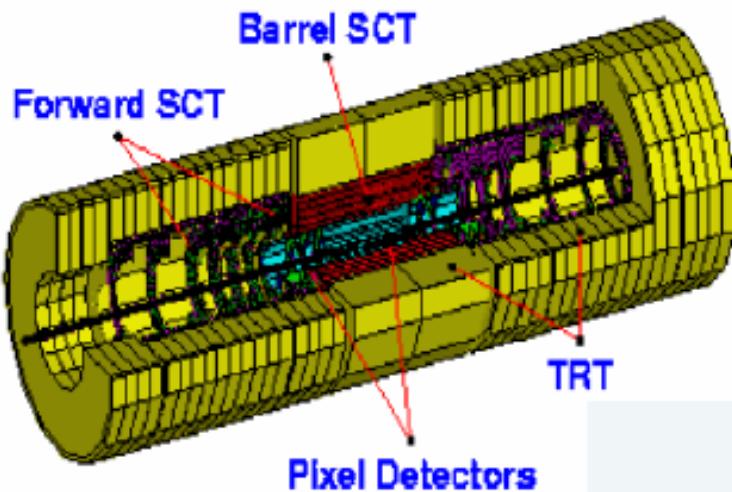


VENTAJAS:

- Lectura bidimensional.
- Alta precisión geométrica.
- Rapidez.
- Excelente relación señal/ruido.
- Baja corriente de fugas por elemento. Muy importante cuando los niveles de radiación son elevados.
- Ideales para su instalación en las capas internas de detectores en colisionadores hadrónicos.

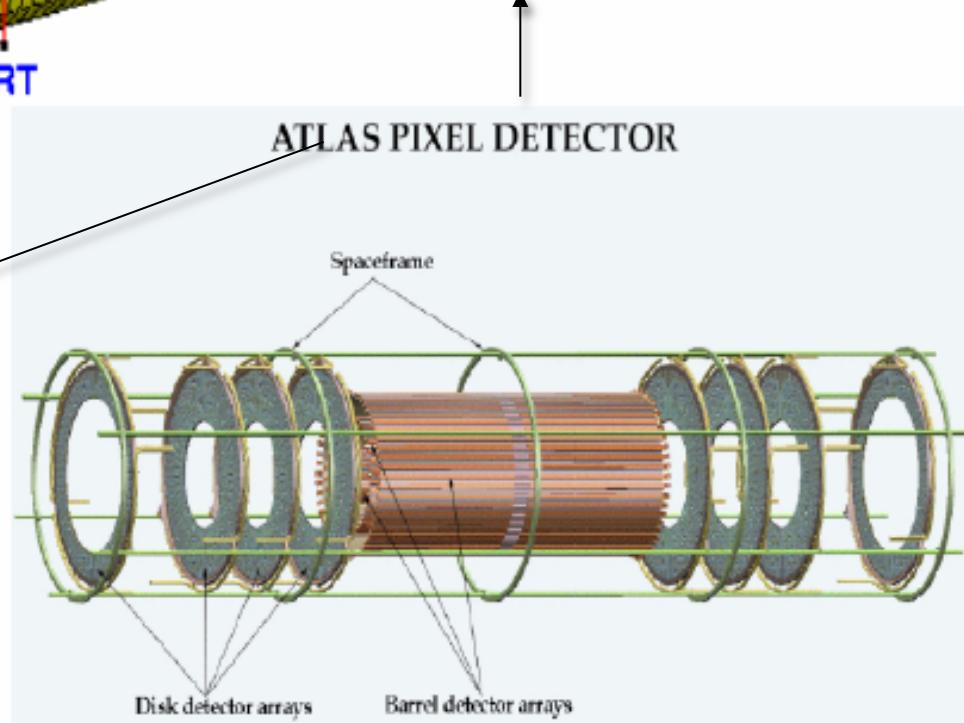
7.2.2. Detectores pixel. (cont.)

Inner Detector de ATLAS



❖ N⁺ - P

- Poseen alta velocidad de la señal (se leen los electrones)
- La zona desertizada crece desde el implante al resto del detector.
- Pueden funcionar parcialmente desertizados

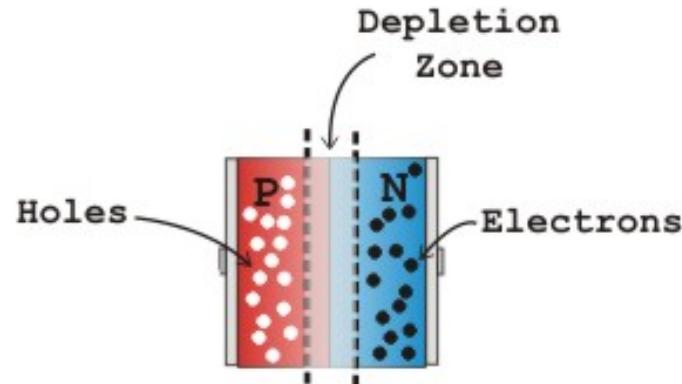


Resumen

- ❖ Pocas cargas libres en la región de cargas fijas

↓

zona de desertización



- ❖ Voltaje inverso → aumenta la zona de desertización y disminuye la corriente de difusión.

- ❖ Zona de desertización = grosor del detector

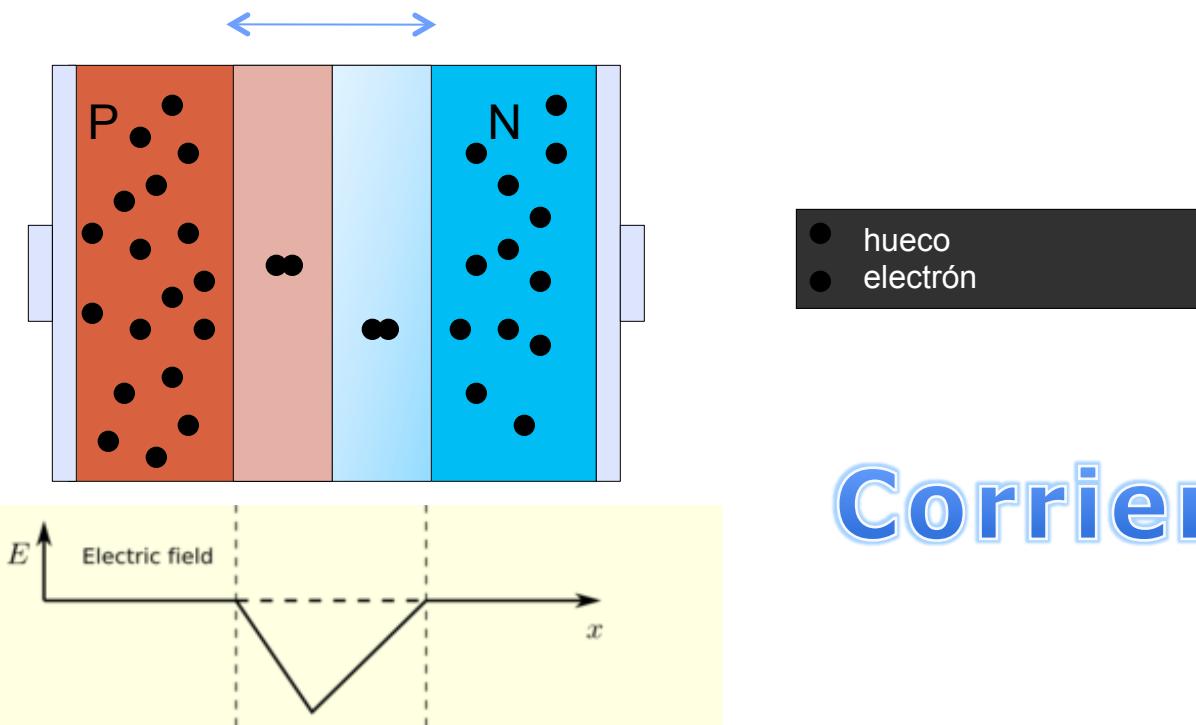
↓

voltaje de desertización completa (V_{FD})

Resumen

Principio de detección

Región de desertización



Corriente!

- Integrando en t hasta final del movimiento dentro de la región de desertización → carga depositada en el volumen sensible del silicio