

## TEMA 2. DIODO DE POTENCIA.

### 2.1. INTRODUCCIÓN.

2.1.1. Física de semiconductores.

2.1.2. Unión p-n.

### 2.2. ESTRUCTURA BÁSICA. CARACTERÍSTICA ESTÁTICA.

### 2.3. POLARIZACIÓN INVERSA.

2.3.1. Técnicas para elevar la tensión  $V_{RRM}$

2.3.1.1. Biselado

2.3.1.2. Anillos de guarda

2.3.2. Características de Catalogo

### 2.4. POLARIZACIÓN DIRECTA.

### 2.5. CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS.

### 2.6. PÉRDIDAS EN LOS DISPOSITIVOS.

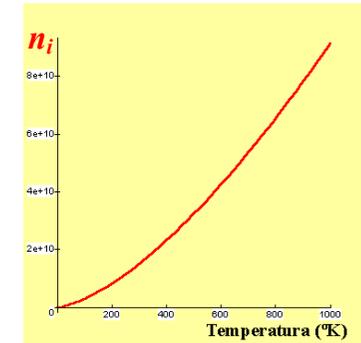
### 2.7. DIODO SCHOTTKY DE POTENCIA.

## INTRODUCCIÓN. Física de Semiconductores

Concentración Intrínseca:

$$n_i^2 = A_0 \cdot T^3 \cdot e^{-\frac{qE_{G0}}{kT}}$$

Para  $T=300^\circ\text{K}$ ,  $n_i=1.5 \cdot 10^{10}$  elect./ $\text{cm}^3$



Concentración de Portadores Minoritarios:

$$p_0 n_0 = n_i^2 ; p_0 + N_d = n_0 + N_a$$

En un cristal tipo p:

$$n_0 \approx \frac{n_i^2}{N_a} \text{ y } p_0 \approx N_a$$

	Minoritarios	Mayoritarios
Material n	$p_0 \approx \frac{n_i^2}{N_d}$	$n_0 \approx N_d$
Material p	$n_0 \approx \frac{n_i^2}{N_a}$	$p_0 \approx N_a$

Recombinación de Portadores Minoritarios:

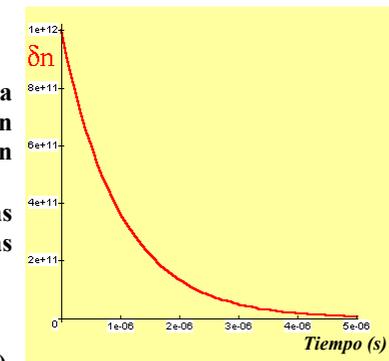
$$\frac{d(\delta n)}{dt} = -\frac{\delta n}{\tau}$$

El valor de  $\tau$  es muy importante para conocer la velocidad de conmutación de un dispositivo **bipolar** y sus pérdidas en conducción.

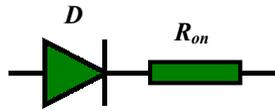
$\tau$  sube con la Temperatura y con las concentraciones de portadores muy altas ( $\delta n > n_b \approx 10^{17}$ , Recombinación de Auger).

Control de centros de recombinación:

- Impurezas de oro
- Radiación con electrones (varios MeV)



## INTRODUCCIÓN. Unión p-n



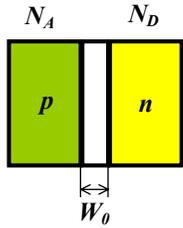
La anchura de la capa de deplexión es:

$$W_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon\Phi_c(N_A + N_D)}{qN_A N_D}}$$

Donde  $\Phi_c$  es el potencial de contacto de la unión p-n:

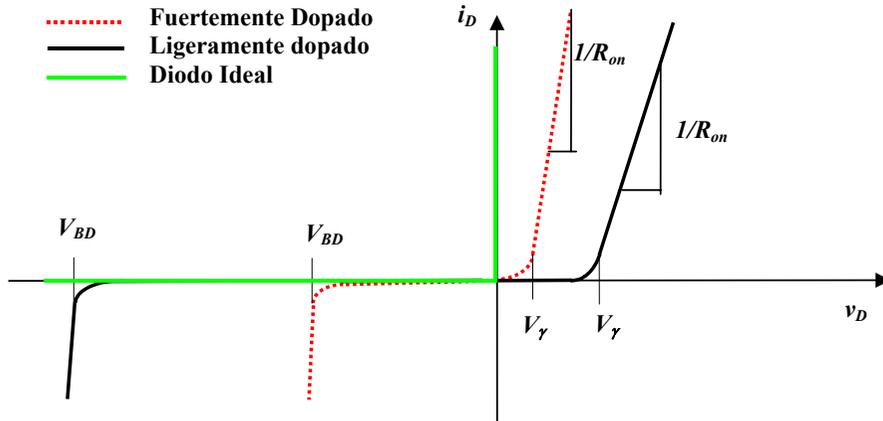
$$\Phi_c = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$

Gráficamente:



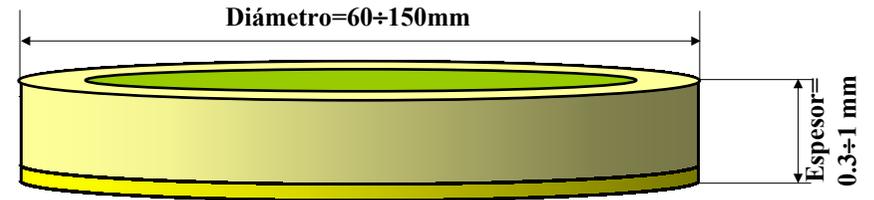
El campo eléctrico máximo que soporta el Silicio es teóricamente 300.000 V/cm, pero debido a impurezas e imperfecciones de la estructura cristalina, en la práctica es de 200.000 V/cm.

- ..... Fuertemente Dopado
- Ligeramente dopado
- Diodo Ideal

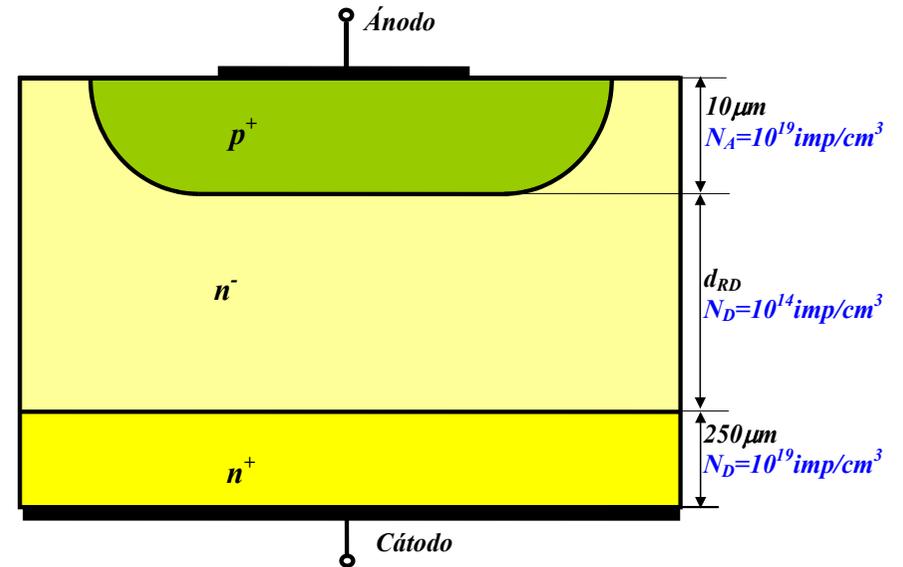


Efecto de la concentración de impurezas en la tensión inversa y en la caída en conducción

## ESTRUCTURA BÁSICA. CARACTERÍSTICA ESTÁTICA DEL DIODO DE TRES CAPAS



Tamaños aproximados de un diodo típico de alta tensión y alta corriente



$d_{RD}$ : Es función de la tensión inversa a soportar

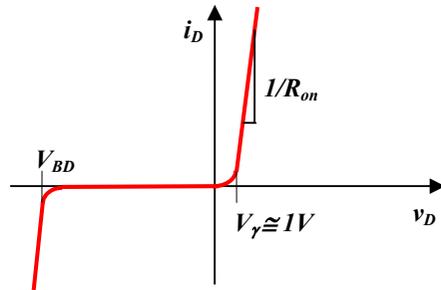
$A$ : Área de la sección perpendicular al plano del dibujo, es función de la corriente máxima

Sección de un diodo de potencia típico mostrando su estructura de tres capas.

## ESTRUCTURA BÁSICA. CARACTERÍSTICA ESTÁTICA DEL DIODO DE TRES CAPAS

La estructura de tres capas permite:

- En polarización inversa:** la unión formada por las capas  $p^+n^-$  al estar poco dopada soporta una tensión muy elevada.
- En polarización directa:** la circulación de electrones desde la capa  $n^-$  inunda de electrones la capa  $n^-$  con lo que desde el punto de vista de la caída en conducción es equivalente a un diodo muy dopado.



Curva característica estática del diodo de potencia.

Tipo de Diodo	Máxima tensión de ruptura	Máxima corriente	Caída en conducción	Velocidad de conmutación	Aplicaciones
Rectificadores de alta tensión	30kV	~500mA	~10V	~100nS	Circuitos de alta tensión
Propósito general	~5kV	~10kA	0.7 - 2.5 V	~25μS	Rectificadores 50 Hz
Rápidos (fast recovery)	~3kV	~2kA	0.7 - 1.5 V	<5μS	Circuitos conmutados
Diodos Schottky	~100V	~300A	0.2 - 0.9 V	~30nS	Rectificadores de BT y AF
Diodos Zener de potencia	~300 V (funciona en ruptura)	~75 W	-	-	Referencias y fijación de tensiones

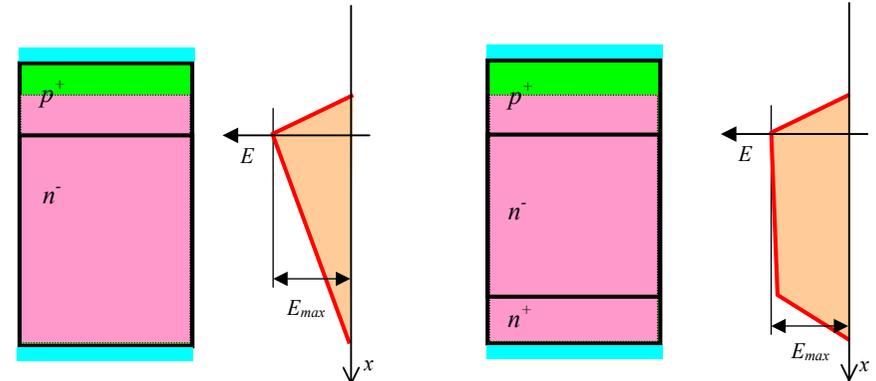
Principales características de los diodos de potencia

## POLARIZACIÓN INVERSA.

Area = Potencial Externo Aplicado  $= -\int E dx$

Area = Extensión de la zona de deplexión

Area = Conexión metálica (ánodo y cátodo)



a) Diodo sin perforar

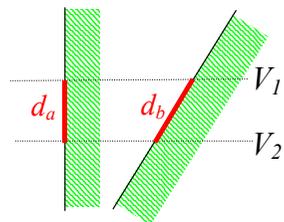
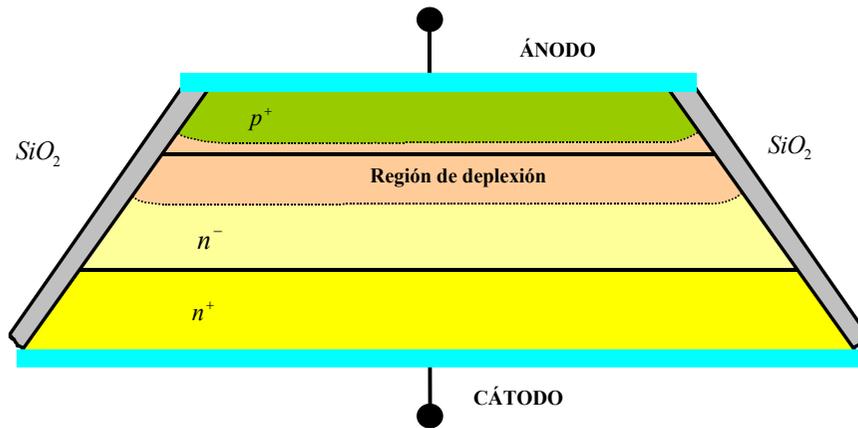
b) Diodo perforado

Límites de la zona de deplexión y distribución del campo eléctrico en diodos.

El valor  $E_{max}$  es la máxima intensidad de campo eléctrico que puede soportar el silicio y que ya se vio era unos 200.000 V/cm.

Si suponemos espesores de las capas de los dos diodos iguales, en el caso b (perforado), el área bajo la curva de la distribución del campo eléctrico es casi el doble que en el caso a. Por tanto, **la tensión inversa que se puede aplicar es prácticamente el doble**. Esto es una ventaja muy importante, no solo en diodos, sino en casi todos los dispositivos de potencia que estudiaremos en este curso.

**POLARIZACIÓN INVERSA. Técnicas para Mejorar  $V_{BD}$ .**  
**Biselado**



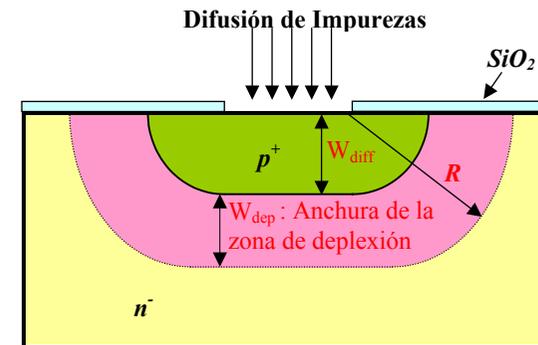
$$\frac{(V_1 - V_2)}{d_a} > \frac{(V_1 - V_2)}{d_b}$$

biselado de los bordes de un diodo de tres capas.

**Ventajas del biselado:**

- Eliminación por ataque químico de zonas con posibles defectos en la estructura cristalina (zona del corte mecánico).
- Disminución de la intensidad del campo eléctrico en las zonas más frágiles (superficie), al hacer  $d_2 > d_1$ .

**POLARIZACIÓN INVERSA. Técnicas para Mejorar  $V_{BD}$ .**  
**Anillos de Guarda**

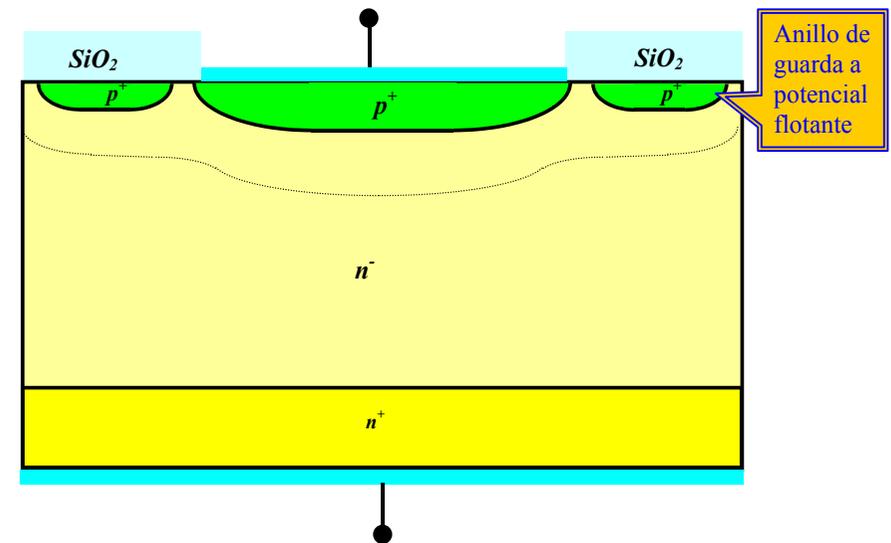


Experimentalmente se comprueba que no se produce acumulación de líneas de campo para  $R \geq 6 \cdot W_{dep}$

Para un diodo de 1000V, es aprox.  $W_{dep} = 100 \mu$ , luego  $R = 600 \mu$ .

Como  $W_{diff} \approx R$ , el tiempo de fabricación es excesivamente alto y por tanto no resulta rentable.

**Unión pn. Proceso de difusión**



**Unión p-n empleando anillos de guarda.**

## POLARIZACIÓN INVERSA. Características de Catalogo

Primer subíndice	Segundo subíndice	Tercer subíndice
<b>T</b> =Dir. Polarizado y conduce	<b>W</b> =De trabajo	<b>M</b> =Valor Máximo
<b>D</b> =Dir. Polarizado y no conduce	<b>R</b> =Repetitivo	<b>(AV)</b> =Valor Medio
<b>R</b> =Inversamente Polarizado	<b>S</b> =No Repetitivo	<b>(RMS)</b> =Valor Eficaz
<b>F</b> =Directamente Polarizado		

Subíndices empleados por los fabricantes de semiconductores.

### Características de Catálogo en Polarización Inversa:

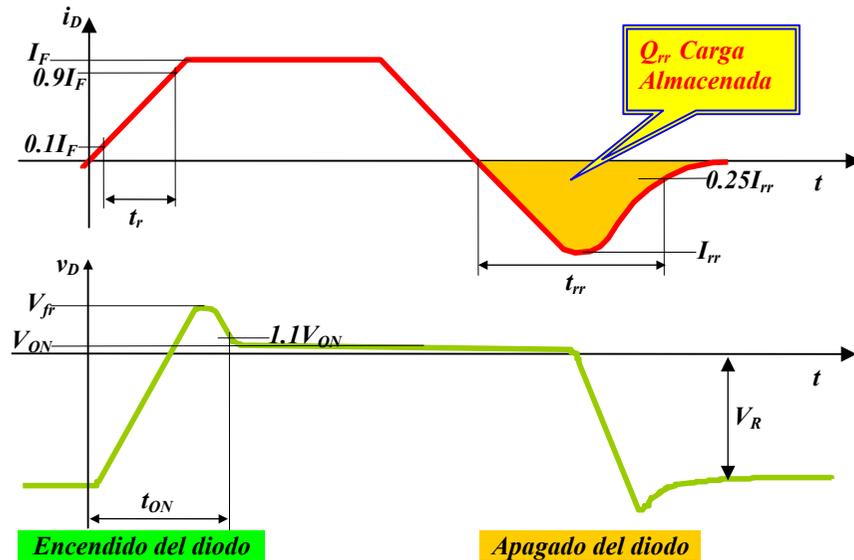
- **Tensión inversa de trabajo,  $V_{RWM}$**  : Máxima tensión inversa que puede soportar de forma continuada sin peligro de avalancha.
- **Tensión inversa de pico repetitivo,  $V_{RRM}$**  : Máxima tensión inversa que puede soportar por tiempo indefinido si la duración del pico es inferior a  $1ms$  y su frecuencia de repetición inferior a  $100 Hz$ .
- **Tensión inversa de pico único,  $V_{RSM}$**  : Máxima tensión inversa que puede soportar por una sola vez cada 10 ó más minutos si la duración del pico es inferior a  $10 ms$ .
- **Tensión de ruptura,  $V_{BD}$**  : Valor de la tensión capaz de provocar la avalancha aunque solo se aplique una vez por un tiempo superior a  $10 ms$ .

## POLARIZACIÓN DIRECTA

### Características de catálogo en Polarización Directa:

- **Corriente media nominal,  $I_{FW(AV)}$**  : Valor medio de la máxima corriente de pulsos senoidales que es capaz de soportar el dispositivo en forma continuada con la cápsula mantenida a una determinada temperatura (típicamente  $100^{\circ} C$ ).
- **Corriente de pico repetitivo,  $I_{FRM}$**  : Corriente máxima que puede ser soportada cada  $20ms$  con duración de pico  $1ms$ .
- **Corriente de pico único,  $I_{FSM}$**  : Corriente máxima que puede ser soportada por una sola vez cada 10 ó más minutos siempre que la duración del pico sea inferior a  $10ms$ .

## CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS

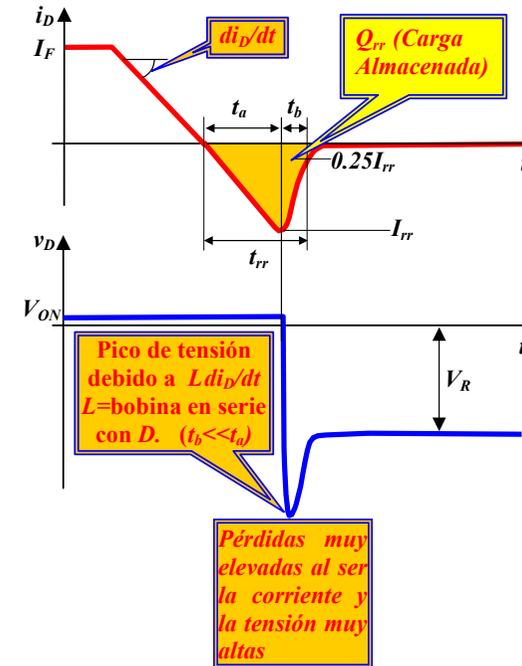


Curvas de tensión y corriente del diodo durante la conmutación.

- **Tensión directa**,  $V_{ON}$ . Caída de tensión del diodo en régimen permanente para la corriente nominal.
- **Tensión de recuperación directa**,  $V_{fr}$ . Tensión máxima durante el encendido.
- **Tiempo de recuperación directa**,  $t_{ON}$ . Tiempo para alcanzar el 110% de  $V_{ON}$ .
- **Tiempo de subida**,  $t_r$ . Tiempo en el que la corriente pasa del 10% al 90% de su valor directo nominal. Suele estar controlado por el circuito externo (inductivo).
- **Tiempo de recuperación inversa**,  $t_{rr}$ . Tiempo que durante el apagado del diodo, tarda la intensidad en alcanzar su valor máximo (negativo) y retornar hasta un 25% de dicho valor máximo. (Tip.  $10\mu s$  para los diodos normales y  $1\mu s$  para los diodos rápidos (corrientes muy altas).

## CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS

El tiempo de recuperación inversa es el mayor de los dos tiempos de conmutación y el responsable de la mayor parte de las pérdidas de conmutación.



La carga almacenada que se elimina por **arrastré** es:

$$Q_{rr} = \int_0^{t_{rr}} i_f dt$$

Aproximando el área bajo la corriente a un triángulo será:

$$\frac{I_{rr} t_{rr}}{2} \cong Q_{rr} \Rightarrow t_{rr} \cong \frac{2Q_{rr}}{I_{rr}}$$

La derivada de la corriente durante  $t_a$  depende del circuito externo, y normalmente será:  $t_a \gg t_b$ , es decir:  $t_a \cong t_{rr}$ . Si se resuelve el circuito y se conoce el valor de la derivada de  $i_D$ :

$$\frac{di_D}{dt} = \frac{I_{rr}}{t_a} \cong \frac{I_{rr}}{t_{rr}} \text{ se obtiene:}$$

$$I_{rr} \cong \sqrt{2Q_{rr} \frac{di_D}{dt}}$$

El valor de  $Q_{rr}$  puede obtenerse del catálogo del fabricante.

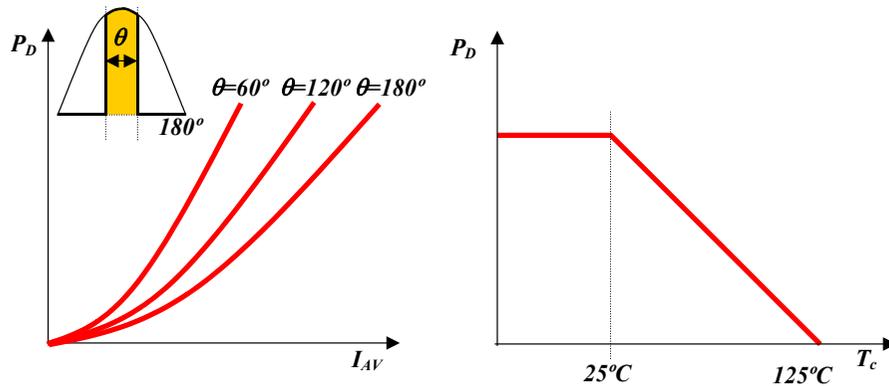
Curvas de tensión y corriente del diodo durante la conmutación a corte.

**Los factores que influyen en el tiempo de recuperación inversa son:**

- $I_F$ ; cuanto mayor sea, mayor será  $t_{rr}$ . Esto se debe a que la carga almacenada será mayor.
- $V_R$ ; cuanto mayor sea, menor será  $t_{rr}$ . En este caso si la tensión inversa es mayor se necesita menos tiempo para evacuar los portadores almacenados.
- $di_f/dt$ ; cuanto mayor sea, menor será  $t_{rr}$ . No obstante, el aumento de esta pendiente aumentará el valor de la carga almacenada  $Q$ . Esto producirá mayores pérdidas.
- $T$ ; cuanto mayor sea la temperatura, aumentarán tanto  $Q$  como  $t_{rr}$ .

## PÉRDIDAS EN LOS DISPOSITIVOS

- Bloqueo: Se suelen despreciar.
- En Conmutación. Son función de la frecuencia de trabajo. (Además de las corrientes, tensiones y la forma como evolucionan).
- En Conducción: Uso de catálogos:

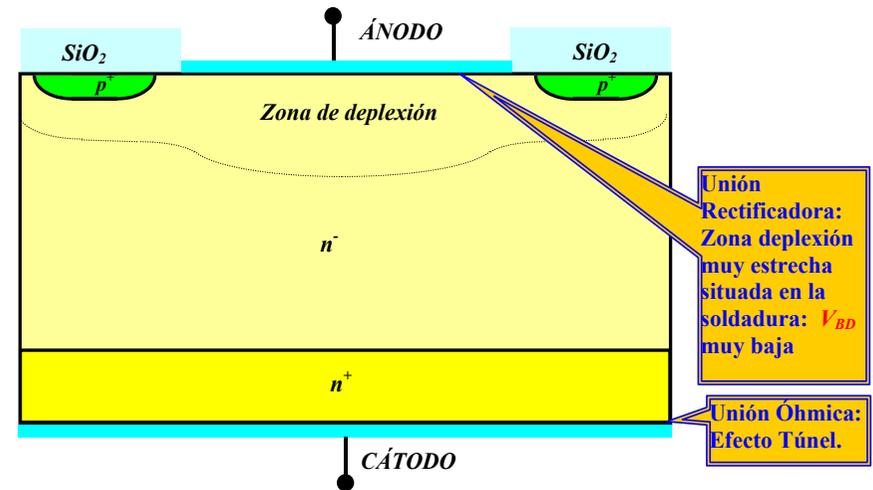


Curvas típicas suministradas por un fabricante para el cálculo de las pérdidas en conducción de un diodo

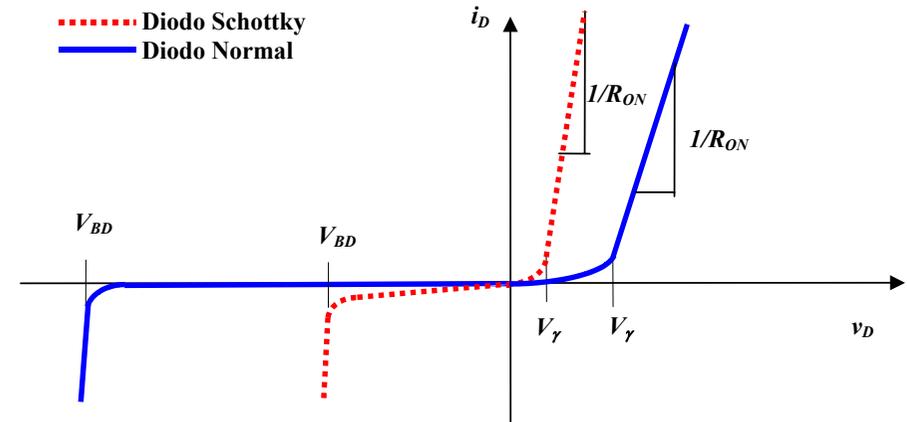
Las pérdidas aumentan con:

- La intensidad directa.
- La pendiente de la intensidad.
- La frecuencia de conmutación.
- La tensión inversa aplicada.
- La temperatura de la unión.

## DIODO SCHOTTKY DE POTENCIA



Diodo Schottky de potencia



Característica I-V de un diodo Schottky

Uso en circuitos donde se precise:

- Alta velocidad
- Bajas tensiones
- Potencias bajas

Por ej. Fuentes de alimentación conmutadas.