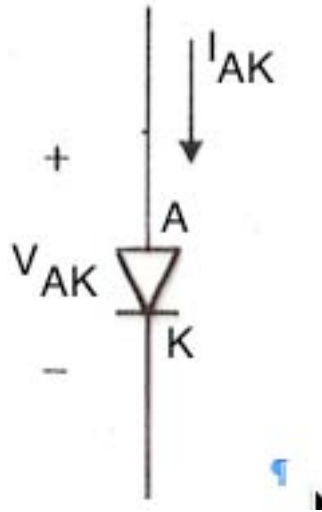
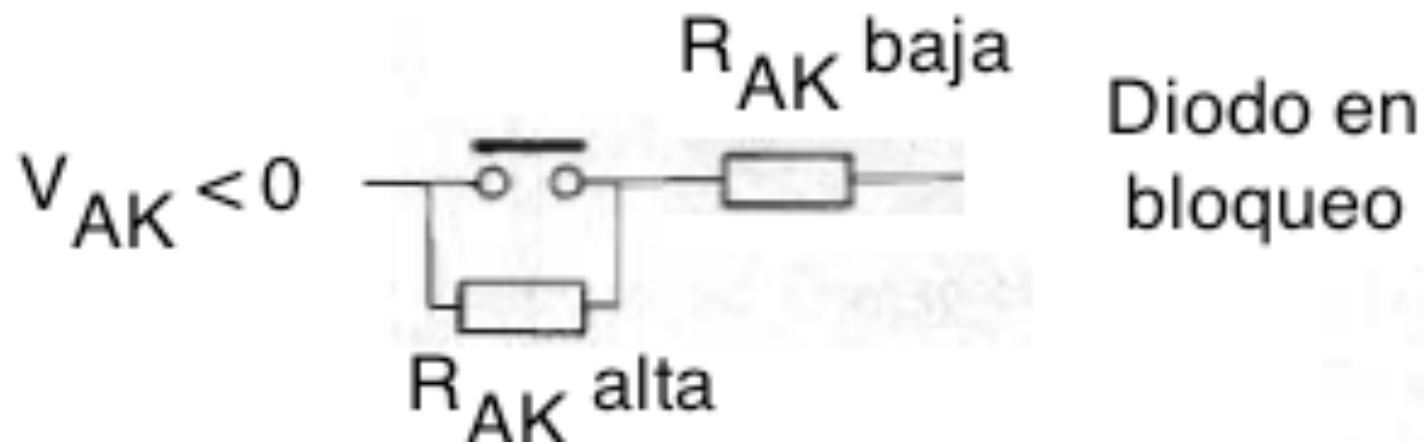
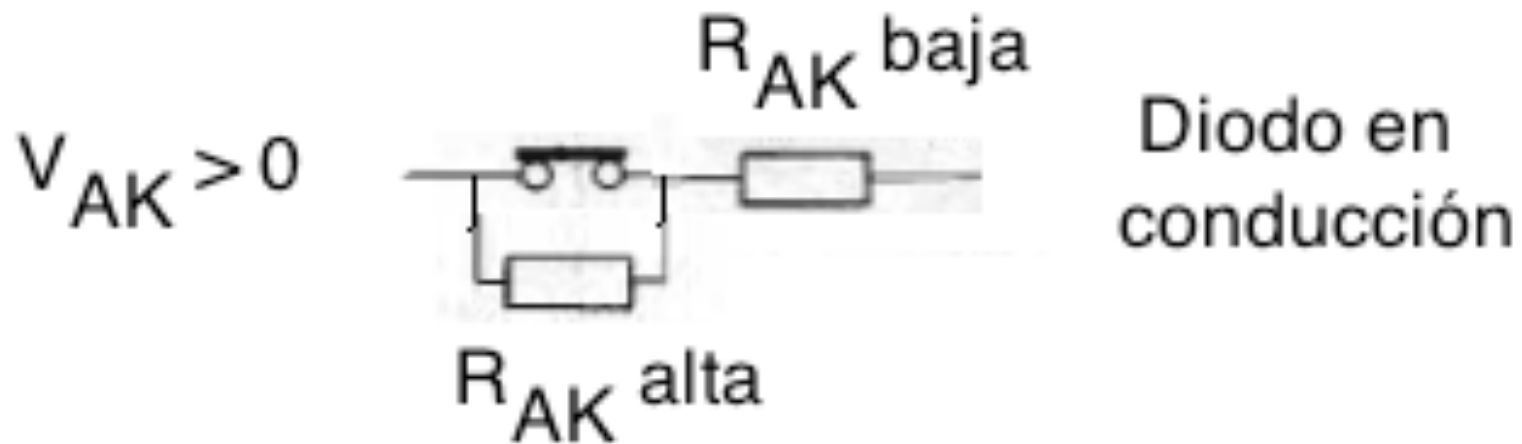


I.- Dispositivos no controlados: Diodos.

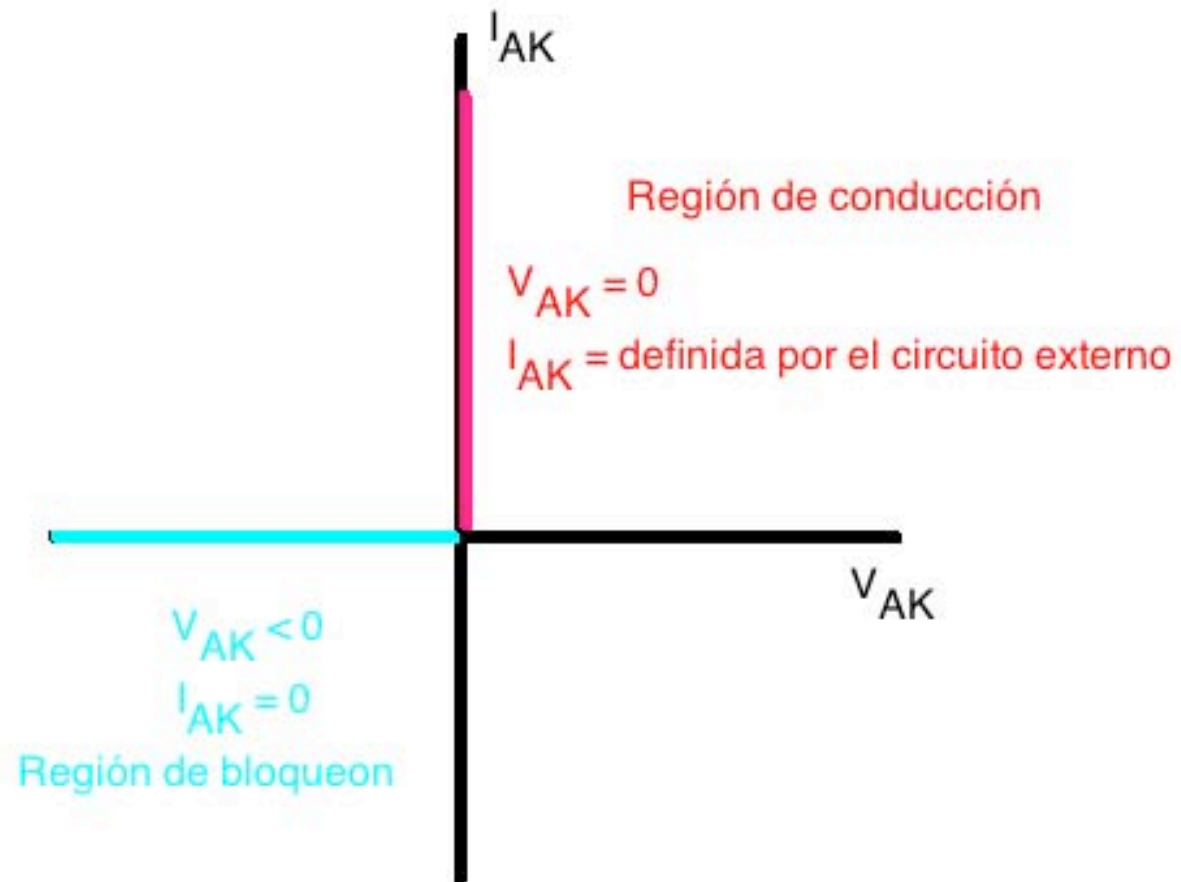


Los diodos son dispositivos de dos terminales, designados ánodo (A) y cátodo (K); permiten la circulación unidireccional de corriente del terminal de ánodo al de cátodo cuando el terminal de ánodo es positivo respecto al cátodo ($V_{AK} > 0$).



Esquema de los dos estados posibles en un diodo.

Características V/I del diodo ideal



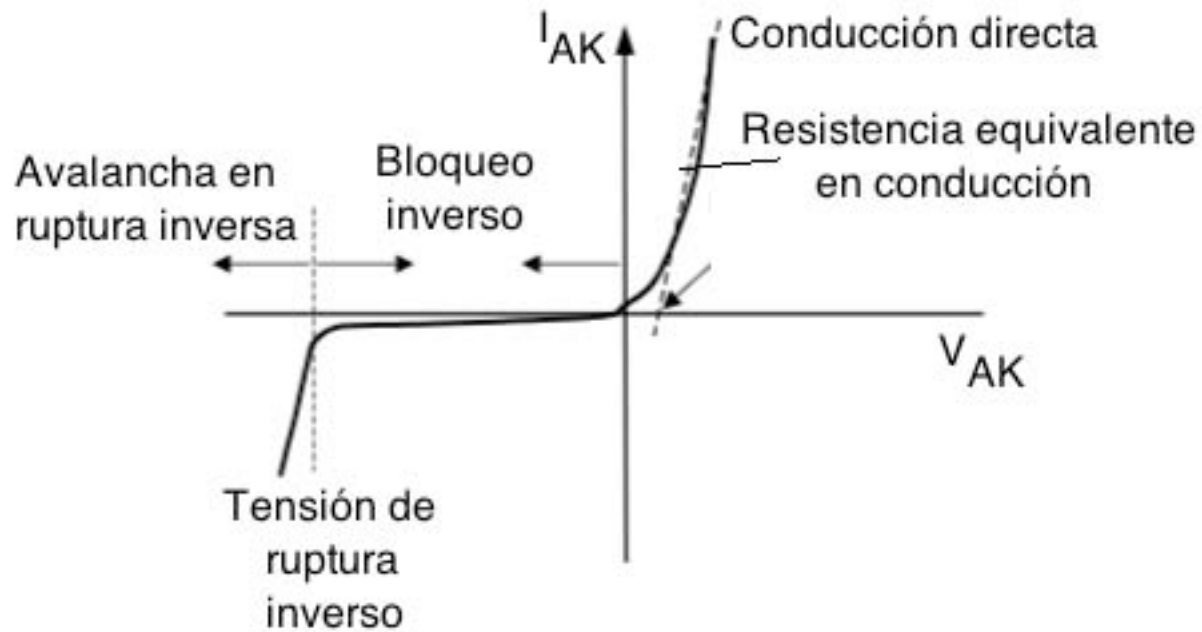
El diodo ideal bloquea totalmente la corriente cuando está polarizado en inverso ($Z_{inversa} = \infty$) y tiene una caída en conducción nula cuando está polarizado en directo ($Z_{directa} = 0$).

Las transiciones entre los estados de bloqueo y conducción son instantáneas: el tiempo de conmutación de encendido (t_{on}) y el de conmutación de bloqueo (t_{off}) deben ser nulos ($t_{on} = t_{off} = 0$).

Dado que en conducción la caída de tensión ánodo-cátodo, V_{AK} , es cero y en bloqueo la corriente ánodo-cátodo, I_{AK} , es cero, el dispositivo no disipa potencia, ya que el producto $V_{AK} * I_{AK} = P_{AK}$ es nulo tanto en conducción como en bloqueo.

La capacidad de bloquear tensión inversa es infinita:

$$V_{KAMax} = \infty$$



Características del diodo de potencia real genérico.

En el estado actual de la tecnología es imposible producir un diodo ideal; las características generales de los diodos implementables son las siguientes:

El bloqueo inverso no es perfecto: cuando $V_{AK} < 0$, existe una corriente en dirección K-A, la corriente de fuga inversa, que crece con el valor de la tensión inversa aplicada.

La tensión V_{AK} en conducción es mayor que cero y crece al aumentar el valor de la corriente I_{AK} .

Las conmutaciones de encendido y de apagado no son instantáneas y durante ellas también se disipa potencia.

El diodo real disipa potencia en todas las etapas del ciclo de operación (conducción directa, bloqueo inverso y conmutaciones de encendido y apagado).

Existe un valor máximo de la potencia que el diodo real puede disipar; si se supera este valor el diodo puede sufrir daños hasta ser destruido.

Existe un valor máximo, I_{AKM} , para la corriente directa; si se supera este valor la potencia disipada supera el valor máximo y el diodo puede sufrir daños hasta ser destruido.

Tanto los tiempos de conmutación como la disipación de potencia que se produce durante las conmutaciones limitan la frecuencia máxima de operación del diodo.

Existe una tensión máxima de bloqueo inverso, superada la cual el diodo entra en ruptura inversa y pierde la capacidad de bloquear la corriente inversa.

Existe un valor máximo para la corriente I_{AK} inversa; si se supera este valor la potencia disipada supera el valor máximo y el diodo puede sufrir daños por exceso de disipación de potencia hasta ser destruido.

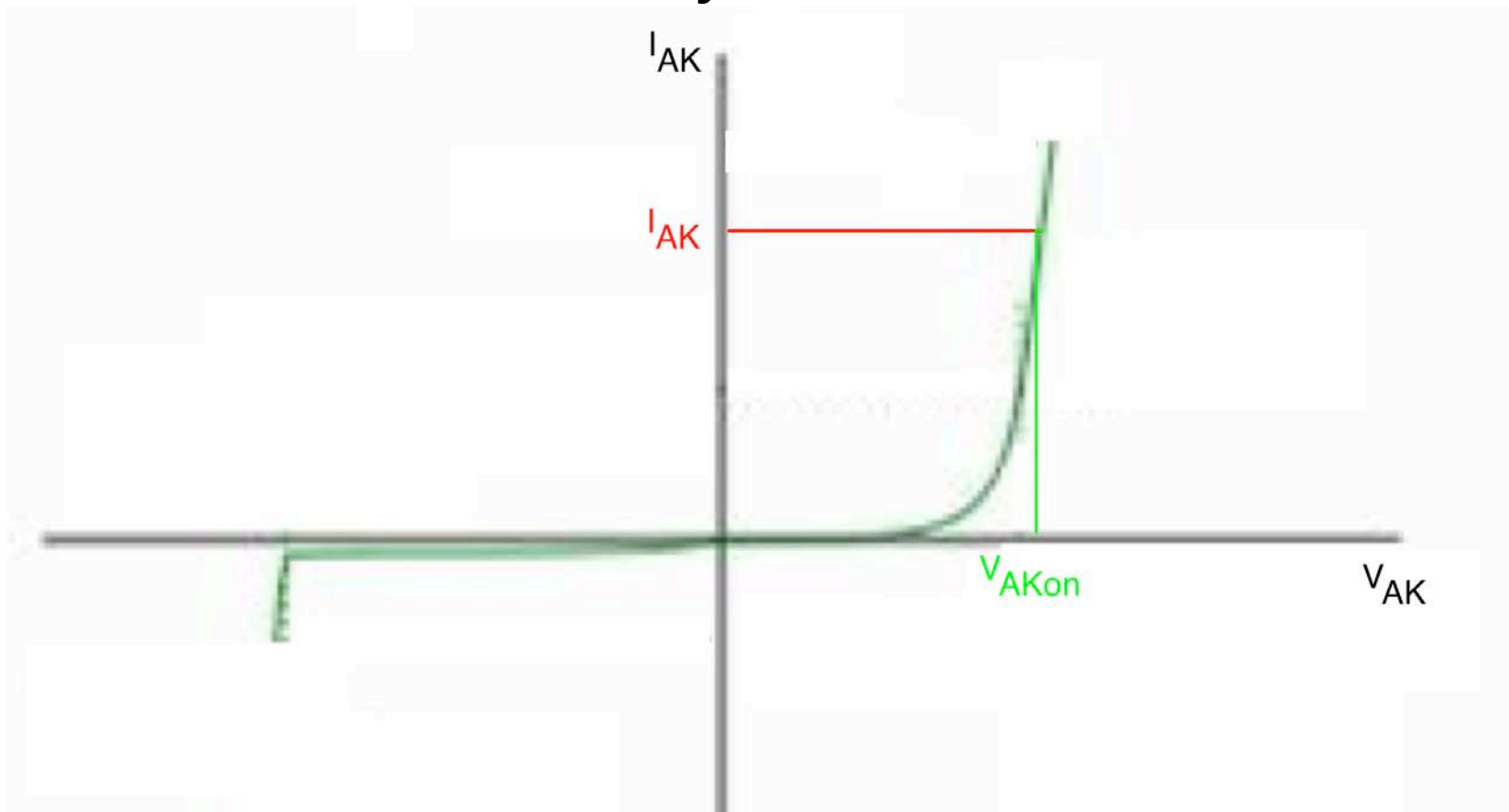
En aplicaciones de "pequeña señal", es usual considerar que la tensión ánodo-cátodo es la variable fundamental, y calcular la corriente ánodo-cátodo en base a dicha tensión, mediante la ecuación de Schockley:

$$I_{AK}(t) = I_s \left(e^{\frac{V_{AK}(t)}{nV_T}} - 1 \right)$$

Donde: I_s y n dependen del tipo de semiconductor y que para el Si son aproximadamente $10^{-12} A$ y 2.

V_T es el voltaje térmico ($\approx 25,85mV @ 300^\circ K$ para Si).

Sin embargo, si hay una fuente externa que haga circular la corriente AK, es esta corriente la que define la caída de tensión en la juntura del diodo.

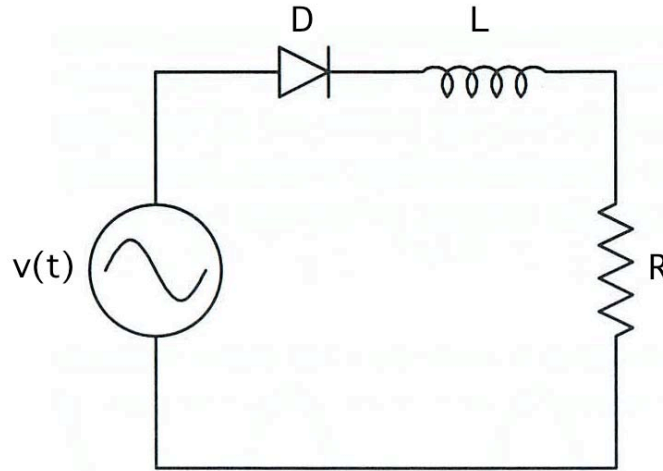


Esquema de definición del voltaje AK en base a la corriente AK

Dado que en las aplicaciones de electrónica de potencia es usual que los circuitos sean altamente inductivos, es previsible que las corrientes externas tiendan a variar lentamente, por lo que es más exacto considerar la forma logarítmica de la ecuación del diodo, que indica precisamente que la tensión AK es la variable dependiente:

$$V_{AK}(t) = nV_T \ln\left(\frac{I_{AK}(t)}{I_S} + 1\right)$$

Considerando el caso mas simple:



Donde $v(t) = V \cos \omega t$

$$V \cos \omega t = L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + v_{AK}(t)$$

$$V \cos \omega t = L \frac{di(t)}{dt} + Ri_{AK}(t) + nV_T \ln\left(\frac{i_{AK}(t)}{I_S} + 1\right)$$

Si, para simplificar, se considera en primera aproximación un diodo ideal, entonces $v_{AK}=0$ y la corriente circulante resulta aproximadamente:

$$i(t) = V \left[\frac{\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2} e^{\left(\frac{-t}{\tau} - \frac{\pi}{2\omega\tau}\right)} + \frac{R}{R^2 + \omega^2 L^2} \cos(\omega t) + \frac{\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2} \text{sen}(\omega t) \right]$$

Y, cuando el voltaje de la fuente externa cruza por cero:

$$V \cos(\omega t) = 0 \rightarrow \omega t = \frac{\pi}{2} \rightarrow t = \frac{\pi}{2\omega}$$

$$i\left(\frac{\pi}{2\omega}\right) = V \left[\frac{\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2} e^{\left(-\frac{\pi}{\omega\tau}\right)} + \frac{\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2} \right] \neq 0$$

Esto es, la energía almacenada en la bobina fuerza a que la corriente $i_{AK}(t)$ siga siendo positiva después del momento del cruce por cero de la fuente de tensión, por lo que el diodo sigue conduciendo durante un cierto tiempo, permitiendo que se aplique tensión negativa a la inductancia, lo que fuerza la reducción de la corriente hasta que esta alcanza el valor de 0, instante en el cual finalmente el diodo entra en el estado de bloqueo.

Tipos básicos de diodos de potencia de estado sólido:

- 1.- Diodos de juntura PN, en los cuales la zona activa del dispositivo activo esta formada por dos regiones semiconductoras, una tipo P y la otra tipo N.
- 2.- Diodos de juntura P-i-N, en los cuales la zona activa del dispositivo activo esta formada por dos regiones semiconductoras altamente dopadas, una tipo P y la otra tipo N separadas por una zona N de muy bajo dopado.
- 3.- Diodos Schottky, en los cuales la zona activa del dispositivo esta formada por una unión Schottky entre un contacto de metal y el bloque semiconductor.

En el estado actual de la tecnología la mayoría de los diodos de potencia en el mercado son del tipo PN, contruidos en base a Si mono cristalino.

Se está investigando activamente en otros materiales, de los cuales el carburo de silicio (SiC) parece ser el más prometedor, ya que permite la fabricación de diodos Schottky capaces de soportar tensiones de bloqueo de varios miles de voltios, y de operar con frecuencias de conmutación y temperaturas de juntura superiores a las posibles con los diodos PN o PiN de Si.

Los diodos Schottky de SiC ya se están ofreciendo en el mercado, y están encontrando aceptación en el diseño de conversores DC/DC y DC/AC.

Diodos P-I-N de Si.

Las tres características principales de un diodo de potencia son su corriente máxima, su tensión de bloqueo inversa máxima y su velocidad de conmutación.

Estas propiedades no pueden optimizarse simultáneamente, lo que da origen a dos tipos básicos de diodos de potencia PN de silicio:

- 1.- Los llamados “diodos de propósitos generales” en los cuales se da preferencia a la capacidad de corriente y al voltaje de bloqueo aceptando que estos diodos estarán limitados a trabajar a frecuencias bajas, usualmente en aplicaciones de conversión AC/DC o AC/AC a frecuencia de línea (50-60Hz).

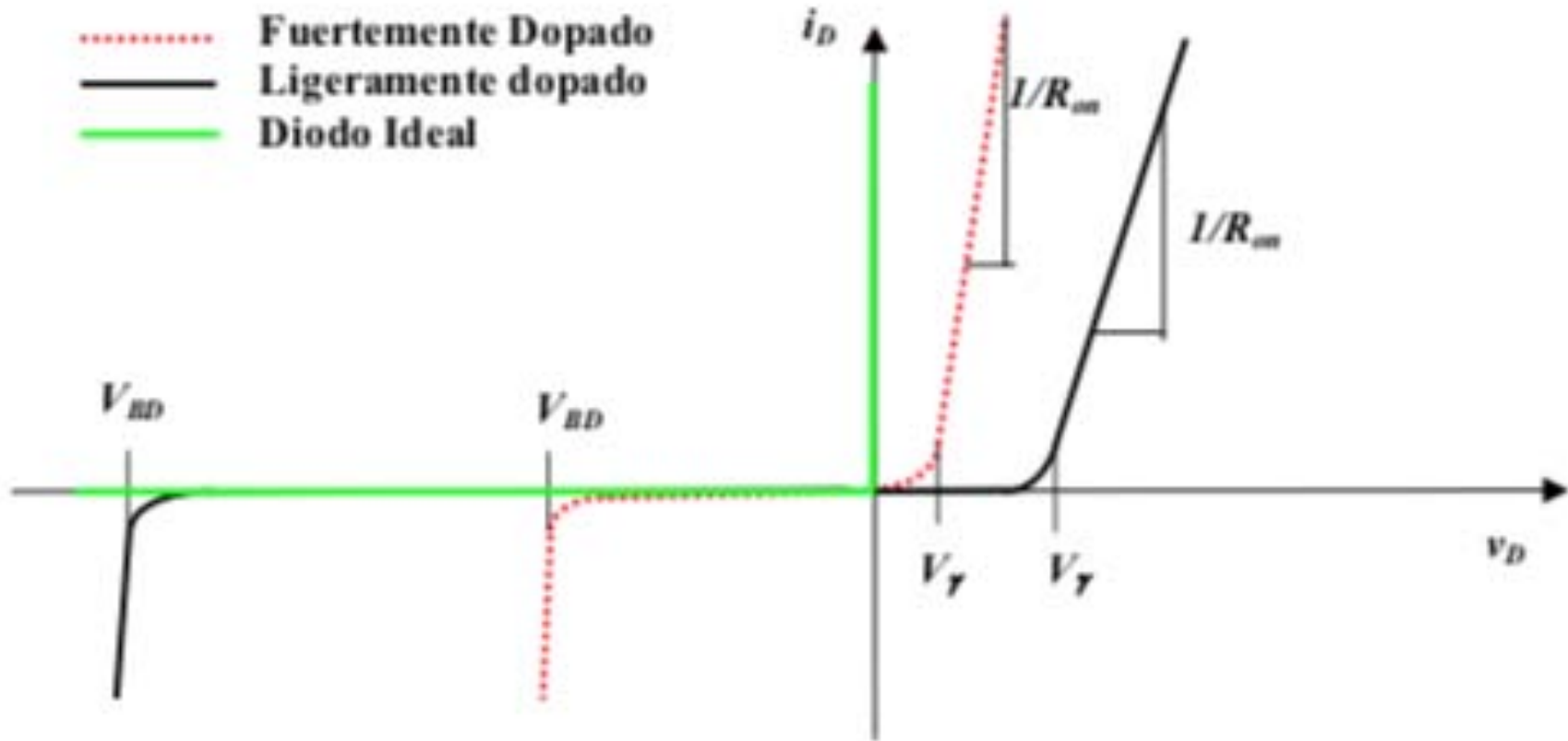
2.- Los llamados “diodos de recuperación rápida” (fast recovery) en los cuales se da preferencia a la velocidad de conmutación, para que puedan operar en aplicaciones de conversión DC/DC y DC/AC a frecuencias de las decenas de kHz.

Compromisos de diseño en los diodos de juntura P-I-N de potencia.

Maximizar la corriente A_K requiera disponer de la mayor superficie de conducción posible y reducir en lo posible las pérdidas en conducción.

Para aumentar el área de conducción el dispositivo de potencia se diseña colocando el ánodo y el cátodo en los lados opuestos de la oblea semiconductor, de forma que en principio el área de conducción sea igual al área de la oblea. Con esta estructura la corriente es vertical y atraviesa todo el espesor de la oblea, y no superficial, como en los dispositivos de pequeña señal.

Minimizar la caída en conducción requiere maximizar el dopado para reducir la impedancia del dispositivo, pero hacer esto tiende a reducir la tensión de bloqueo.

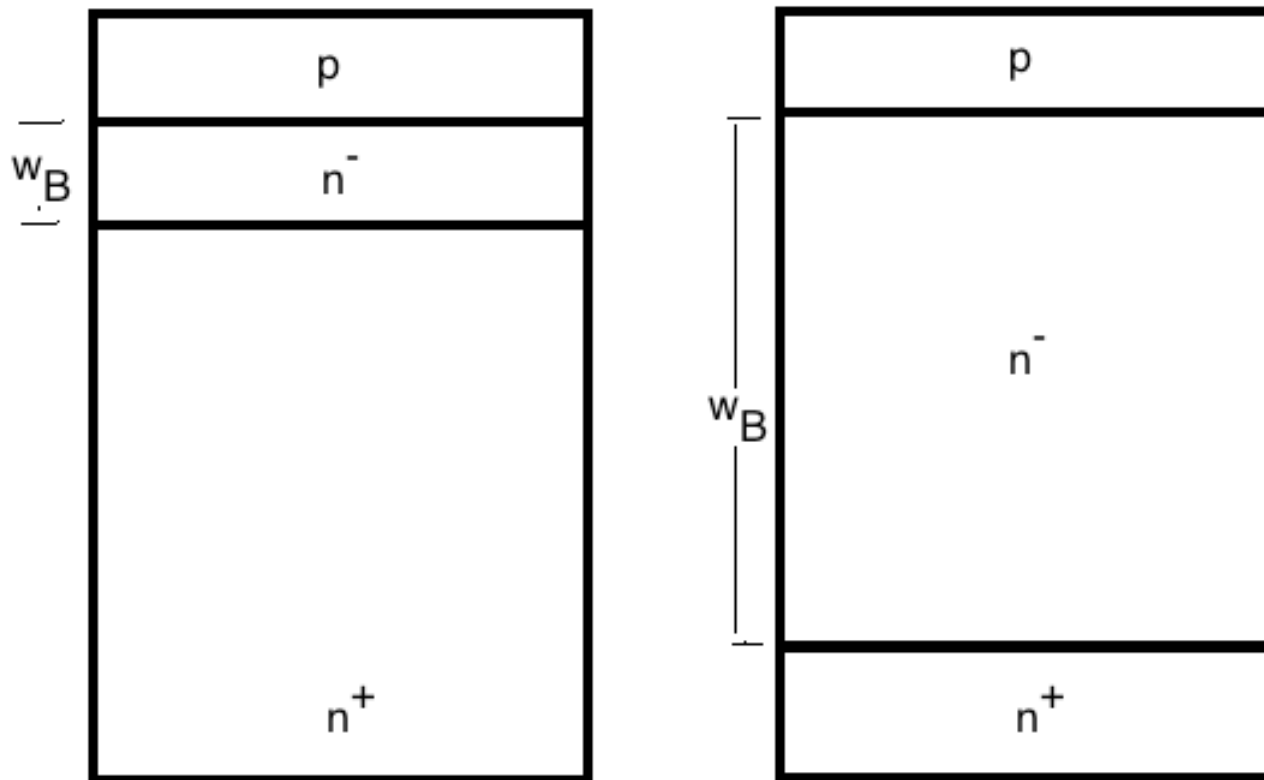


Efecto de la concentración de dopantes en la caída en conducción y en la tensión de bloqueo

Por su parte aumentar la tensión de bloqueo sin superar el valor crítico de la intensidad de campo requiere aumentar el ancho de la zona de vaciamiento, w_B , del diodo, lo que significa aumentar el espesor del cristal y por lo tanto las pérdidas en conducción, lo cual por supuesto va en contra de maximizar la capacidad de corriente

Alcanzar simultáneamente los objetivos de alta corriente y alto voltaje de bloqueo lleva a que los diodos de potencia sean dispositivos de conducción vertical, en los que la corriente atraviesa todo el espesor del cristal semiconductor; y a que la estructura del dispositivo este formada por tres regiones, en una configuración que usualmente se llama P-I-N, formada por una región N de alto dopado, una N de bajo dopado, y una P.

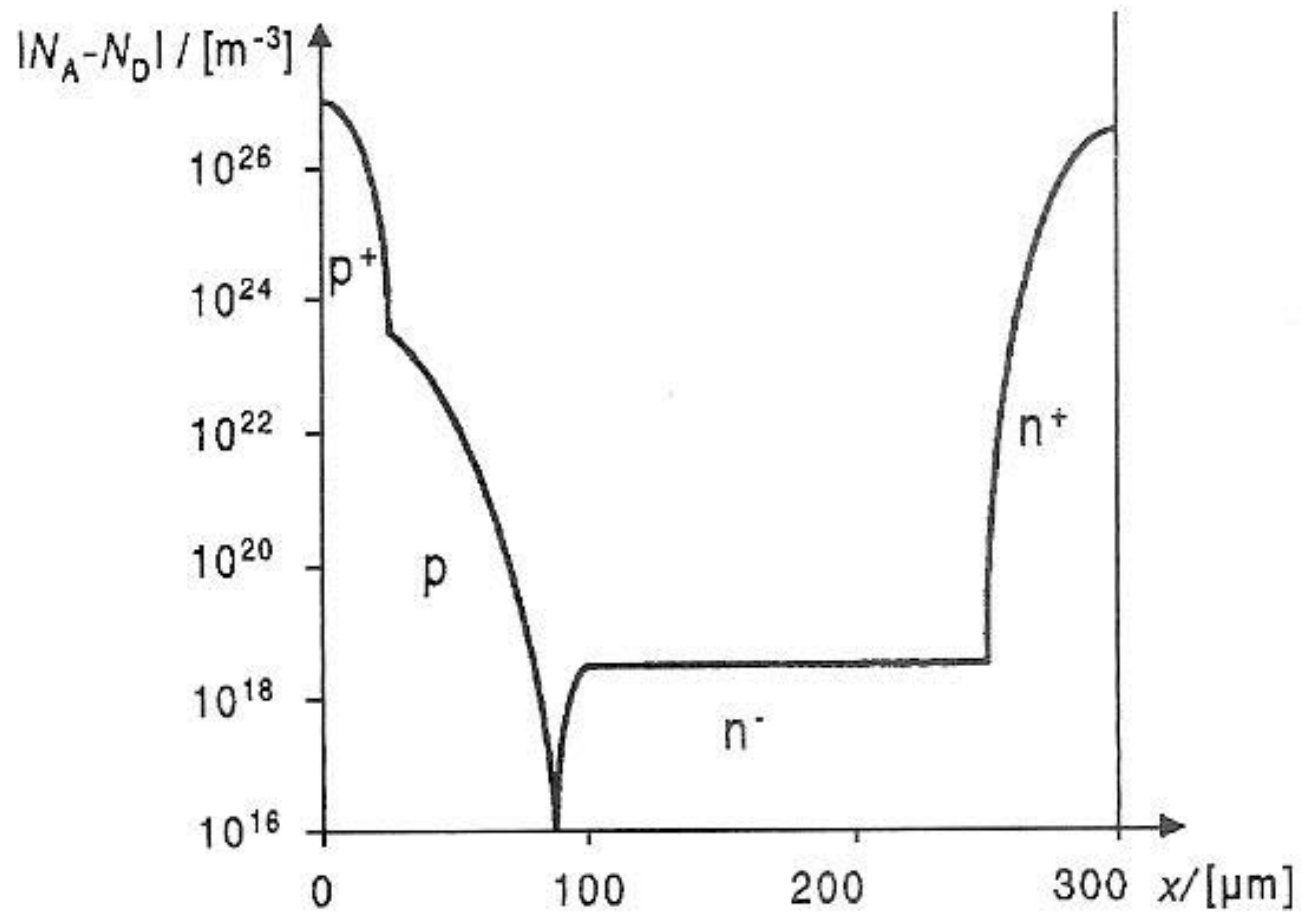
Esta configuración se puede lograr por un proceso de crecimiento epitaxial o por difusión.



Diodos P-I-N de crecimiento epitaxial (izquierda) y de dopado por difusión (derecha)

En el proceso epitaxial primero se hace crecer epitaxialmente una capa n^- delgada sobre un substrato n^+ altamente dopado, y luego se difunde la capa p sobre la n^- .

Esto produce una base con un espesor w_B de solo algunos micrómetros de espesor, mientras que la zona n^+ , de muy alto dopado y por lo tanto de baja resistencia puede tener el espesor necesario para asegurar que la oblea tenga la rigidez mecánica necesaria sin que aumenten significativamente las pérdidas en conducción.



Perfil genérico de dopado de un diodo P-I-N de crecimiento por difusión.

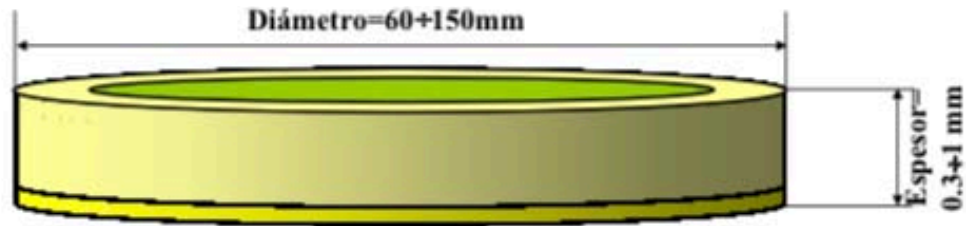
Conocido el espesor de la zona n^- en base a la tensión de bloqueo deseada, y el grosor del dispositivo completo necesario para asegurar su integridad física frente a las tensiones de ensamblaje y de los ciclos térmicos en operación, la diferencia se asigna al espesor de la capa base n^+ .

Esta forma de fabricación suele usarse para dispositivos de entre 100 y 600V de bloqueo, aunque algunos fabricantes lo usan hasta los 1.200V de bloqueo.

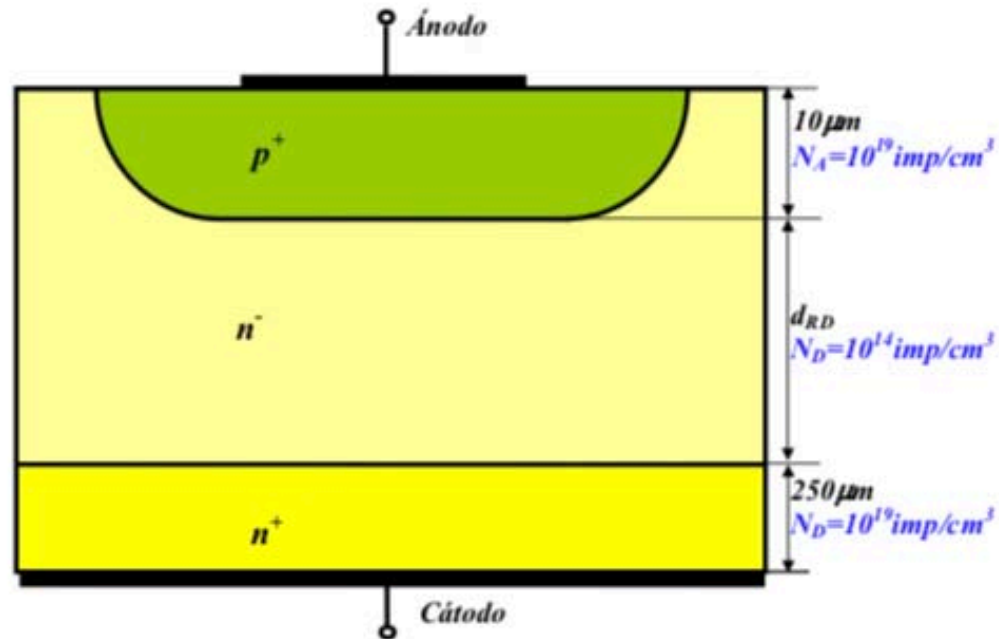
Para tensiones de bloqueo altas, de 1.200V o mas, la mayoría de los fabricantes emplean la técnica de difusión, que se inicia con un substrato n^- , sobre el cual

se difunde en una de las caras la zona p y en la otra la n^+ .

El resultado final es equivalente, pero el proceso de fabricación es menos costoso.



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



Corte ideal de un diodo de potencia P-I-N de silicio mostrando las dimensiones y los niveles de dopado típicos de las capas semiconductoras.

El diámetro de la oblea empleada depende del área de conducción requerida, que es función directa del valor máximo de corriente directa que debe soportar el diodo.

El contacto de metalización del ánodo se conecta directamente a la cara libre de la región p^+ , y el de metalización del cátodo queda conectado a la cara inferior del cristal.

El espesor de la capa n^- , d_{gD} , es función directa de la tensión inversa que debe soportar el diodo.

El espesor de la capa n^+ es el requerido para lograr que el cristal tenga el grosor necesario para asegurar su integridad física, tanto durante el proceso de fabricación

como durante la operación cuando queda sujeto a un ciclo constante de calentamientos y enfriamientos que introducen esfuerzos mecánicos en la oblea.

Ventajas de la estructura de tres capas en comparación con una estructura simple P-N de dos capas.

1.- En polarización inversa: La unión formada por las capas p^+n^- al estar poco dopada soporta una tensión muy elevada.

2.- En polarización directa: la inyección de portadores inunda de portadores la capa n^- , con el resultado de que desde el punto de vista de la caída en conducción el conjunto opera como un diodo con muy alto dopaje, reduciendo significativamente la caída de tensión en conducción.

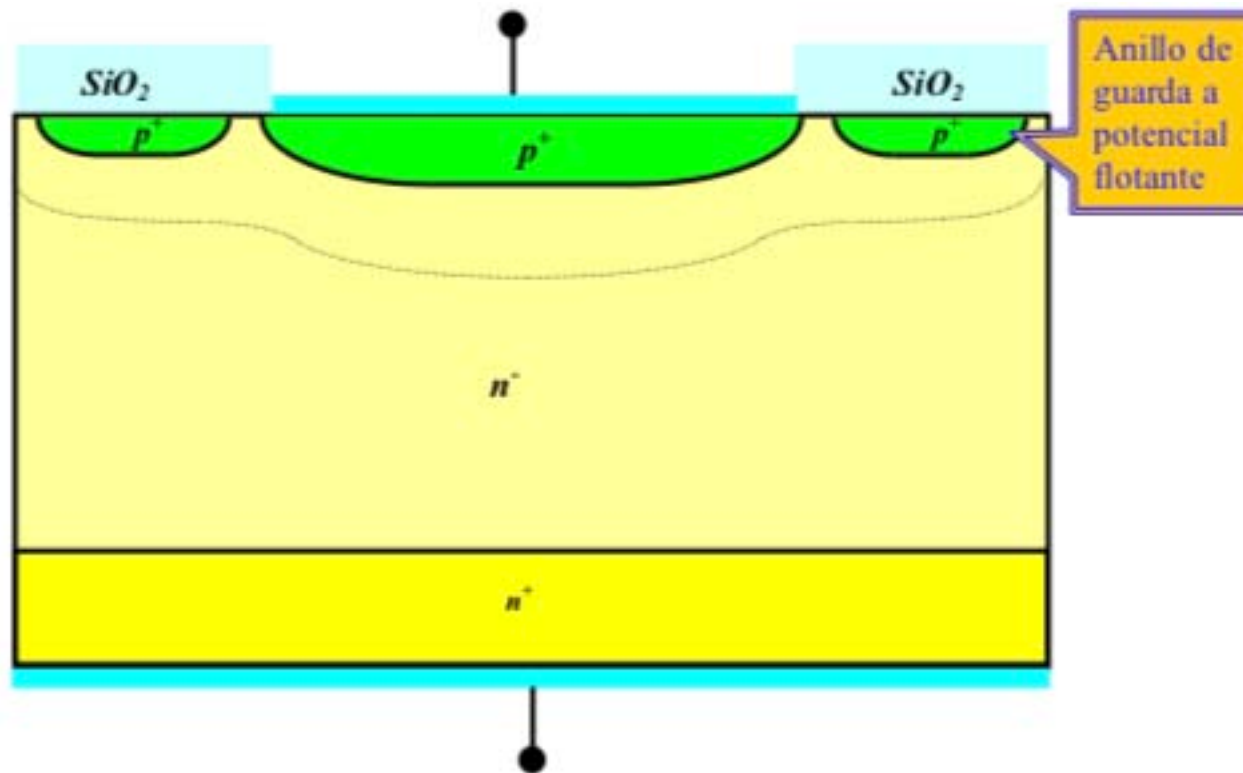
En general las aplicaciones de potencia requieren tensiones de bloqueo elevadas, por lo que es necesario incorporar elementos adicionales a la estructura básica

P-I-N:

1.- Anillo de guarda:

Es una zona tipo p que forma un anillo alrededor del ánodo del diodo, este anillo de guarda queda cubierto por la capa de óxido de silicio (SiO_2) de pasivación y no está conectado eléctricamente a los terminales del diodo; su función es limitar la intensidad de campo en el borde del cristal.

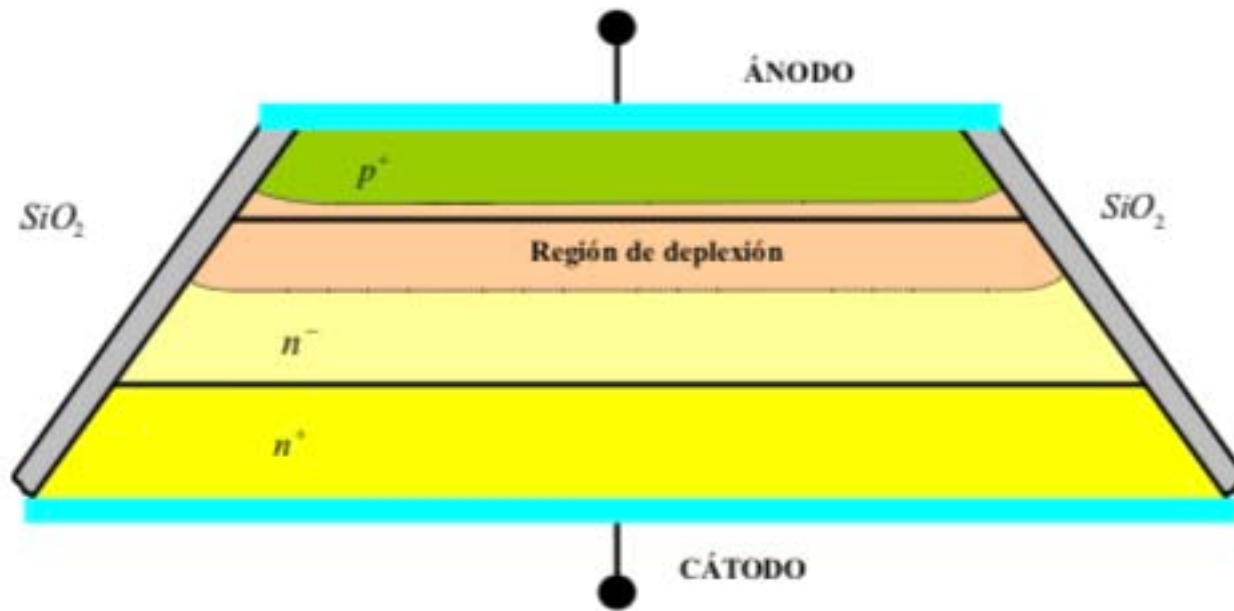
El anillo ocupa un área adicional en la cara superior del cristal, lo que reduce el área disponible para la zona de ánodo



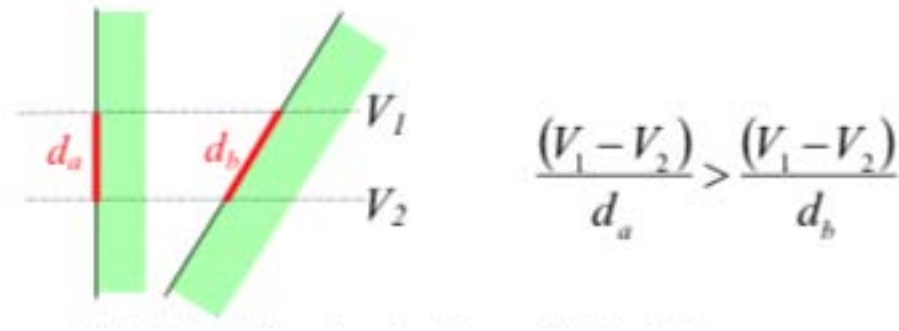
Diodo de potencia con anillo de guarda flotante.

2.-Biselado:

Consiste en remover parte del material en el borde de la oblea, para eliminar los posibles defectos y formar un talud en ángulo que puede ser pasivado con SiO_2 y además aumenta la distancia que separa a los bordes de las distintas zonas de dopado, contribuyendo a aumentar la tensión de ruptura al reducir la intensidad de campo en la zona del borde.



Perfil de un diodo biselado.

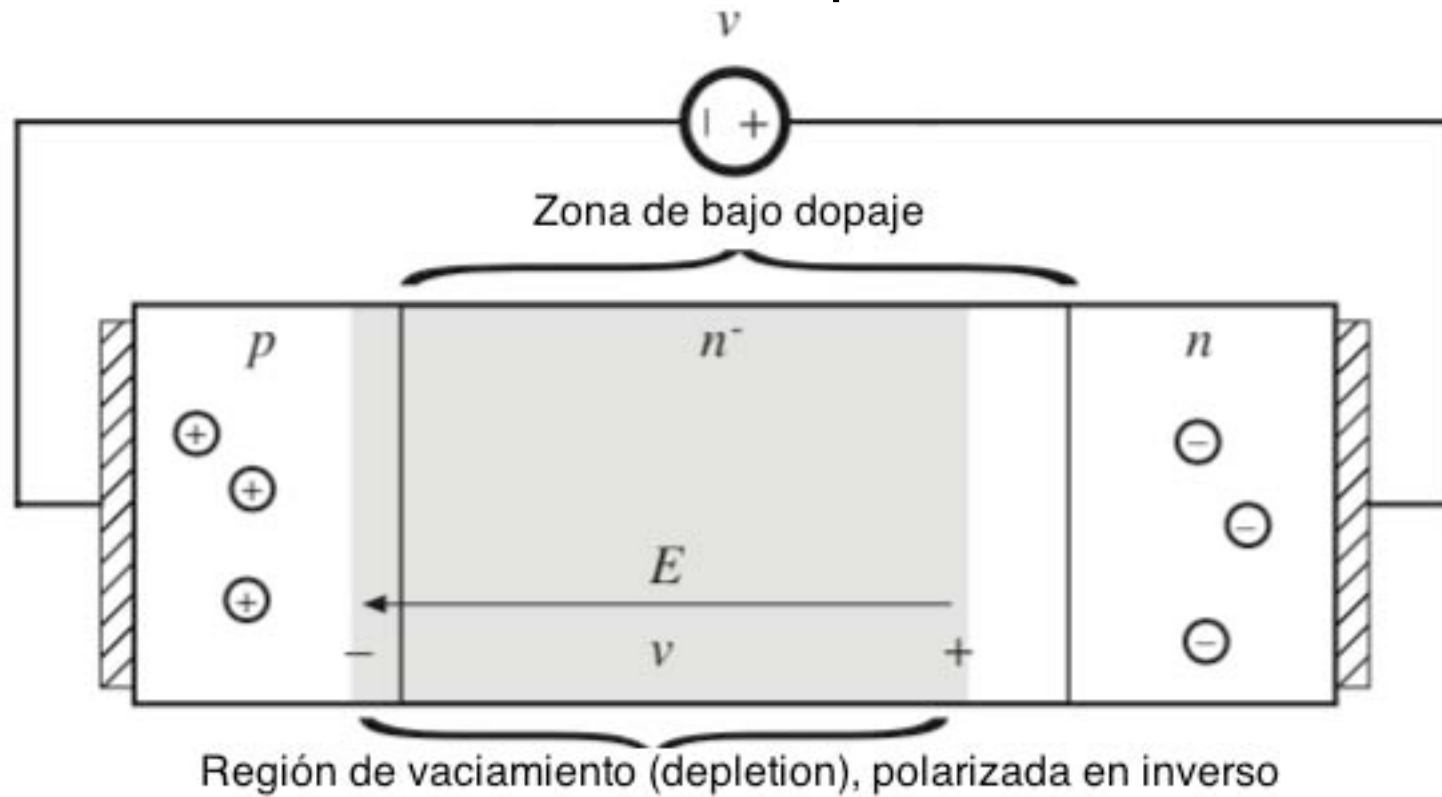


Efecto del biselado sobre la intensidad de campo al aumentar la distancia efectiva entre las regiones de distinto dopado.

Por supuesto, tanto la formación del anillo de guarda como el proceso de biselado reducen el área efectiva disponible para la región de ánodo, cuyo tamaño es uno de los factores que definen la capacidad máxima de corriente del diodo.

Operación de la estructura P-I-N:

A.- En bloqueo.



La tensión inversa aplicada cae básicamente en la zona de vaciamiento creada por el campo en la región n^- .

El espesor mínimo de la zona n^- queda definido por el voltaje de bloqueo deseado y la máxima intensidad de campo considerada en el diseño (usualmente unos 200.000V/m).

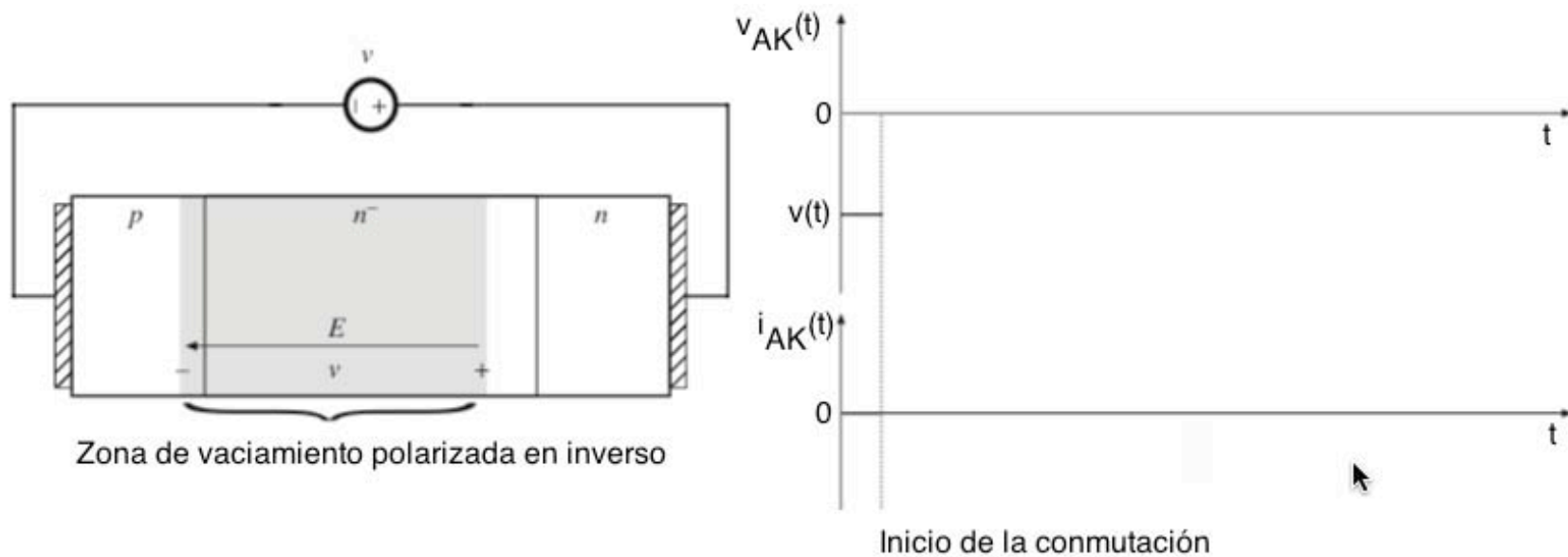
B.- Comienzo de conducción. Condiciones iniciales:

a.- Diodo en bloqueo inverso

b.- La carga minoritaria almacenada es 0.

c.- La tensión inversa es soportada por la zona de vaciamiento.

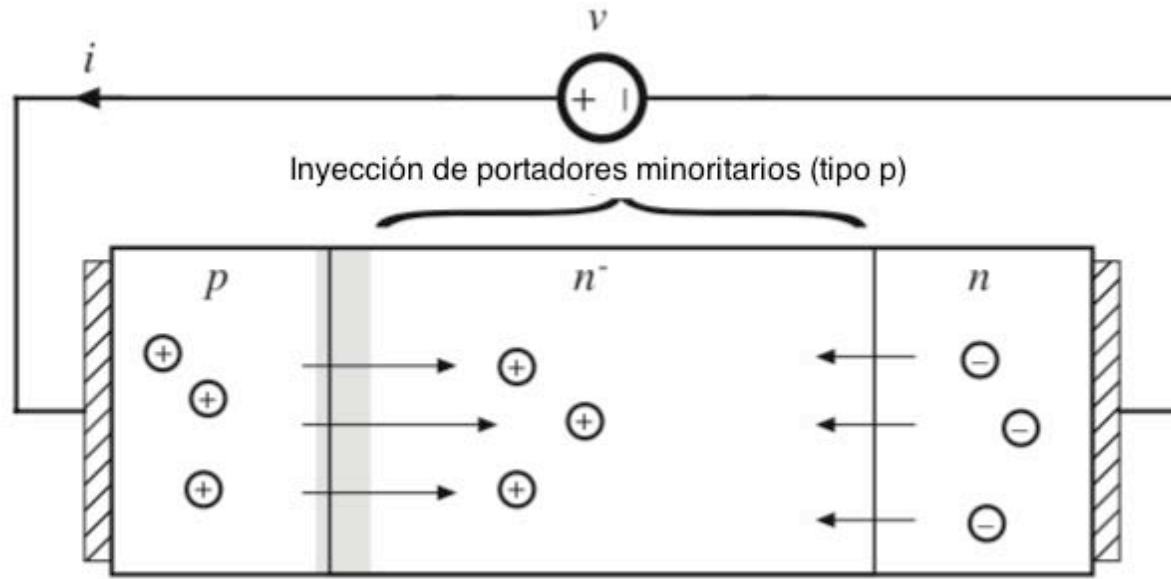
d.- La carga eléctrica está almacenada en la capacidad equivalente de la región de vaciamiento.



Conmutación de encendido, condiciones iniciales.

Izquierda: Distribución de carga.

Derecha: Gráficas de voltaje y corriente.



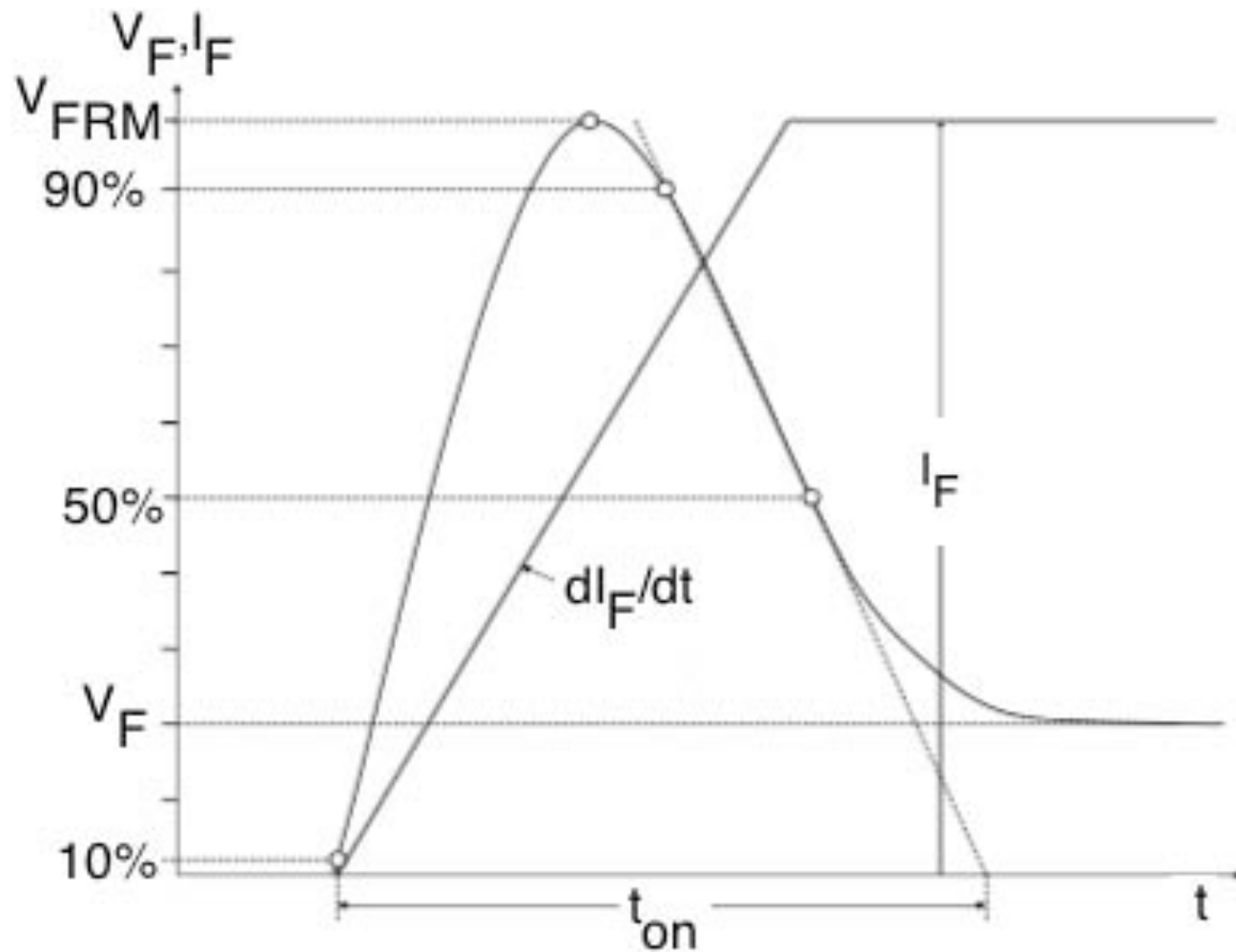
Al pasar de polarización inversa a directa se inicia el proceso de inyección de portadores tipo p en la región n⁻ a través de la juntura p-n⁻ y se inicia la transitoria de encendido.

Transitoria de encendido.

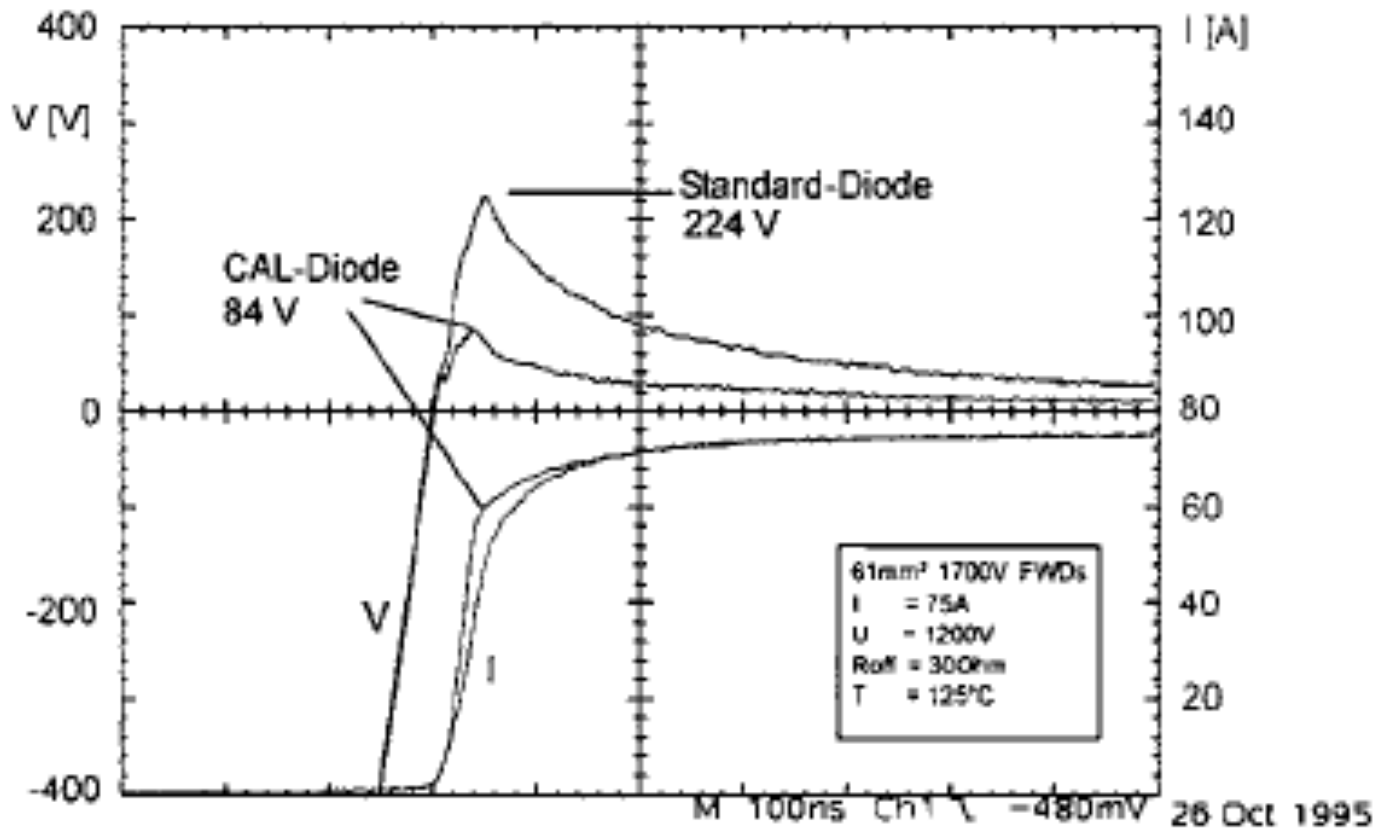
a.- El valor de la corriente A_K y su di/dt queda determinado por la tensión y la impedancia del circuito externo.

b.- La corriente A_K suministra los portadores necesarios para empezar a reducir la resistividad de la región n- e ir acumulando la carga espacial.

Debido a la alta resistividad propia de la zona n- la tensión A_K crece inicialmente hasta alcanzar un valor pico, y luego cae hacia el valor en estado estacionario a medida que se acumula carga espacial en la zona n- y la resistividad efectiva va reduciéndose.



Evolución de la tensión y la corriente AK durante la etapa transitoria del proceso de encendido.

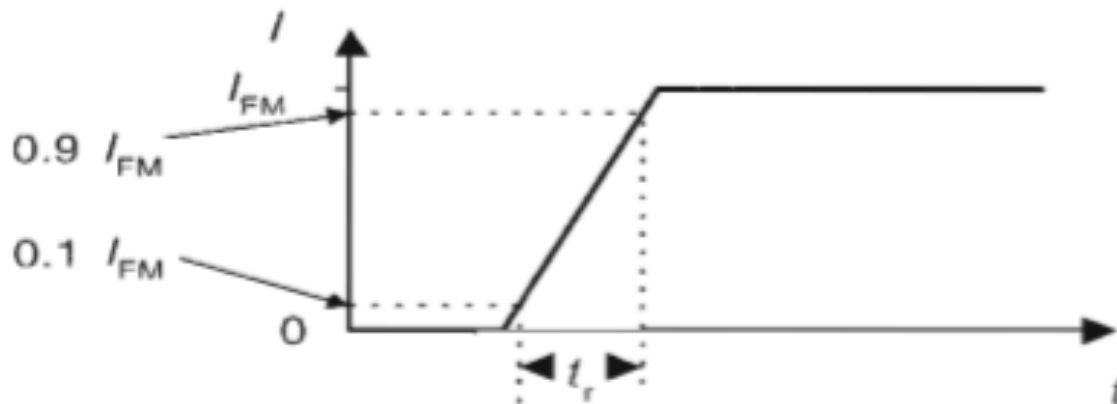


Oscilograma comparando la transitoria de encendido de un diodo de propósito general y uno rápido optimizado para limitarla.

Los valores de di_F/dt durante el proceso de encendido y de I_F al final del proceso de encendido dependen de los parámetros del circuito externo

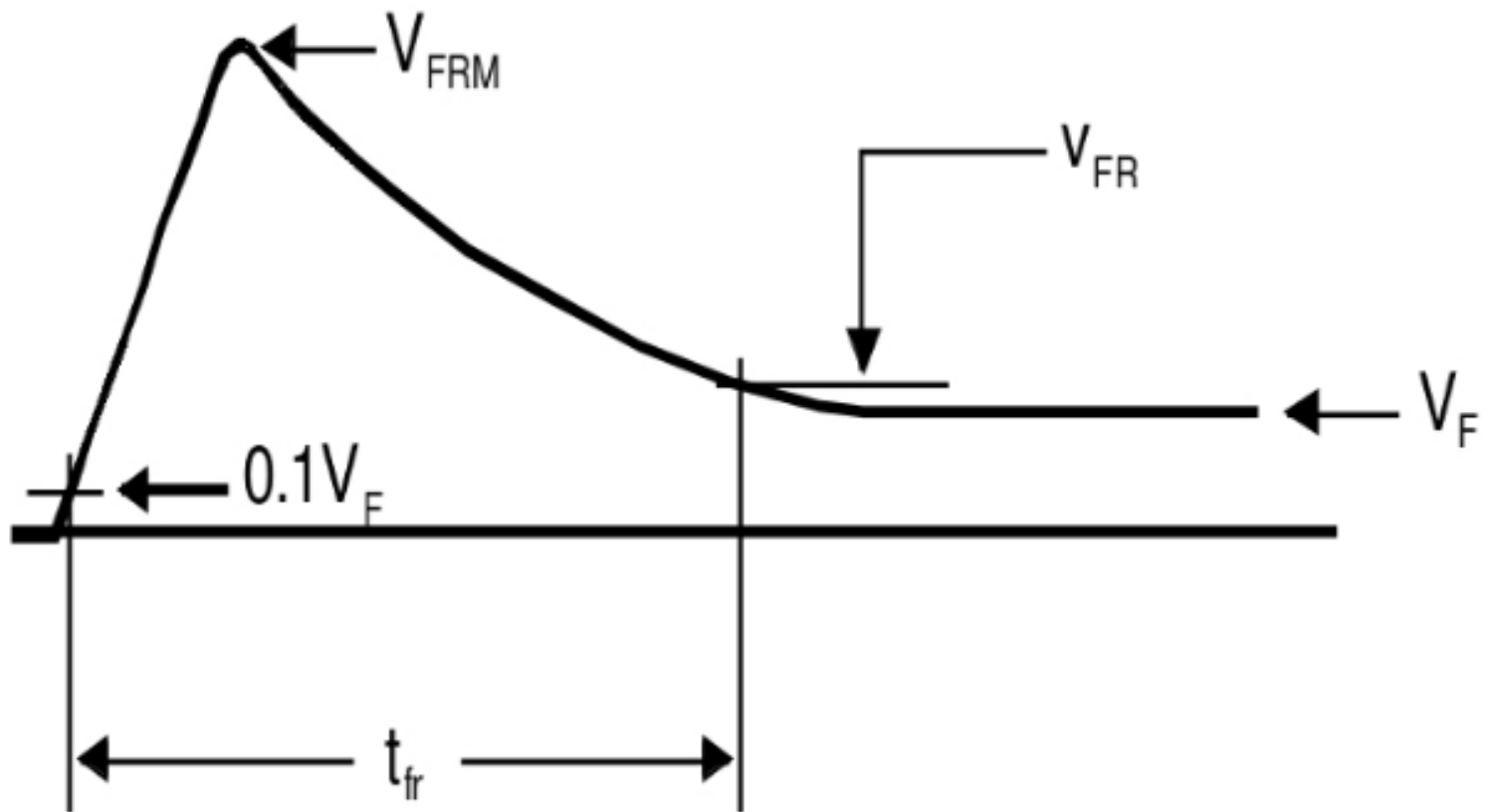
El proceso de encendido termina una vez que el pico inicial de la tensión AK se reduce y la tensión AK se estabiliza en el valor determinado por la corriente AK impuesta por el circuito externo.

El tiempo de subida de la corriente, t_r , se mide entre el momento en el cual la corriente AK supera décima parte de su valor final hasta que alcanza el 90% de su valor final. Este tiempo depende de los parámetros del circuito externo.



Definición gráfica del tiempo de subida, t_r .

El tiempo de subida del diodo, t_{tr} , se mide desde el momento en el que la tensión AK supera el 10% de su valor final hasta el momento en el que la tensión AK del diodo cae hasta el 110% de su valor final; de acuerdo con las normas JEDEC (Joint Electron Device Engineering Council) este tiempo se llama “tiempo de recuperación directa” del diodo.

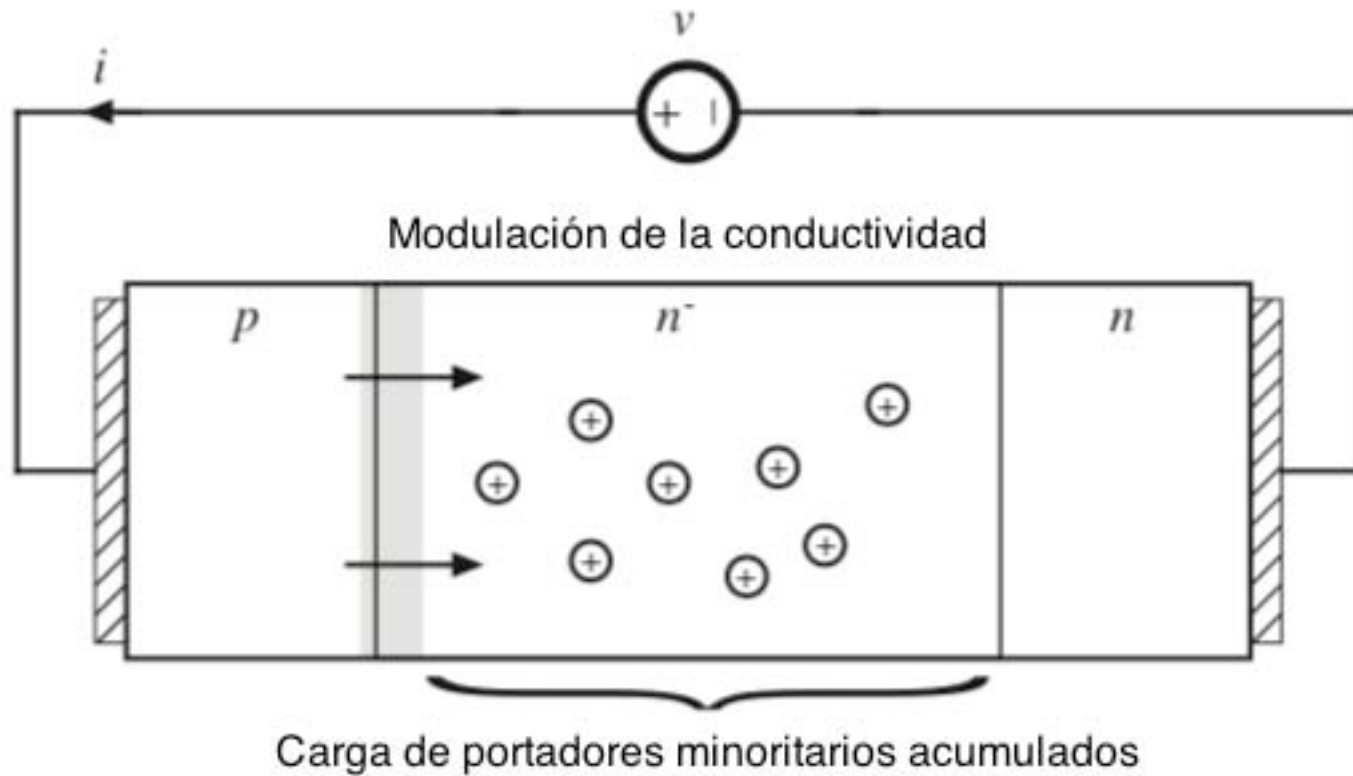


Definición gráfica del tiempo de recuperación directa del diodo, según JEDEC (Joint Electron Device Engineering Council) JESD282B.01

En general el valor pico de sobretensión de encendido, V_{FM} , aumenta directamente en función del valor del di_{AK}/dt ; el valor pico se alcanza en tiempos que varían entre $0,1$ y $10\mu s$, dependiendo del espesor de la zona de carga espacial, que usualmente se encuentra entre $50\mu m$ para un diodo rápido típico y $500\mu m$ para un diodo de propósito general de alto voltaje.

Para que el pulso de encendido del diodo sea significativo el di_{AK}/dt inicial debe ser del orden de las decenas de amperios por microsegundo. Esto usualmente no ocurre en aplicaciones de propósito general (diodos conmutando a la frecuencia de línea), pero es la situación normal para los diodos de “libre conducción” en aplicaciones en convertidores DC/DC y DC/AC.

C.- En equilibrio de conducción.



Modulación de la conductividad de la región n^- por inyección de portadoras p.

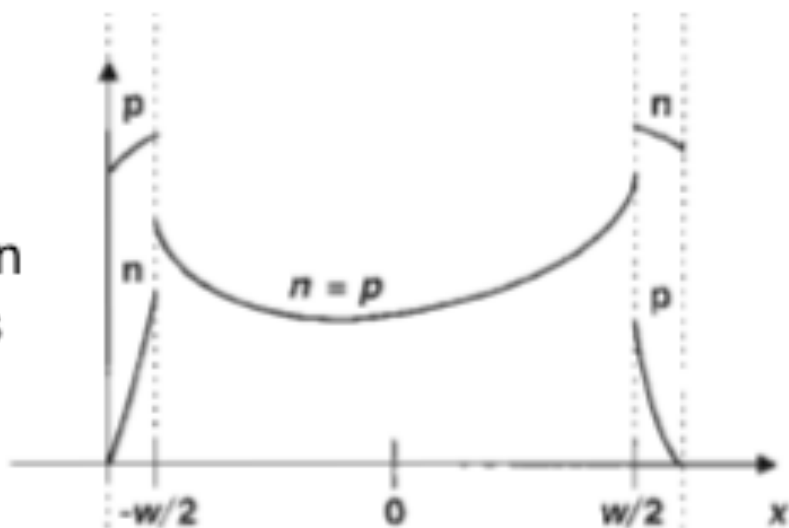
La acumulación de portadores tipo p en la región intrínseca n^- satura esta región, cuya conductividad queda modificada transitoriamente (“modulada”) por el exceso de portadores p libres, la conductividad efectiva aumenta notablemente, y la caída en conducción es comparativamente pequeña.

La duración del intervalo en conducción es, por supuesto, determinada exclusivamente por el circuito externo.

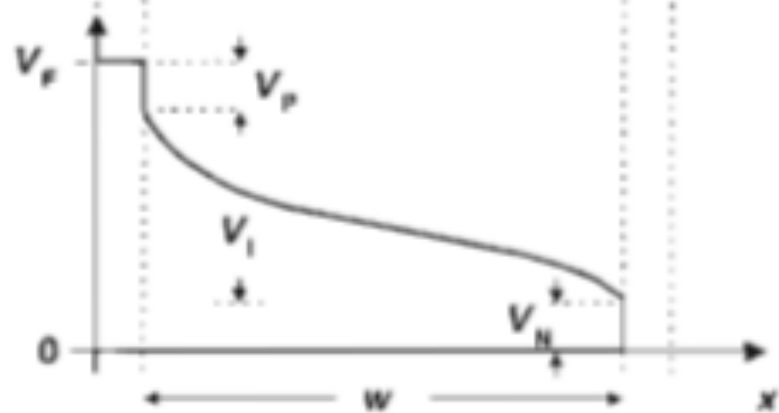
Durante todo el tiempo de conducción la tensión AK es la determinada por la corriente circulante de acuerdo con:

$$V_{AK}(t) = nV_T \ln\left(\frac{I_{AK}(t)}{I_S} + 1\right)$$

Concentración de portadores



Distribución del potencial



Concentración de portadores y distribución del potencial en un diodo P-I-N polarizado en conducción.

III.- Conmutación de apagado.

El proceso de apagado es iniciado por una reducción en la corriente externa, usualmente producida por un cambio en la polaridad del voltaje en el circuito externo.

El di_{AK}/dt de esta reducción está definido por el circuito externo.

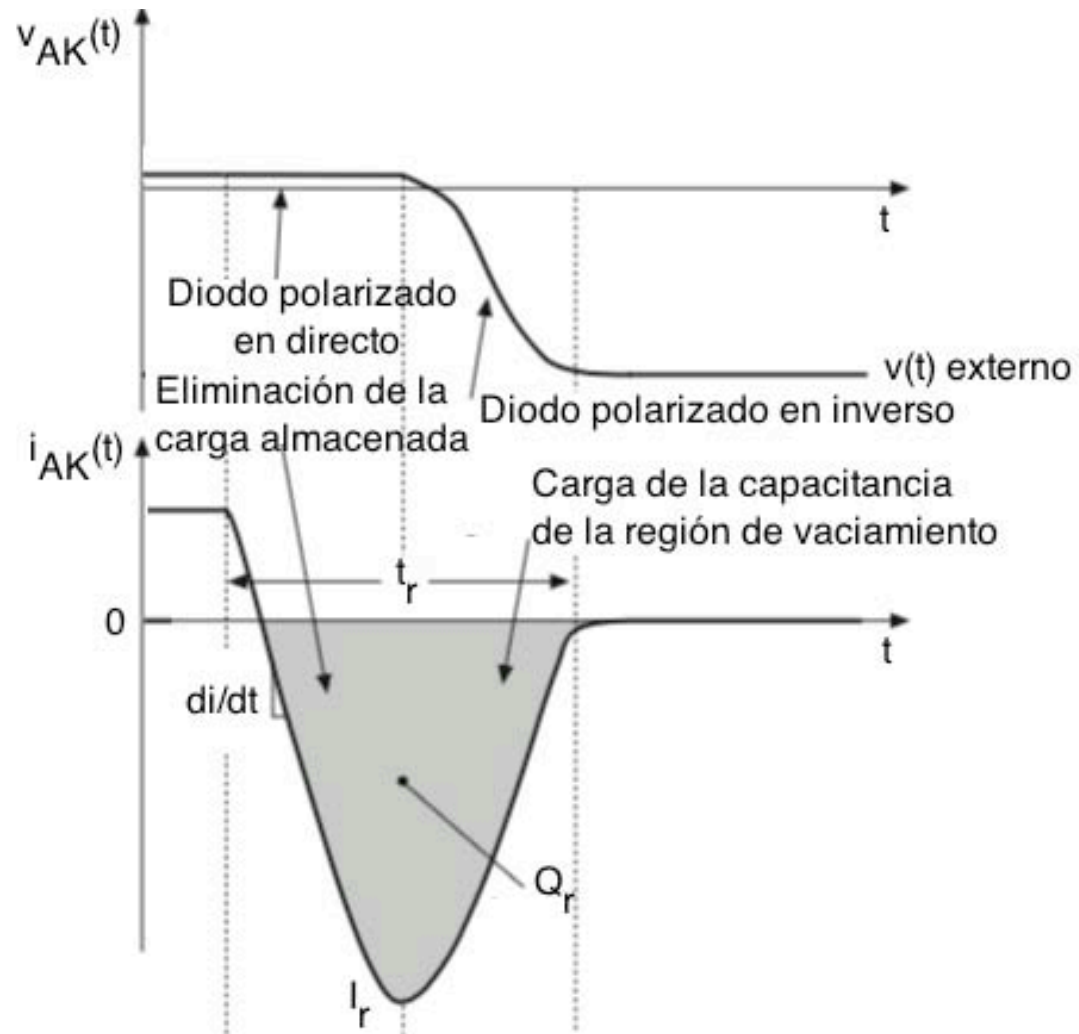
Si el di/dt es suficientemente rápido, la corriente externa se hace 0 antes de que los portadores en exceso en la región n- hayan sido removidos.

Mientras existen portadores en exceso en esta región el diodo permanece en conducción.

La salida del exceso de portadores se manifiesta como una corriente inversa cuya magnitud va creciendo hasta un valor pico a medida que el proceso se acelera.

Removidos la mayoría del exceso de portadores la tensión AK colapsa y tiende al valor de la tensión externa (ahora negativo).

El pulso de corriente inversa se va reduciendo mientras se acumulan los portadores en la capacitancia de la región de bloqueo que se esta re-organizando.



Evolución de la tensión y la corriente AK durante el proceso de apagado

El área sombreada en la carga es la cantidad de portadores, Q_r , que deben ser removidos por el pulso de corriente inversa para producir el apagado del diodo.

I_r es el valor pico del pulso de corriente inversa de apagado.

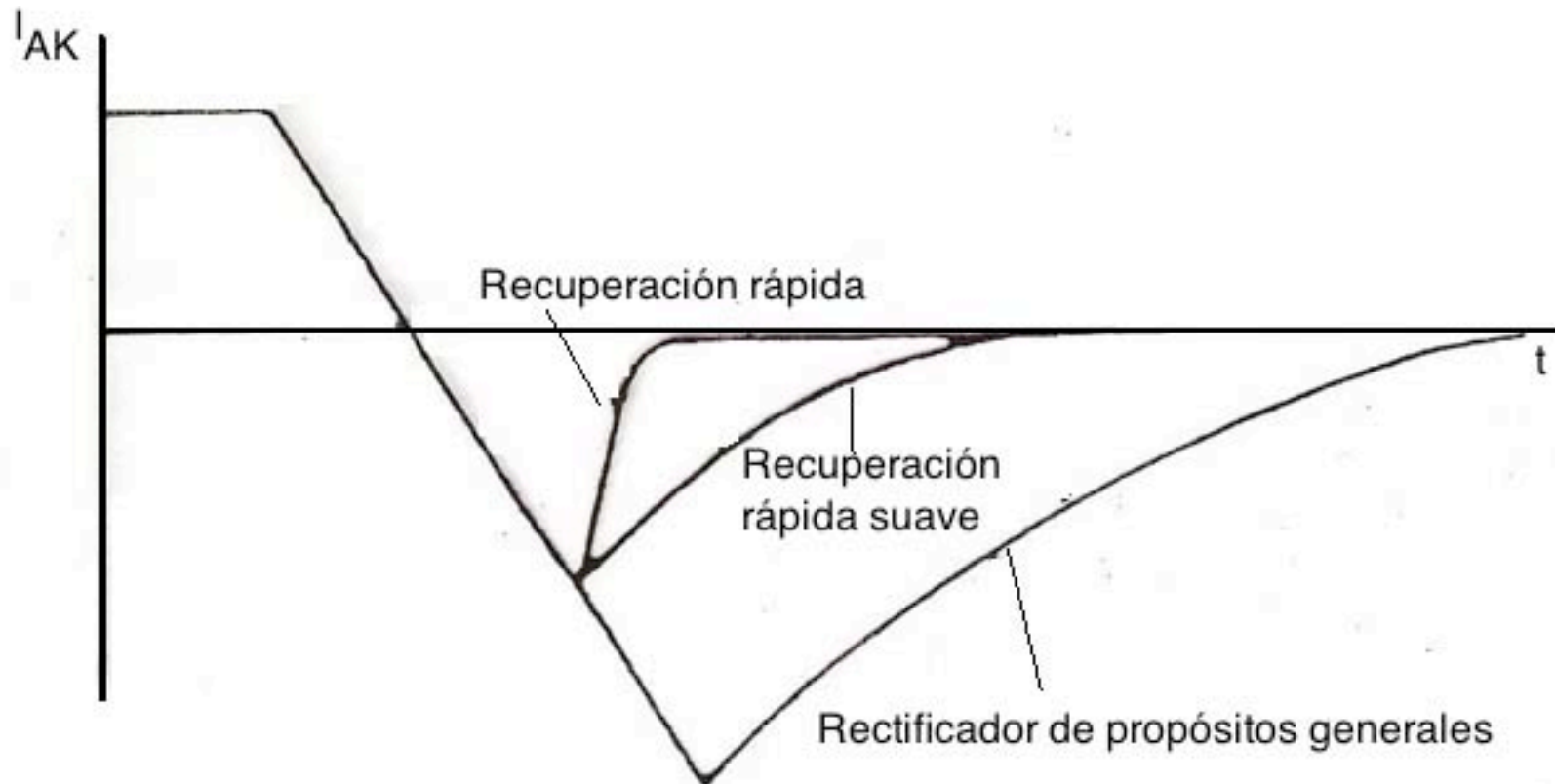
El proceso concluye cuando cesa la corriente inversa y se alcanza la condición estable de bloqueo.

Tipos de diodos P-I-N por sus características de recuperación inversa.

1.- De propósitos generales. Para aplicaciones a frecuencia de línea (hasta 400Hz), presentan tiempos de recuperación de centenares de microsegundos.

2.- Rápidos (fast recovery). Para aplicaciones a frecuencias de conmutación elevadas (más de 10 kHz), presentan tiempos de recuperación de microsegundos o menores.

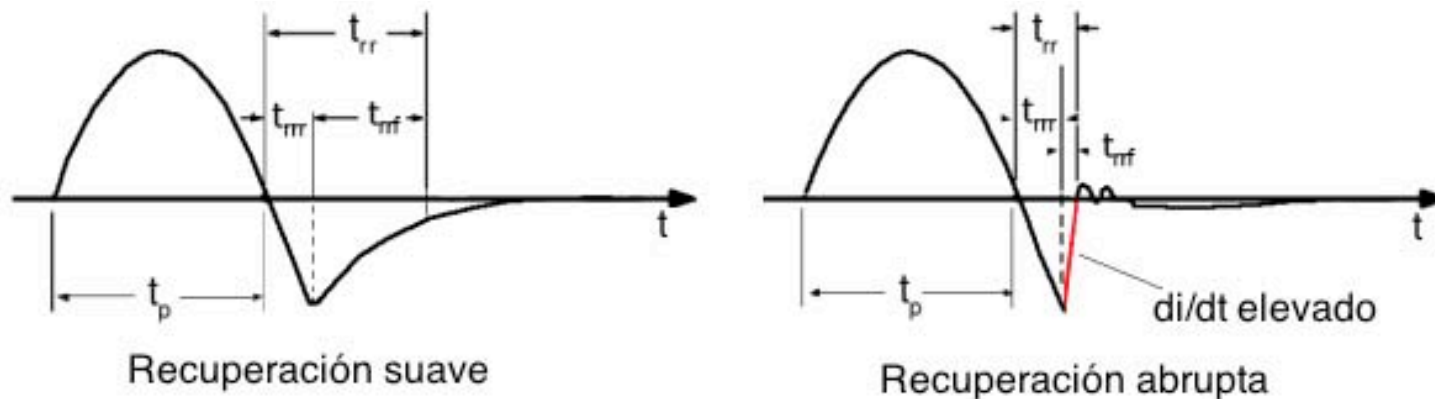
3.- Rápidos de recuperación suave (soft recovery). Para las mismas aplicaciones, pero con tiempos de recuperación de algunos microsegundos, reducen el di/dt reaplicado.



Comparación de las características de recuperación de los tres tipos de diodos de Si ofrecidos en el mercado: propósitos generales, rápidos y rápidos de recuperación suave.

“Factor de suavidad”

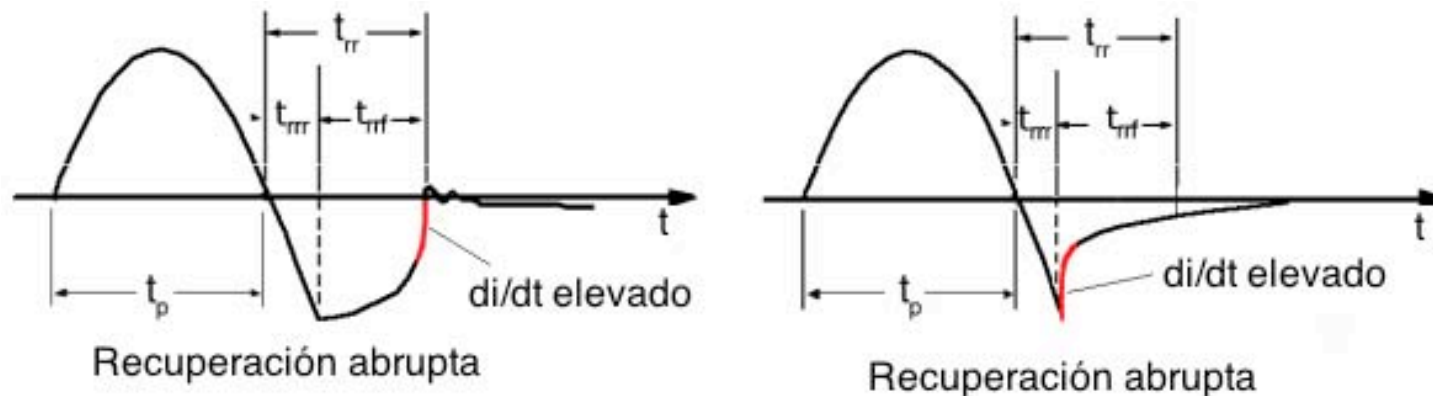
En primera aproximación para comparar dos diodos y determinar cual es que tienen la respuesta mas suave se puede considerar la relación entre los tiempos de subida y de bajada del pulso de recuperación inversa.



Comparación entre diodos de recuperación suave y recuperación abrupta (del estándar JEDEC N° JESD2822b.01)

Según este criterio los diodos de recuperación suave tendría una relación del orden de $\frac{1}{3}$ y los de recuperación rápida del orden de $\frac{3}{1}$.

Sin embargo este criterio no es totalmente seguro, ya que es posible encontrar diodos en los cuales la curva no es estándar por lo que el resultado de solo comparar los cocientes de los tiempos de subida y bajada del pulso de recuperación inversa lleva a un error.

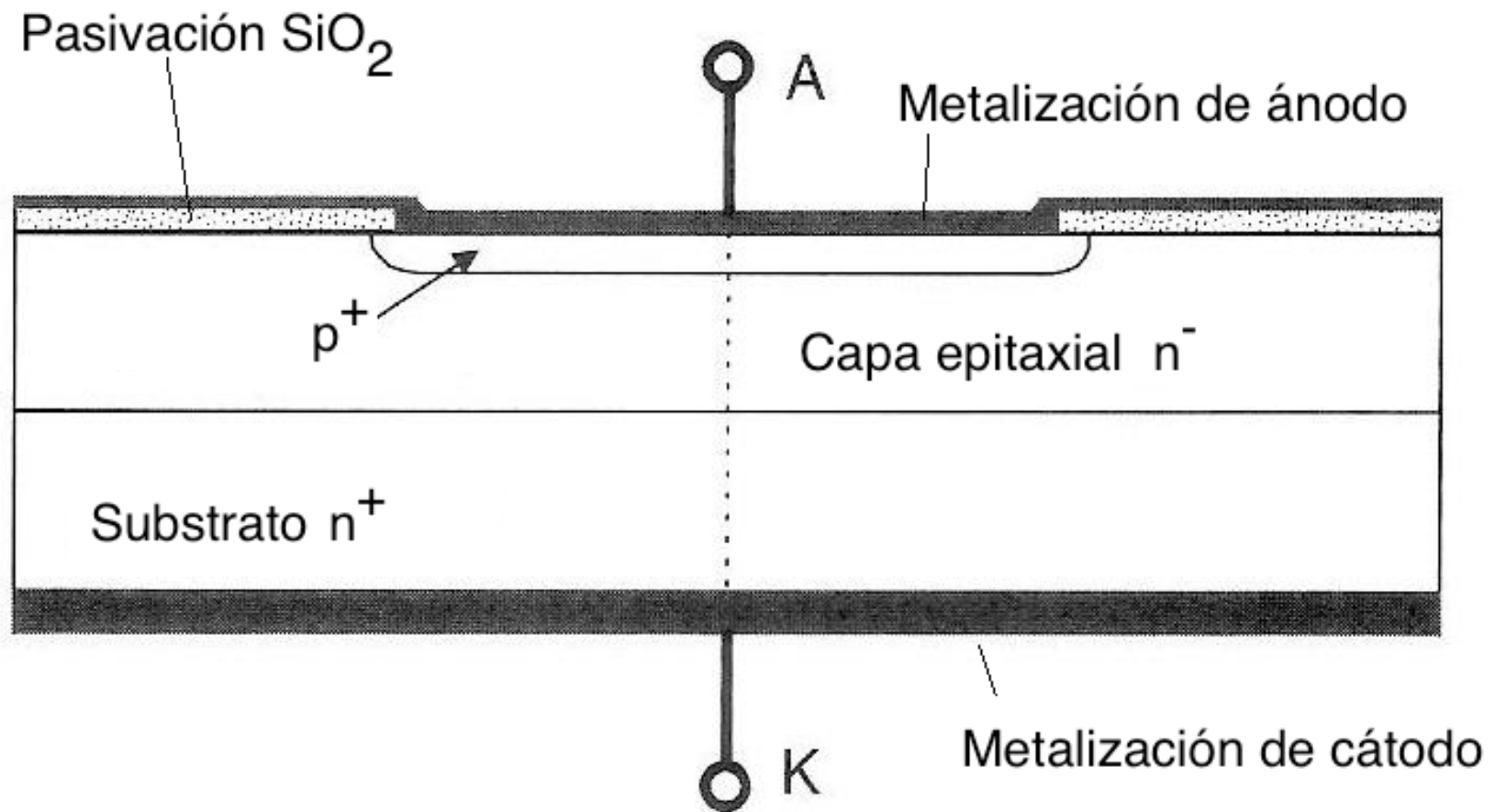


Comparación entre recuperación abrupta típica (derecha) y atípica (izquierda) (del estándar JEDEC N° JESD2822b.01)

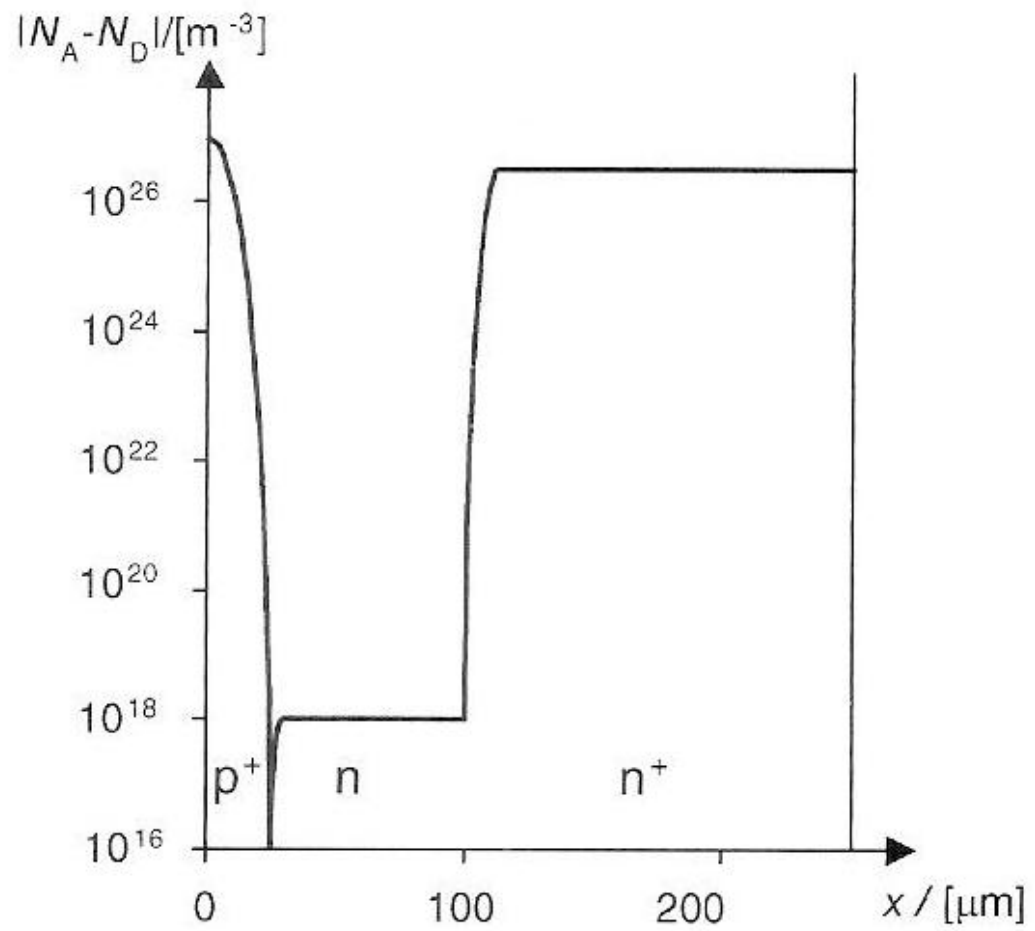
Para evitar este error, de acuerdo con el estándar JEDEC (Joint Electron Device Engineering Council) JESD282B.01 el factor de suavidad en recuperación inversa (RRSF “reverse recovery softness factor”) se define como el cociente entre los valores máximos absolutos de la derivada de la corriente A_K durante el intervalo de crecimiento de la corriente de recuperación inversa y durante el intervalo de reducción de dicha corriente; de acuerdo con esta definición, se consideran diodos rápidos de recuperación suave aquellos cuya relación es mayor a 0,5.

Algunas compañías han introducido la categoría recuperación ultra rápida (ultra fast recovery) para indicar que sus diodos son mucho más rápidos que los comunes en el mercado de "recuperación rápida" (fast recovery).

La estructura del diodo rápido también es P-I-N, pero difiere de la de los diodos P-I-N de propósitos generales en que la zona n- es más estrecha, y además se incluyen centros de recombinación por dopado con oro para elevar la velocidad de recombinación durante el proceso de apagado.

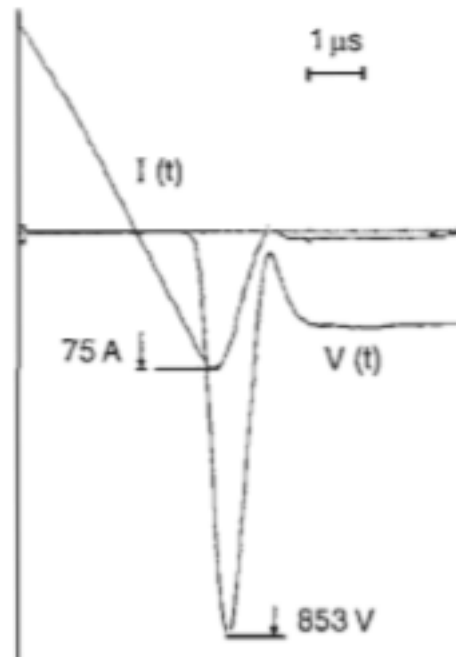


Corte de un diodo rápido de crecimiento epitaxial.



Perfil de dopado de un diodo rápido de crecimiento epitaxial.

La caída muy rápida de la corriente inversa puede producir problemas graves de sobre tensión inducida cuando, como es usual, la impedancia del circuito tiene un componente inductivo importante.



Pico de corriente de recuperación: 75A
Sobretensión de apagado: 853V

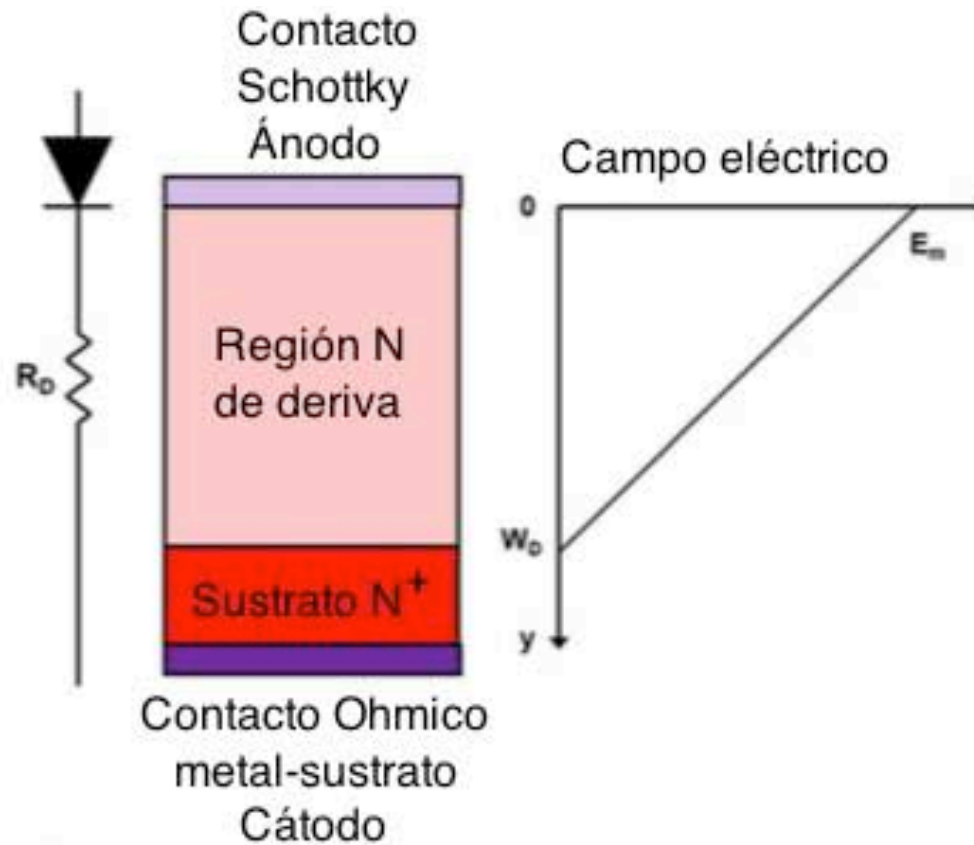
En el estado actual de la tecnología las técnicas que permiten reducir el tiempo de recuperación en los diodos P-I-N de Si producen un incremento en las pérdidas en conducción y en la corriente de fuga, por lo que en igualdad de condiciones, las pérdidas en conducción de los diodos rápidos son mayores que en los diodos de propósitos generales.

Diodos Schottky de Si de potencia.

Los diodos Schottky son dispositivos rectificadores que operan en base a una juntura rectificadora metal-semiconductor (juntura Schottky).



Símbolo circuitual del diodo Schottky.

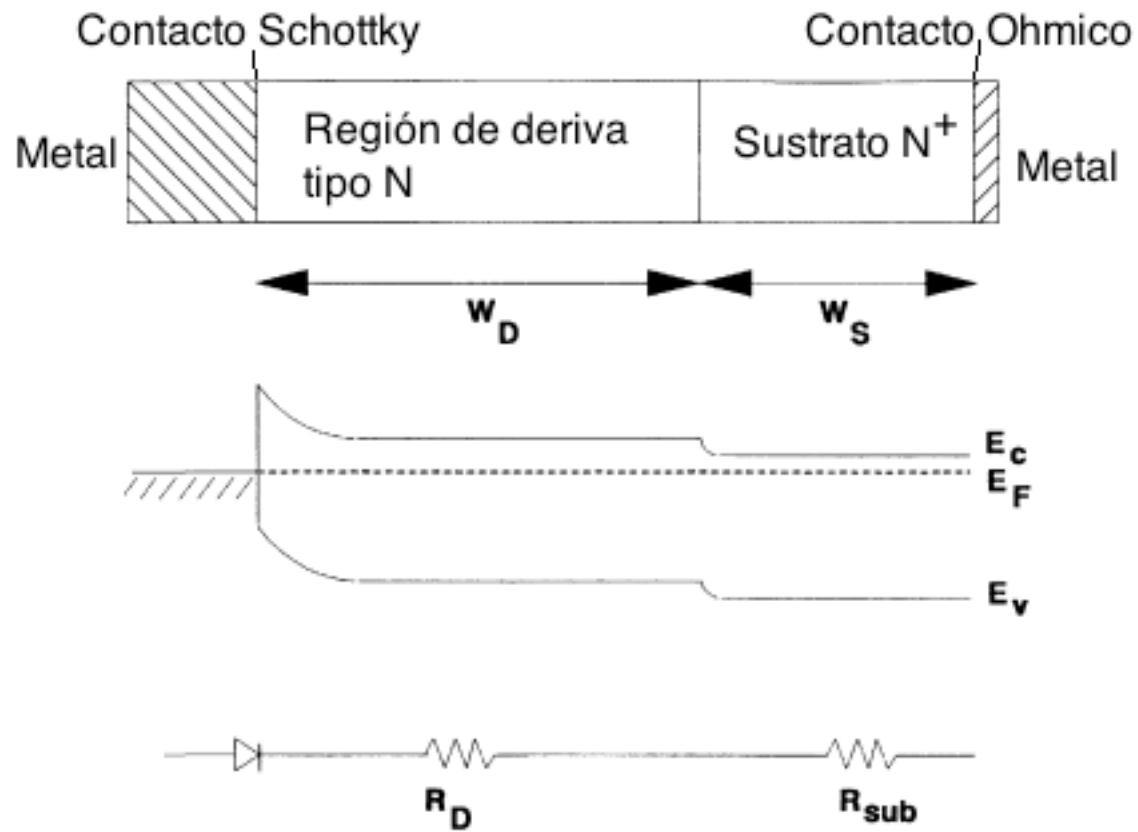


Diodo Schottky.

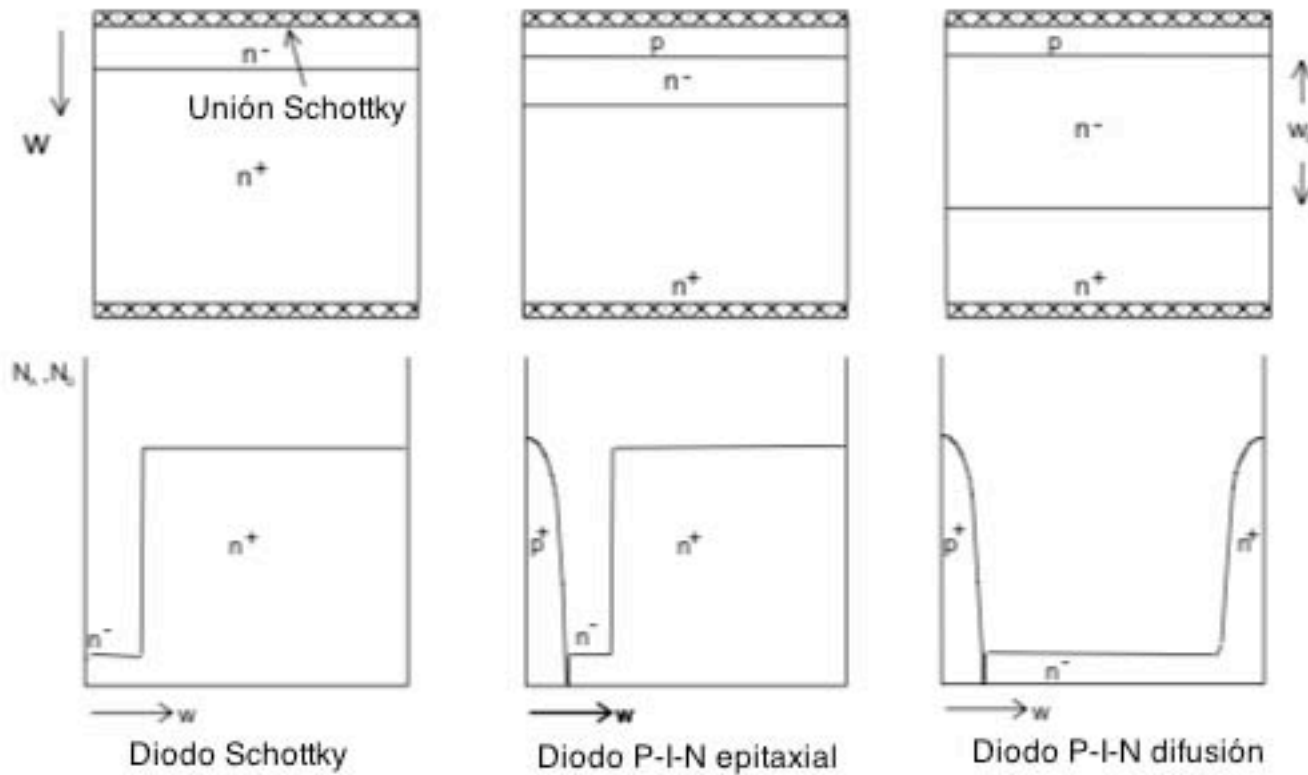
Estructura ideal del diodo Schottky (centro).

Perfil de la distribución del campo eléctrico en el cristal (derecha).

Equivalente circuital (izquierda).

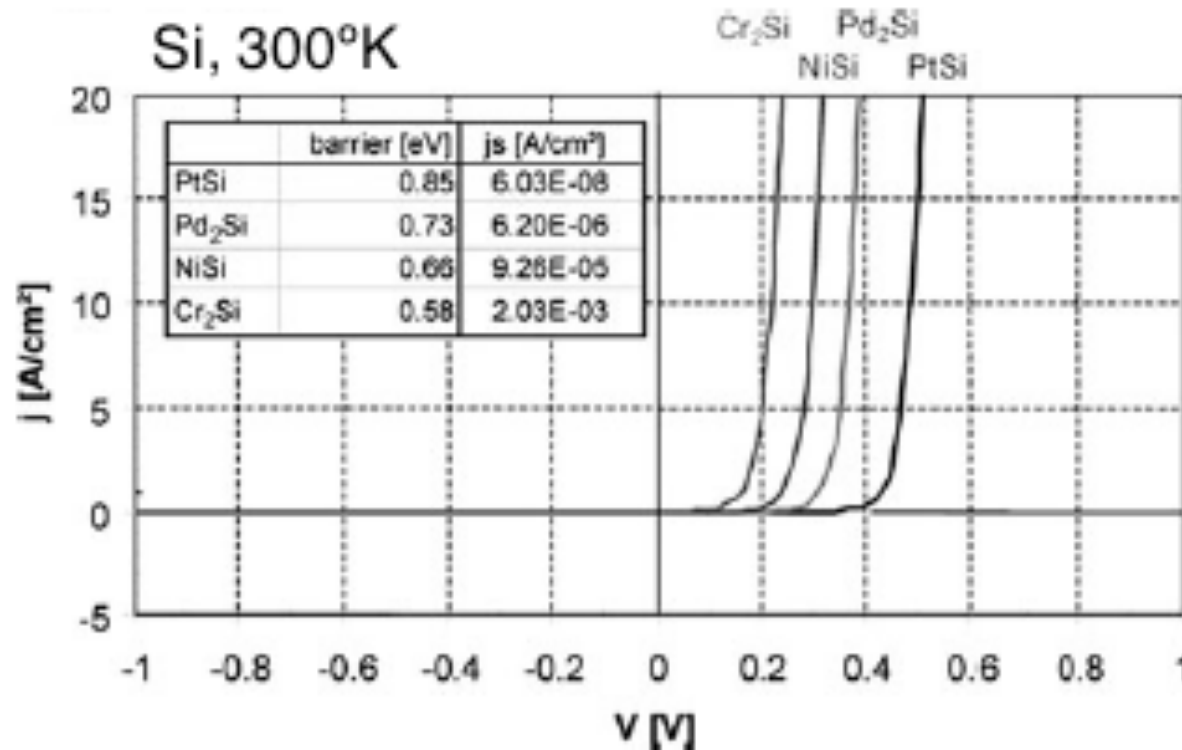


Diodo Schottky (arriba), perfil de dopado (centro) y circuito equivalente para determinar las pérdidas (abajo).

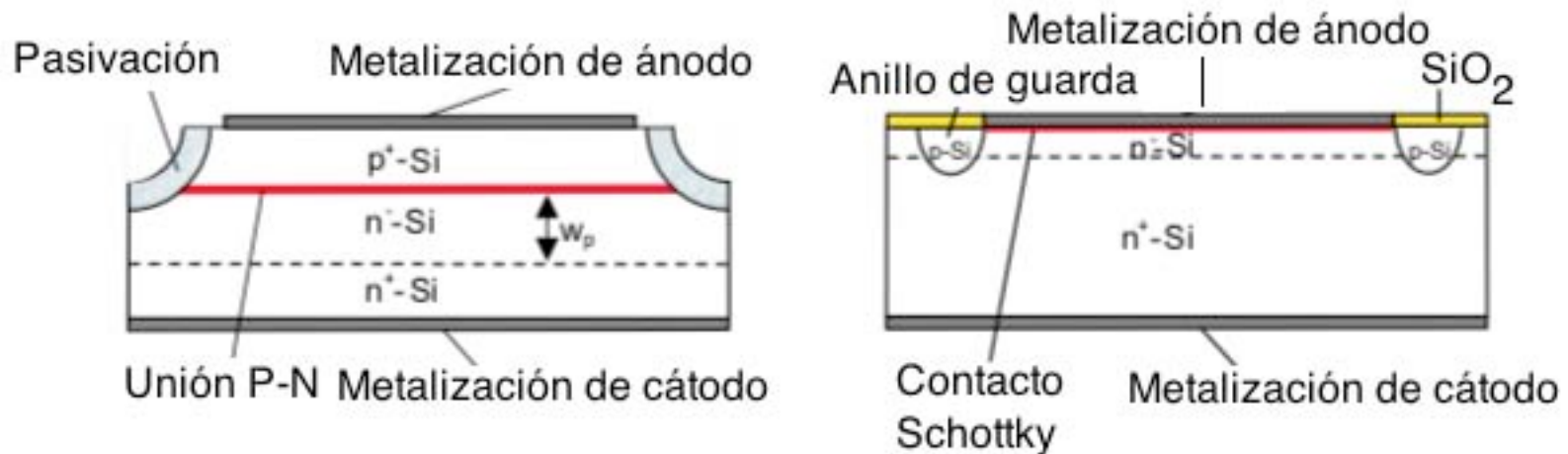


Comparación entre las estructuras (arriba) y los perfiles de dopado (abajo) del diodo Schottky y los dos tipos de diodos P-I-N.

La tensión directa en conducción es una función del tipo de metal usado en la juntura Schottky.

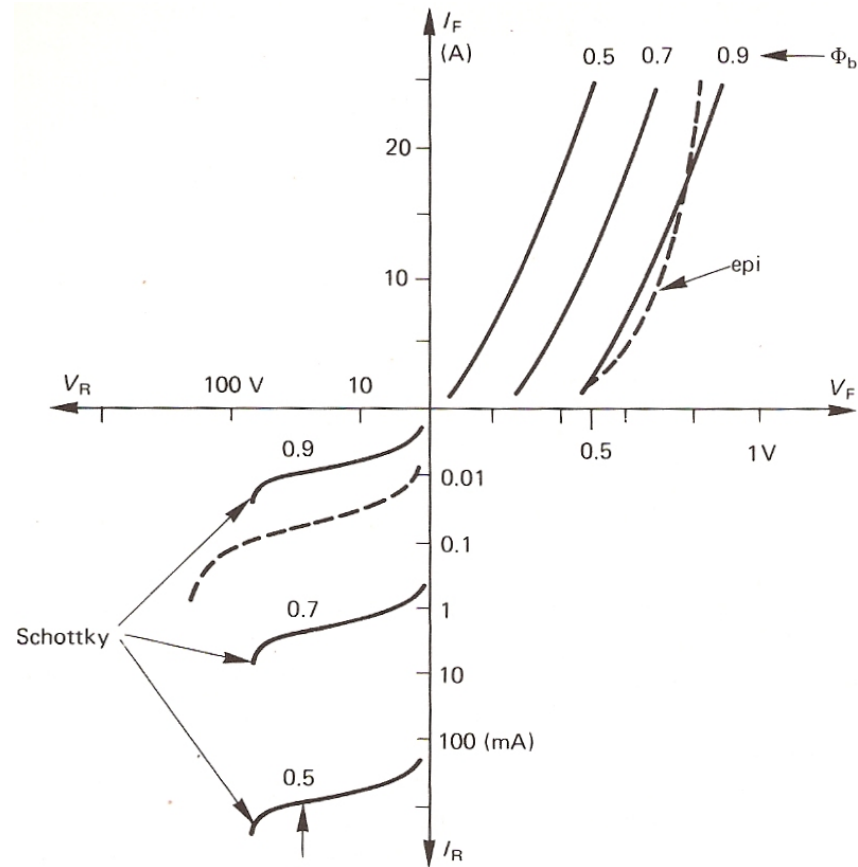


Tensión en conducción directa, diodos Schottky de Si con diferentes metales en la unión Schottky.



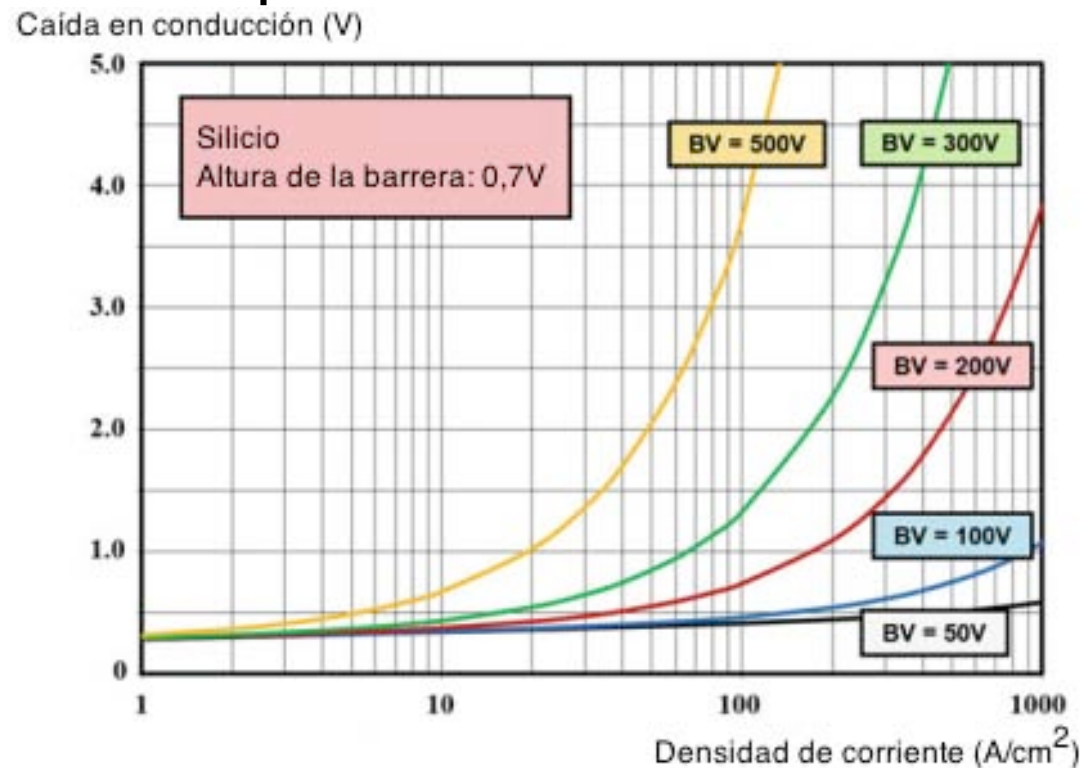
Comparación entre la estructura de un diodo P-I-N y uno Schottky con similar capacidad de corriente.

En general para los diodos Schottky de Si se cumple que, en igualdad de corriente directa, la caída en conducción es menor que la caída en un diodo P-I-N, para diodos con tensión de bloqueo inversa baja.



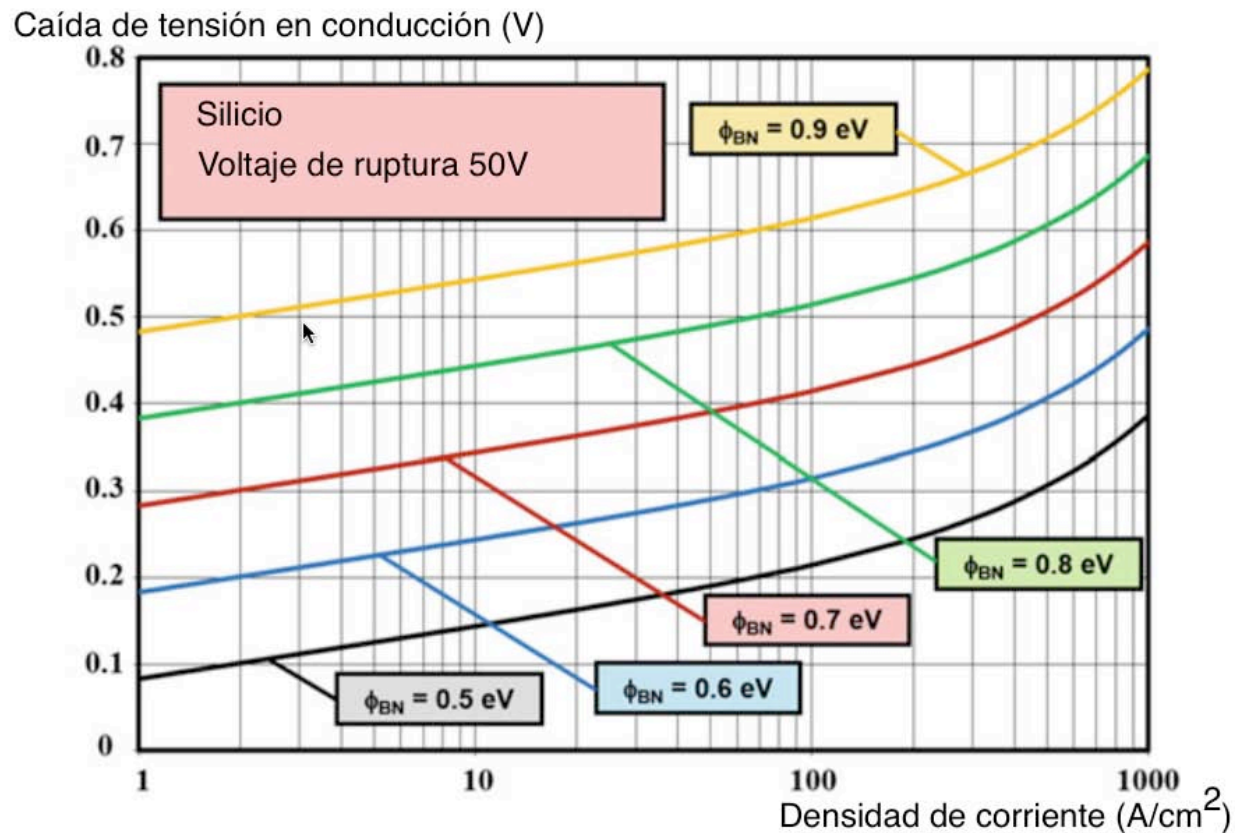
Comparación de las características de tres diodos Schottky de Si (ánodos de diferentes metales) con un diodo P-I-N de potencia típico de capacidad comparable.

En los diodos Schottky de Si la caída en conducción aumenta al aumentar la tensión de bloqueo inversa, lo que hace que no sean de interés para tensiones superiores a unos 100V.



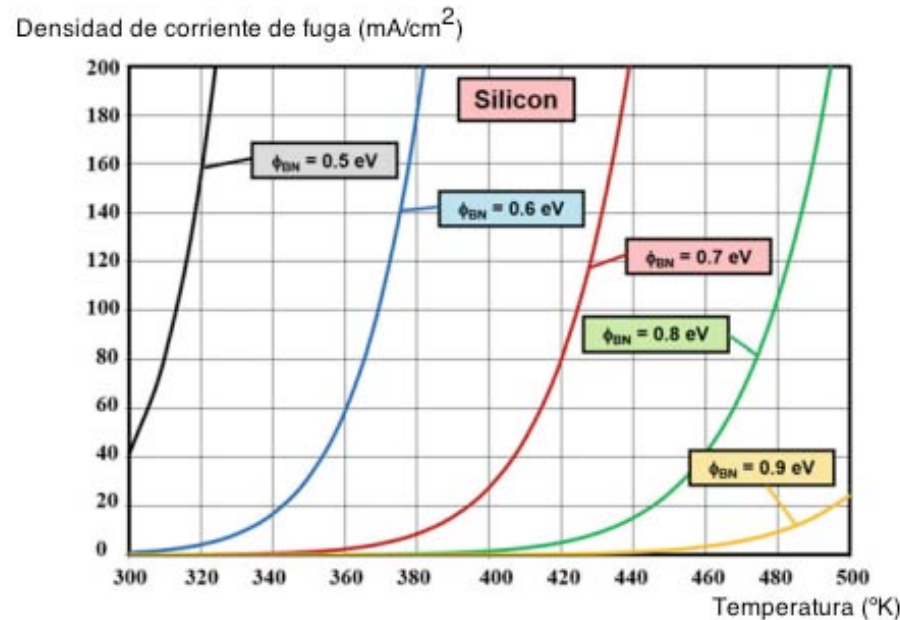
Caída en conducción vs. Densidad de corriente para diodos Schottky de 5 tensiones de bloqueo.

Este aumento ocurre cualquiera que sea la altura de la barrera Schottky (Φ_{BN}), que es a su vez función de la energía necesaria para sacar un electrón del nivel de Fermi del metal (la “función de trabajo”, Φ_m , del metal).



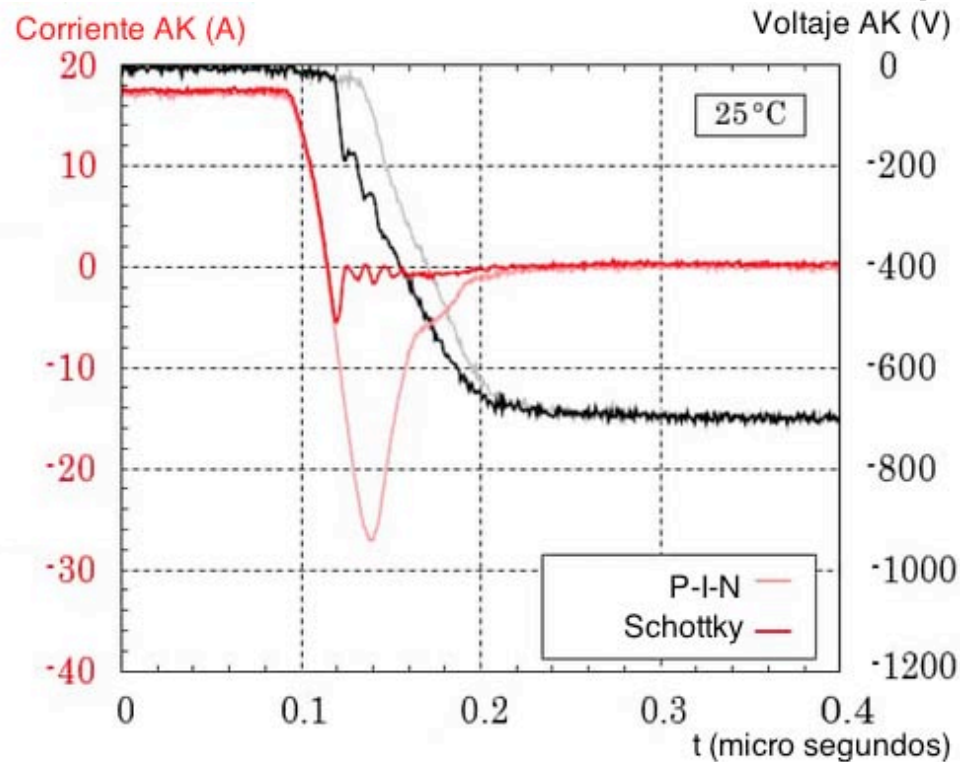
La temperatura de trabajo es superior a la soportada por los diodos P-I-N, con un mínimo de 125°C (diodos con ánodo de Cromo) a 175°C (diodos con ánodo de Platino).

La corriente de fuga depende de la altura de la barrera Schottky (Φ_{BN}), y crece al aumentar la temperatura.



Relación densidad de corriente de fuga vs temperatura de juntura para diversas alturas de la barrera Schottky

Como solo intervienen portadores mayoritarios, la corriente inversa es prácticamente nula, lo que los hace dispositivos ideales para aplicaciones de conmutación a altas frecuencias (convertidores DC/DC y DC/AC).



Comparación entre las conmutaciones de apagado de un diodo rápido P-I-N y uno Schottky en el mismo circuito externo.

Resumen de características típicas de los tipos de diodos de Si disponibles en el mercado (I).

Tipo	Schottky	Ultra rápido	Suave	Rápido	Propósitos generales
V_R (V)	15-200	50-1000	50-600	50-600	50-1000
V_F (V)	0,39-1,0	0,9-1,8	1,3-1,8	1,2-1,3	1,0-1,1
t_{rr} (ns)	<10	25-150	45-120	200	1000

Resumen de características máximas de los tipos de diodos de Si disponibles en el mercado (II).

Tipo	Tensión de ruptura máxima (V)	Corriente máxima (A)	Caída en conducción (V)	Velocidad de conmutación
Propósito general	5k	10k	0,7-2,5	25μs
Rápidos	3k	2k	0,7-1,5	<5μs
Schottky	100	300	0,2-0,9	30ns

Comparación de las características de los diodos P-I-N y Schottky de Si.

Mecanismo de conducción	Portadores mayoritarios	Portadores mayoritarios y minoritarios.
Corriente inversa	Resultado de portadores mayoritarios que superan la barrera de potencia. Menos dependiente de la temperatura que en la unión PN estándar	Resultado de la difusión de portadores minoritarios a través de la zona de vaciamiento. Muy dependiente de la temperatura.

Caída de tensión en conducción directa	Pequeña, del orden de 0,2V	Comparativamente mayor, supera los 0,7V.
Velocidad de conmutación	Rápida, como resultado de la conducción por portadores mayoritarios no se requiere recombinación, entre 100ps y decenas de ns	Comparativamente mucho mas larga, limitada por la recombinación de los portadores minoritarios inyectados

En general las condiciones en las que es preferible emplear diodos Schottky de Si en vez de diodos rápidos P-I-N de Si son las siguientes:

- 1.- La tensión inversa es relativamente baja.
- 2.- Se puede tolerar un nivel de corriente de fuga inversa relativamente alto y las pérdidas asociadas con el mismo.
- 3.- Se tiene asegurada la capacidad de disipar el calor generado para evitar la corrida térmica de los diodos.

Consideraciones generales sobre la aplicación de diodos de Si en distintas áreas de la Electrónica de Potencia.

- 1.-En fuentes de alimentación conmutadas (SMPS: Switch Mode Power Supplies) de alto voltaje: Diodos P-I-N rápidos o ultra-rápidos con tiempo de recuperación inversa, t_{rr} , corto.
- 2.- En fuentes de alimentación conmutadas (SMPS: Switch Mode Power Supplies) de bajo voltaje: Diodos Schottky.
- 3.-Para circuitos de amortiguamiento de las transitorias en relés y bobinas de solenoides: Diodos P-I-N rápidos con tiempos de recuperación directa, t_{fr} , cortos.

4.- Diodos antiparalelos de conducción libre (“free-wheeling diodes”): Diodos P-I-N ultra-rápidos con tiempos de recuperación directa, t_{fr} , e inversa, t_{rr} , cortos.

5.- Diodos para protección contra conexión de polaridad invertida o para suma de corrientes de salida en fuentes de alimentación: Diodos P-I-N de propósitos generales si la tensión de operación es alta y diodos Schottky si es baja.

6.-Aplicaciones a frecuencia de línea (50-60Hz): Diodos P-I-N de propósitos generales.

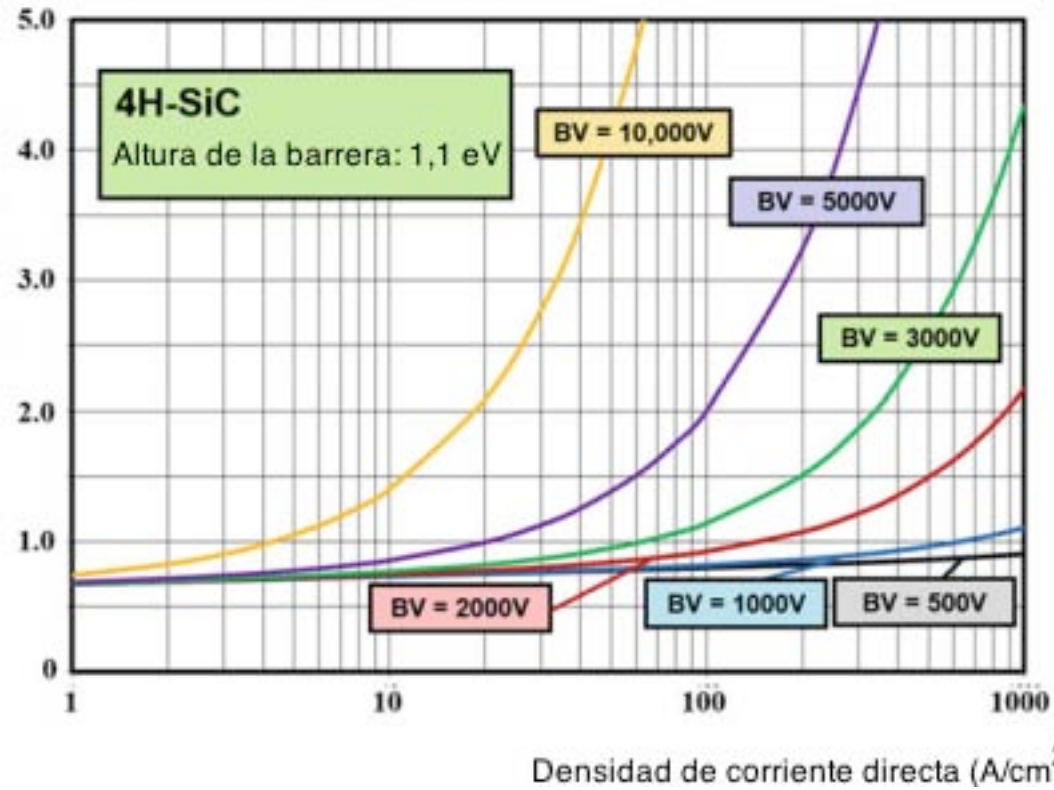
7.- Para alternadores automovilísticos, de turbinas eólicas o micro turbinas hidráulicas, y otras aplicaciones trifásicas: Diodos P-I-N de propósitos generales.

Diodos de carburo de Silicio (SiC)

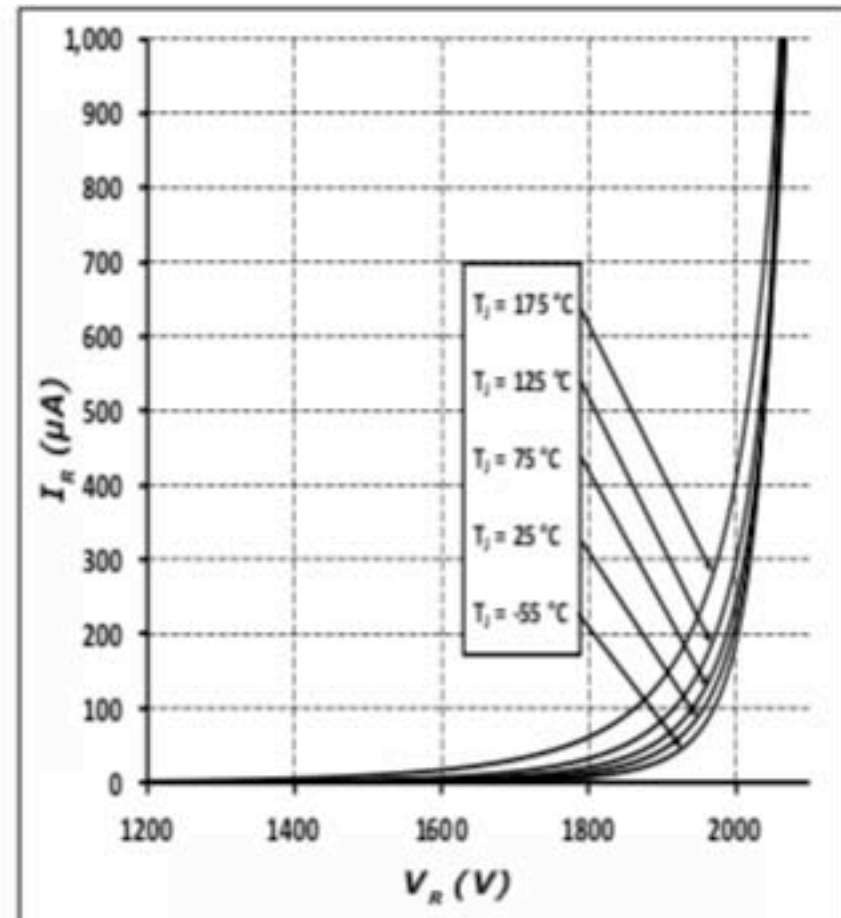
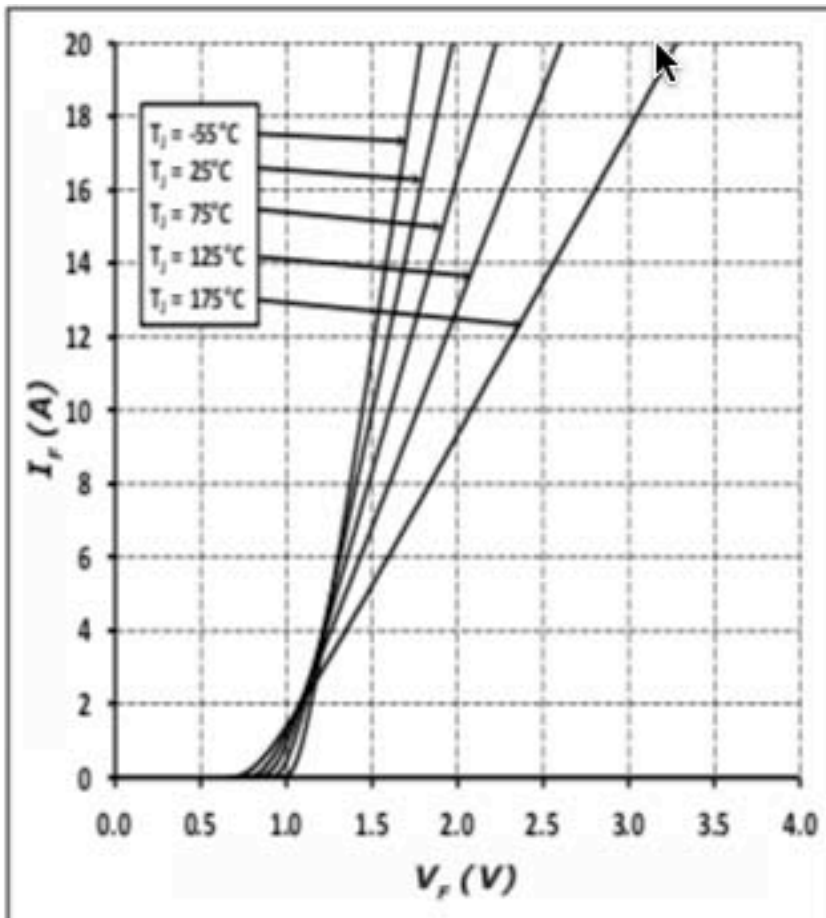
Los diodos de carburo de Silicio (SiC) son tipo Schottky, y en general ofrecen mejores características que los diodos Schottky de Si, aunque al ser una tecnología mas reciente, aún no ha alcanzado la capacidad de manejo de corriente de los mayores diodos de Si, y su precio es aún significativamente mayor.

En los diodos Schottky de SiC la tensión de bloqueo inversa es por lo menos equivalente a la obtenida en los diodos P-I-N, con un máximo reportado en 5.000V.

Caída de tensión en conducción directa (V)

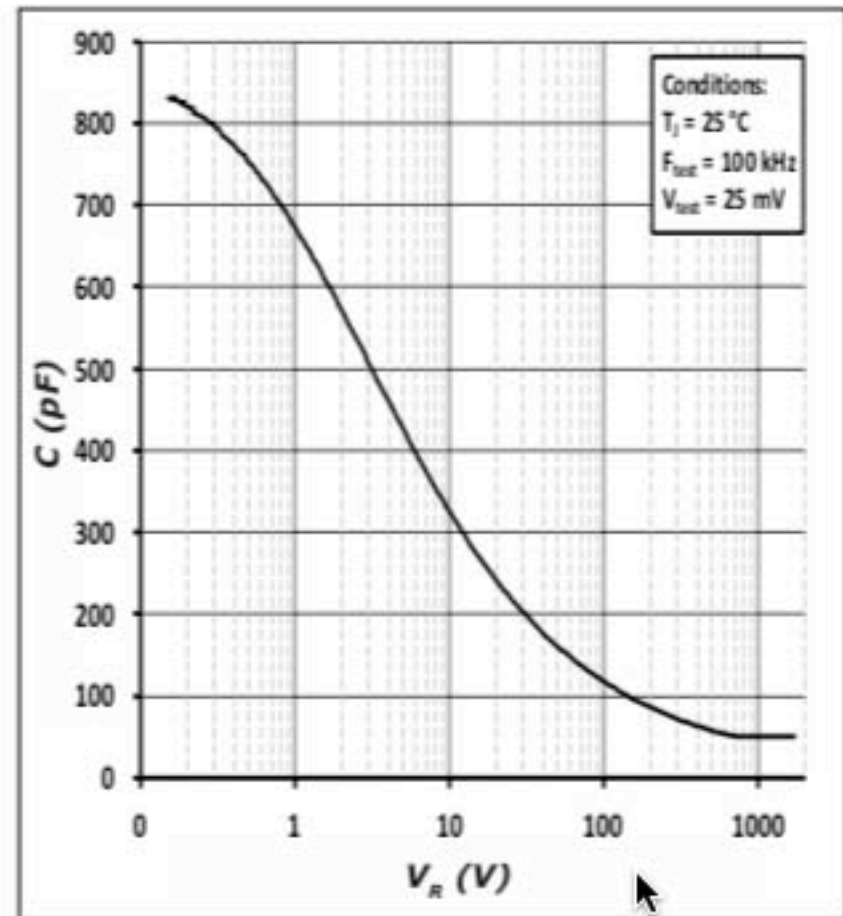
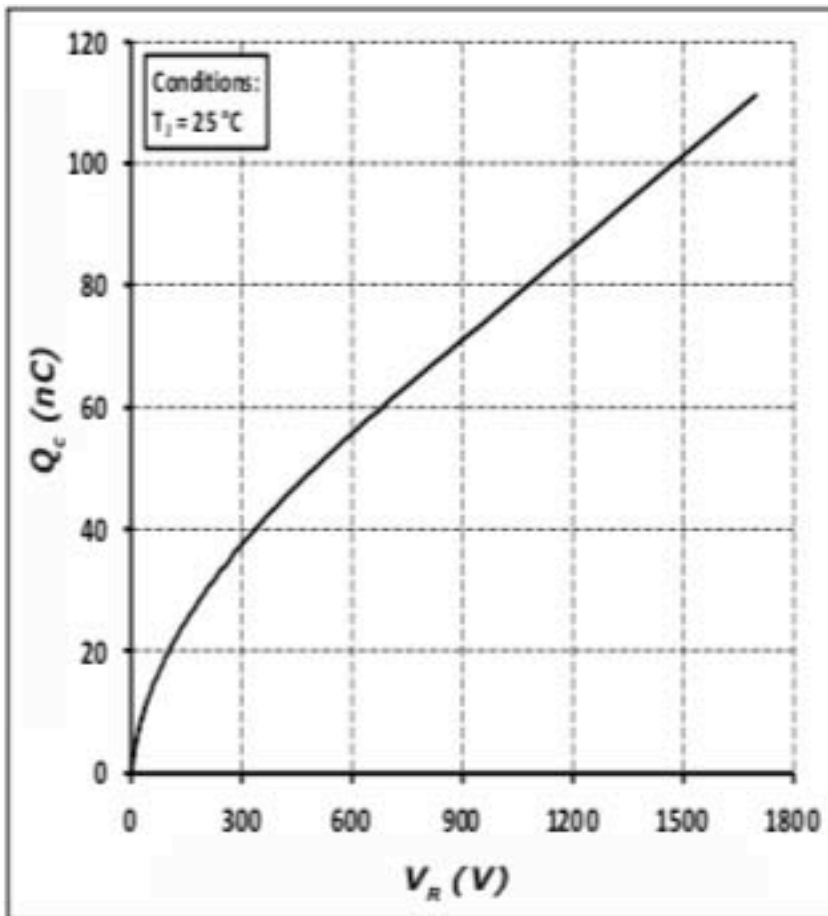


Aumento de la tensión en conducción vs. Densidad de corriente.

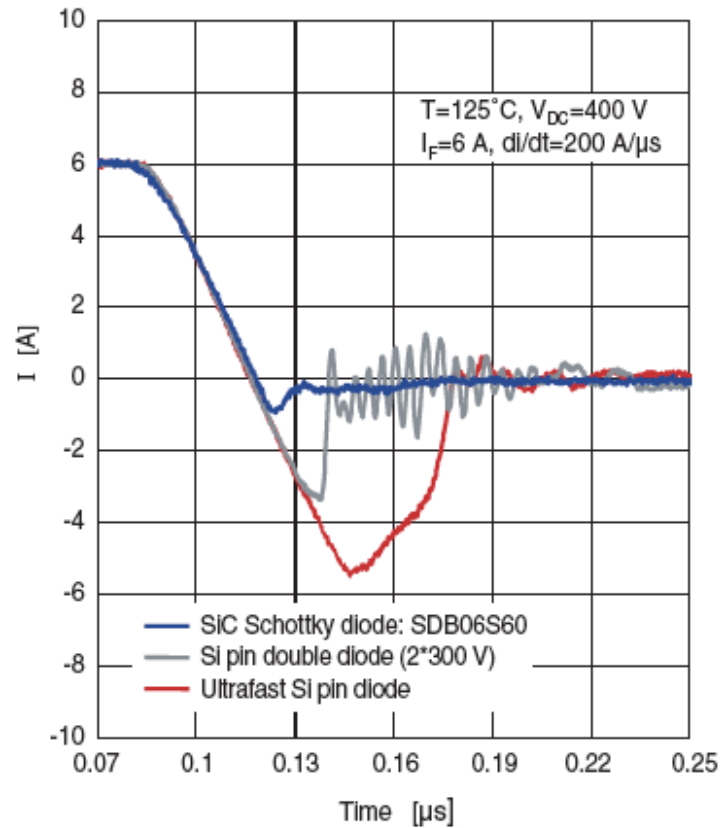


Características V/I en polarización directa (izquierda) y en bloqueo (derecha).

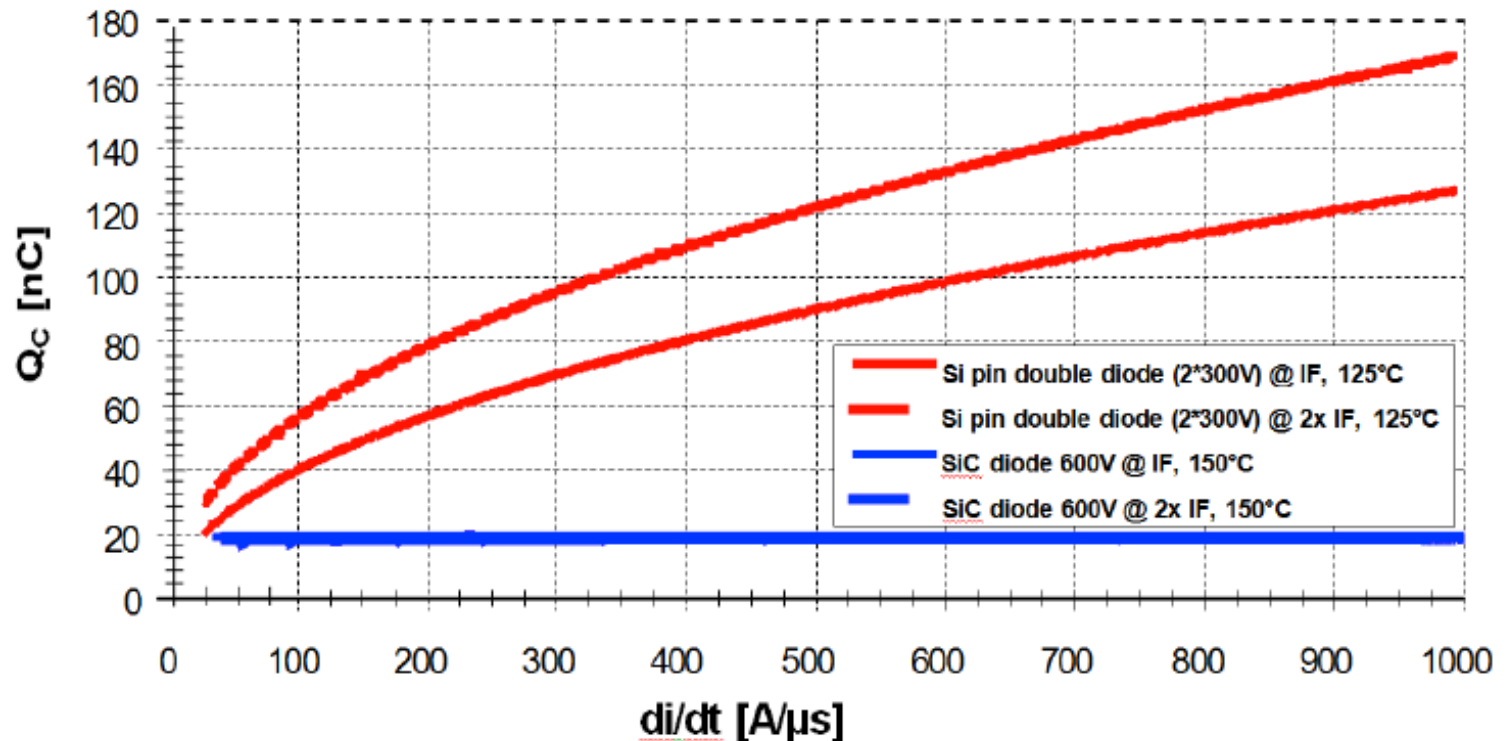
Diodo Schottky tipo SiC C5D10170H de CREE.



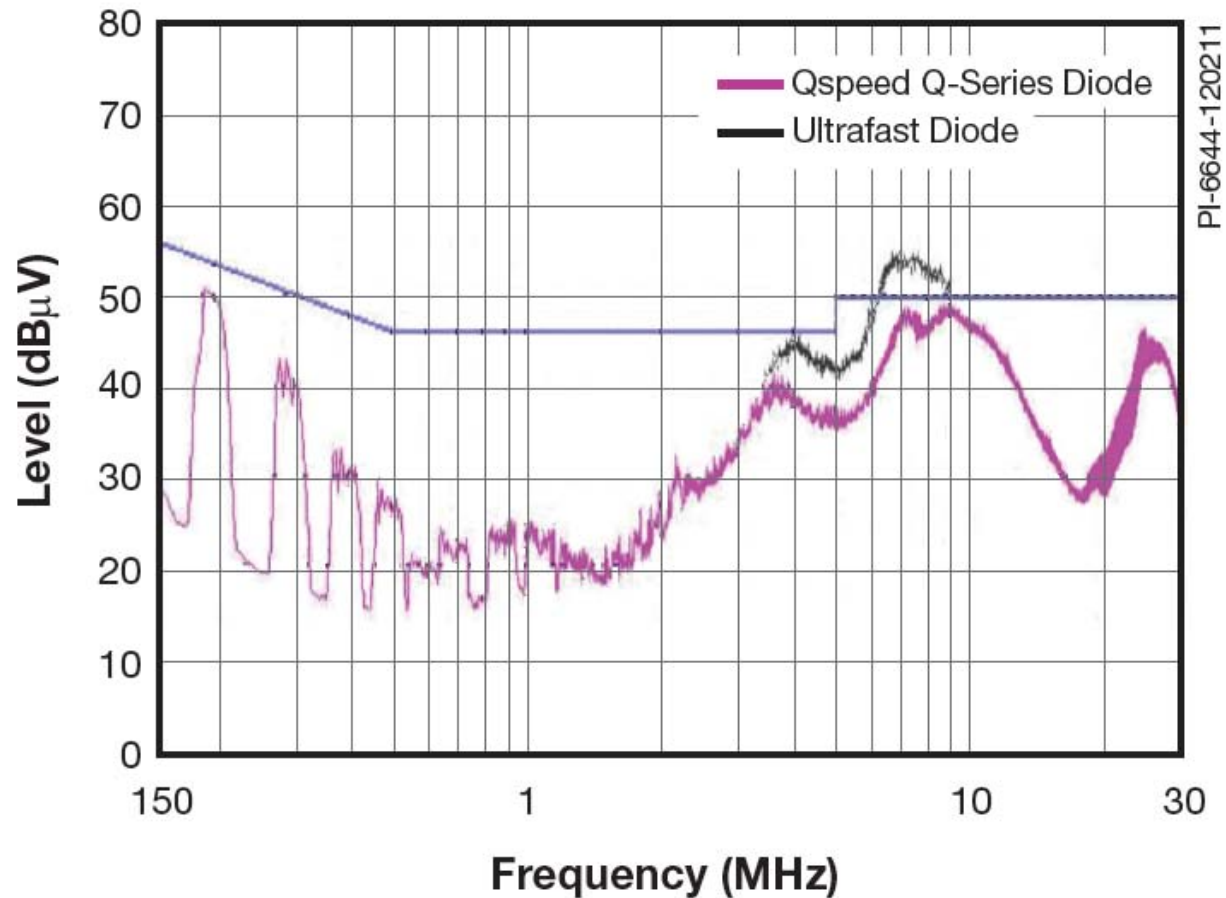
Carga recuperada en la conmutación de apagado vs tensión inversa (izquierda) y capacitancia equivalente vs tensión inversa (derecha).
 Diodo Schottky tipo SiC C5D10170H de CREE.



Comparación entre el apagado de un diodo SiC, uno "ultra-rápido" de Si y un arreglo serie de dos "ultra-rápidos" de Si (Infineon).



Comparación entre la carga atrapada de un diodo SiC, uno "ultra-rápido" de Si y un arreglo serie de dos "ultra-rápidos" de Si (Infineon).



PI-6644-120211

Comparación de la interferencia electromagnética emitida (EMI) durante las conmutación de apagado en un diodo SiC y un ultra-rápido de Si (Power Integrations).

En comparación con los diodos Schottky de Si, las principales características de los diodos Schottky de SiC son las siguientes:

- 1.-Tiempos de recuperación ultra-rápidos.
- 2.-Recuperación con características suaves.
- 3.-Baja tensión en conducción.
- 4.-Corriente de fuga baja.
- 5.-Corriente de recuperación directa e inversa esencialmente cero.
- 6.-Cumple con los requisitos de la norma AEC-Q101-Rev-C (Automotive Electronics Council), para operar a 175°C de temperatura de juntura.

Los beneficios de usar diodos Schottky de SiC como reemplazo de diodos de Si son:

- 1.-Mejora en la eficiencia del sistema operando a frecuencias de conmutación elevadas.
- 2.-Pérdidas de conmutación bajas.
- 3.-Ruido de conmutación (EMI) bajo.
- 4.-Sistemas de mayor confiabilidad, con densidad de potencia aumentada.
- 5.-Reducción en el tamaño de los componentes pasivos (inductancias, condensadores, disipadores de calor), menos componentes, tamaño reducido.

Áreas de aplicación actuales:

1.-Circuitos de corrección del factor de potencia (PFC).

2.-Diodos antiparalelo.

3.-Fuentes de alimentación conmutadas.

4.-Convertidores DCD/DC y DC/AC.

6.-Circuitos de ayuda a la conmutación (“snubbers”).

7.-Circuitos limitadores de tensión (circuitos “clamp”).