

Semiconductores. El diodo.

Nazario Félix González

n.felix@upm.es

Ángel García Pedrero

angelmario.garcia@upm.es

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Informáticos
Universidad Politécnica de Madrid

2021-2022



Escuela Técnica Superior de
Ingenieros Informáticos



POLITÉCNICA

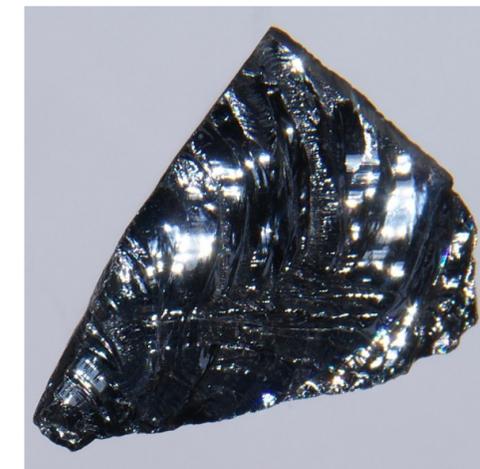
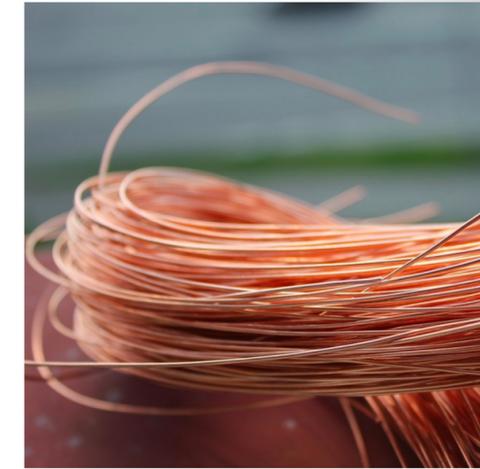
UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

Clasificación de los materiales

Según las características de conductividad, los materiales se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Conductor
- Aislantes
- Semiconductores

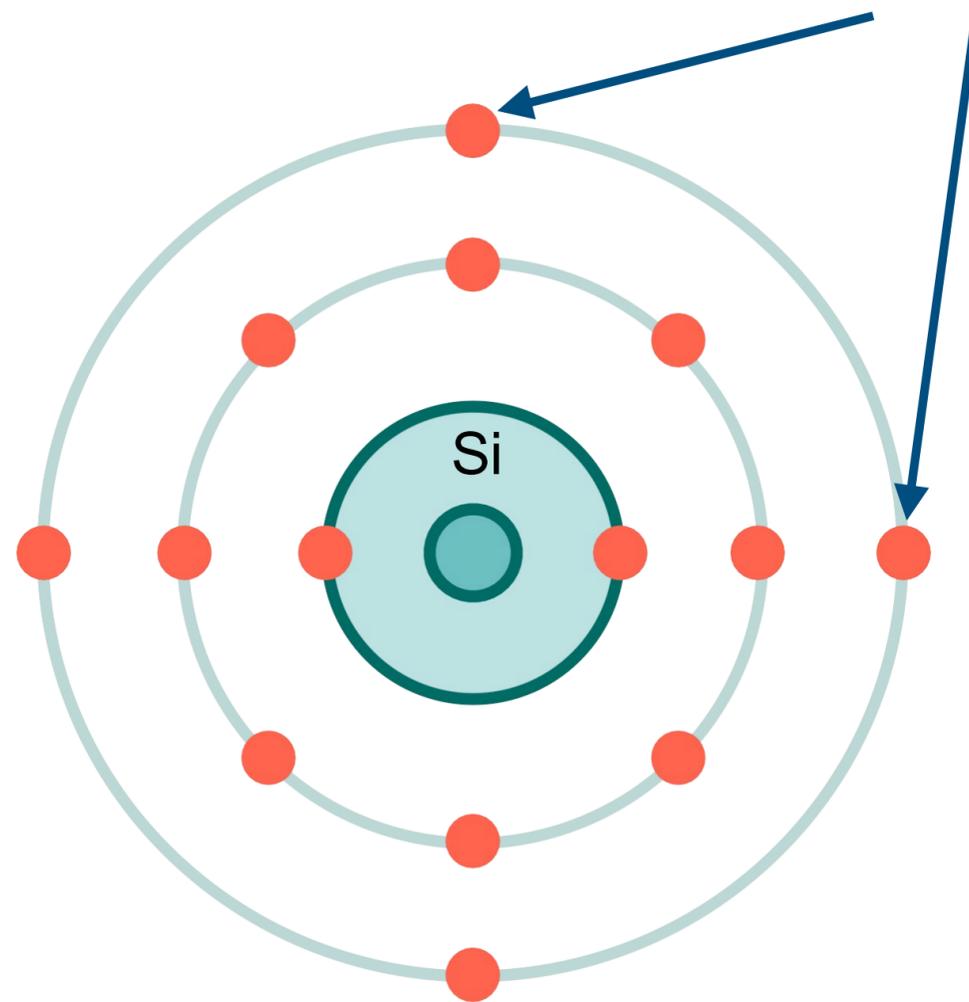
La clasificación de los materiales se justifica por las fuerzas de interacción que se establecen entre los átomos y los electrones más alejados de ellos.



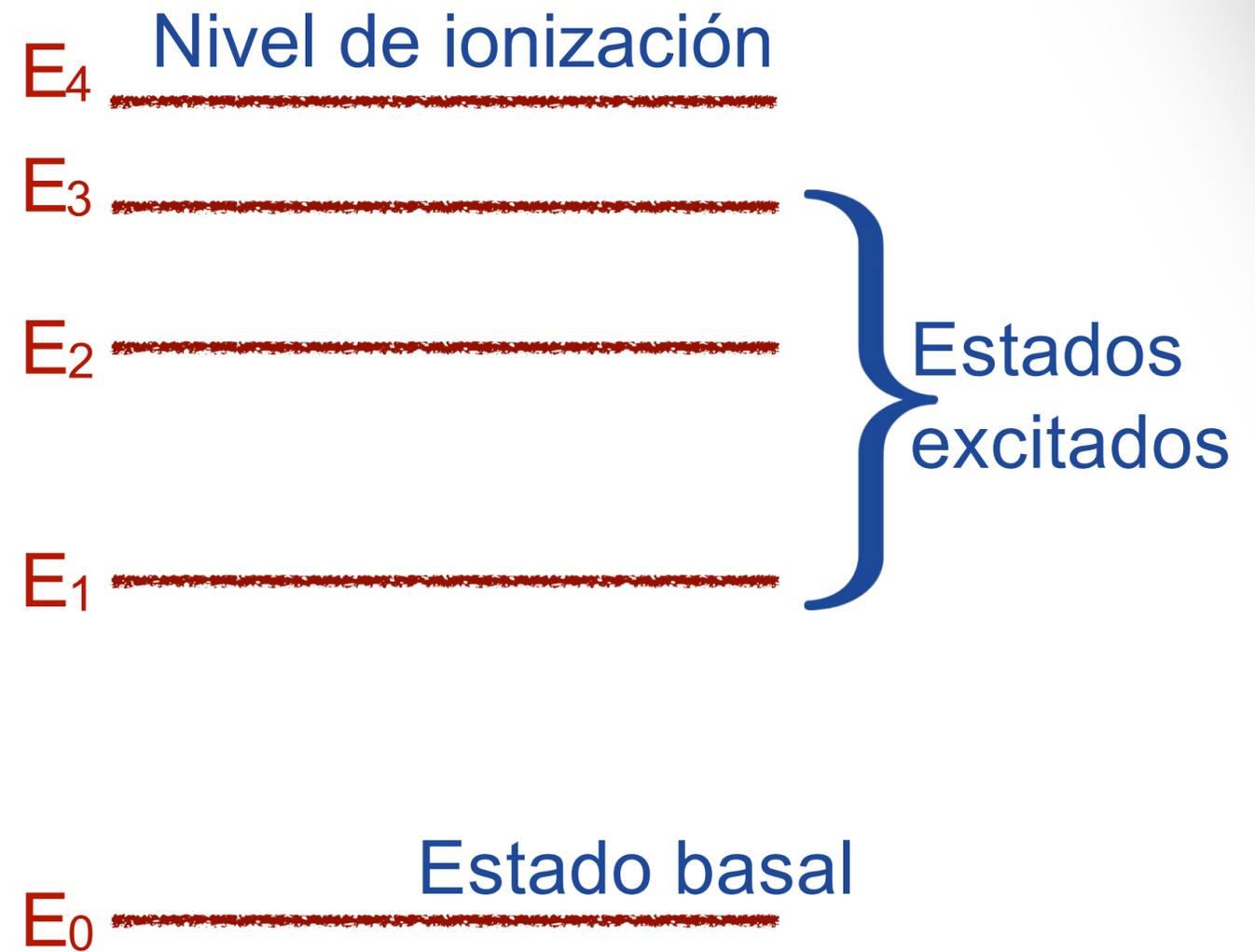
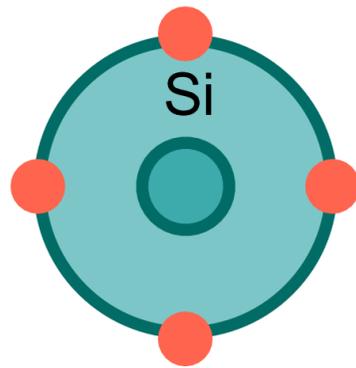
Teoría de bandas en semiconductores



Electrones de valencia

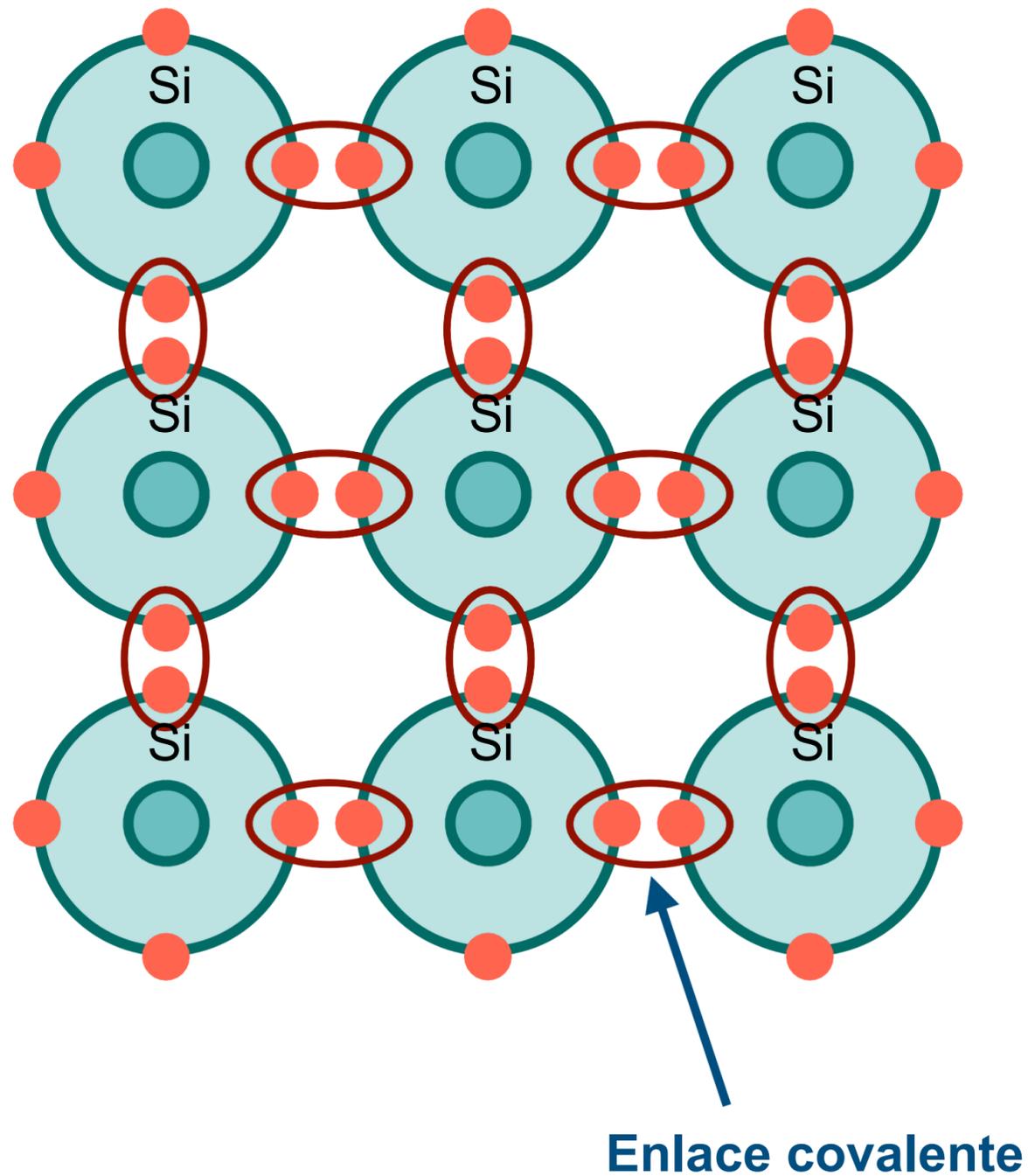


Bandas de energía discretas



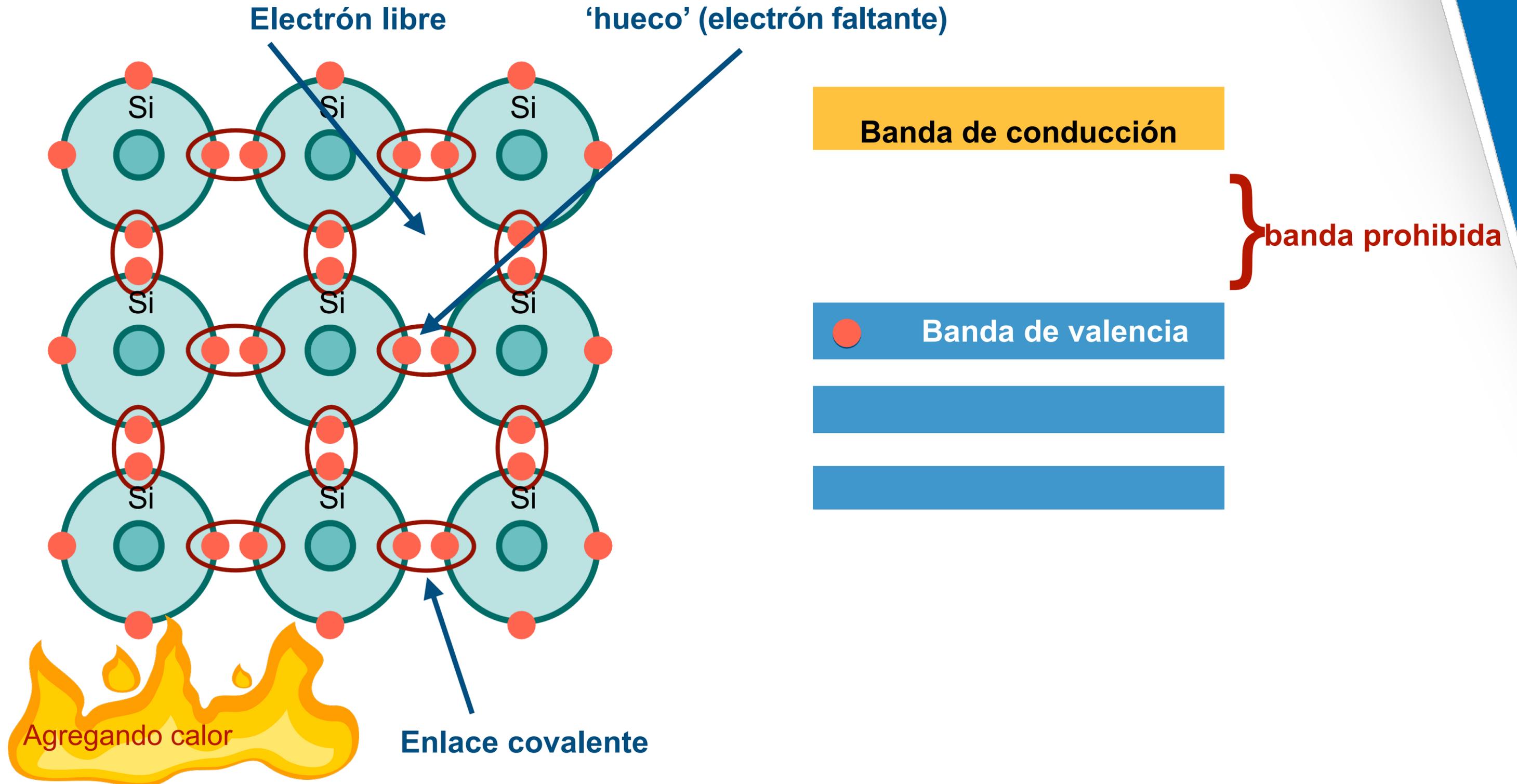


Bandas de energía discreta





Bandas de energía discreta



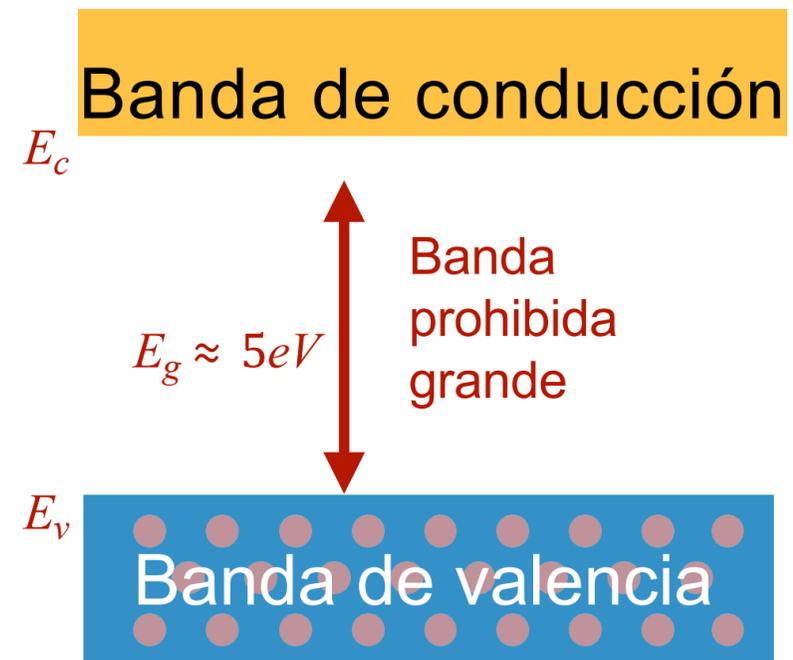


Bandas de energía por materiales

Conductor



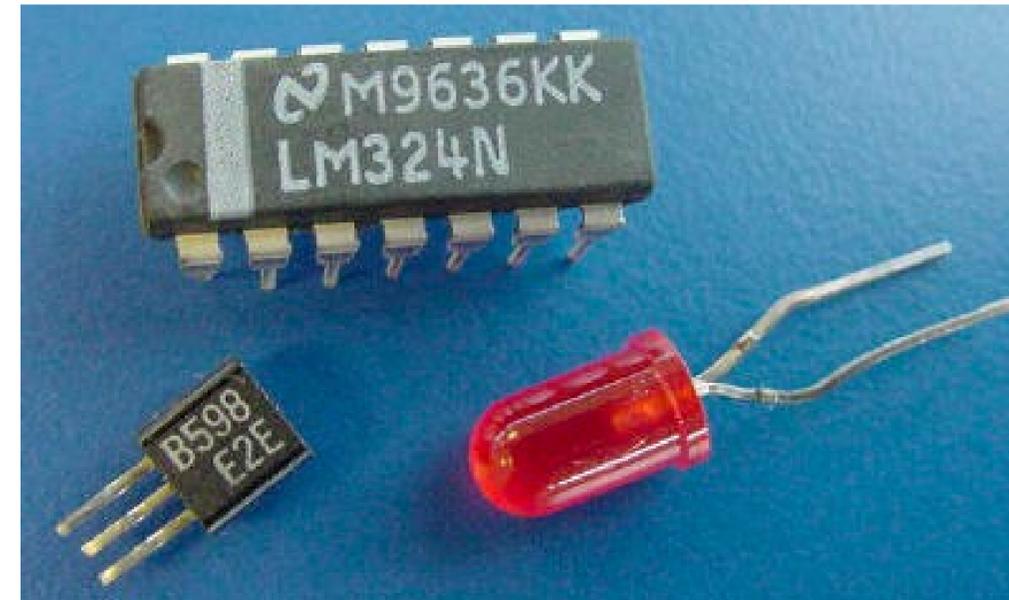
Aislante



Semiconductor



Semiconductores



Semiconductores

Intrínsecos

Extrínsecos

IIIA		IVA		VA	
⁵ B Boron					
¹³ Al Aluminum	¹⁴ Si Silicon	¹⁵ P Phosphorus			
³¹ Ga Gallium	³² Ge Germanium	³³ As Arsenic			
⁴⁹ In Indium		⁵¹ Sb Antimony			

Baodan Liu et al. (2017). DOI:
10.1002/sml.201701998



Semiconductores Intrínsecos

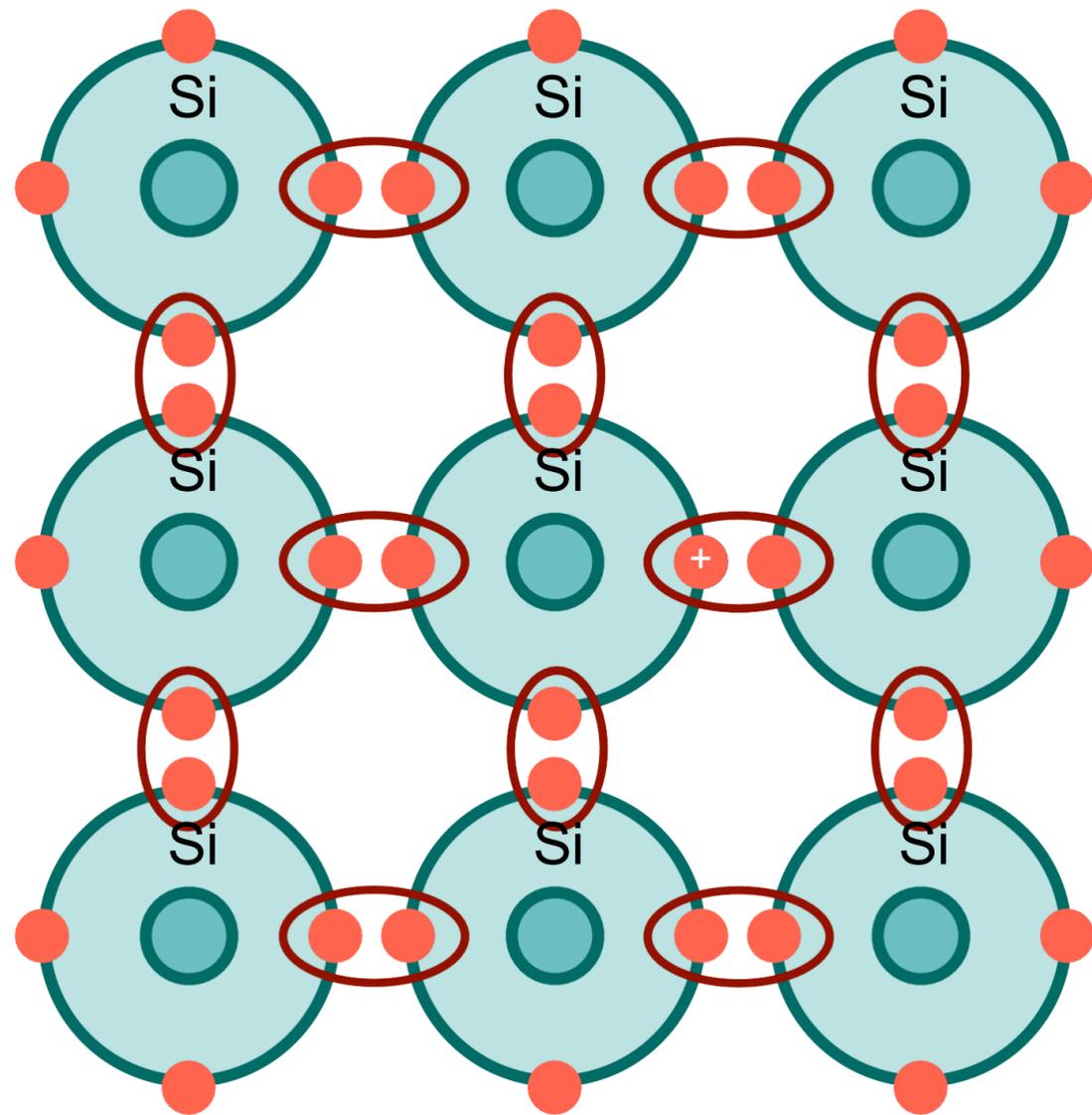
Son aquellos en los que su red cristalina no se deforma por la presencia de algún elemento añadido, es decir, permanecen puros.

Características:

- A temperatura ambiente son malos conductores.
- La agitación térmica permite una presencia muy reducida de electrones en la banda de conducción.
- La conductividad en los semiconductores intrínsecos depende en gran medida de la temperatura.



Semiconductores Intrínsecos



Banda de conducción

$$E_g \approx 1eV$$

Banda de valencia



Semiconductores Extrínsecos

Es un material semiconductor intrínseco al que se le introduce una cantidad controlada de un elemento contaminante, llamado impureza (generalmente de los grupos XIII y XV, antiguos grupos III y V, de la tabla periódica) para alterar convenientemente las propiedades de conducción del material.

Semiconductores
Intrínsecos

Tipo-P
Elementos del grupo III

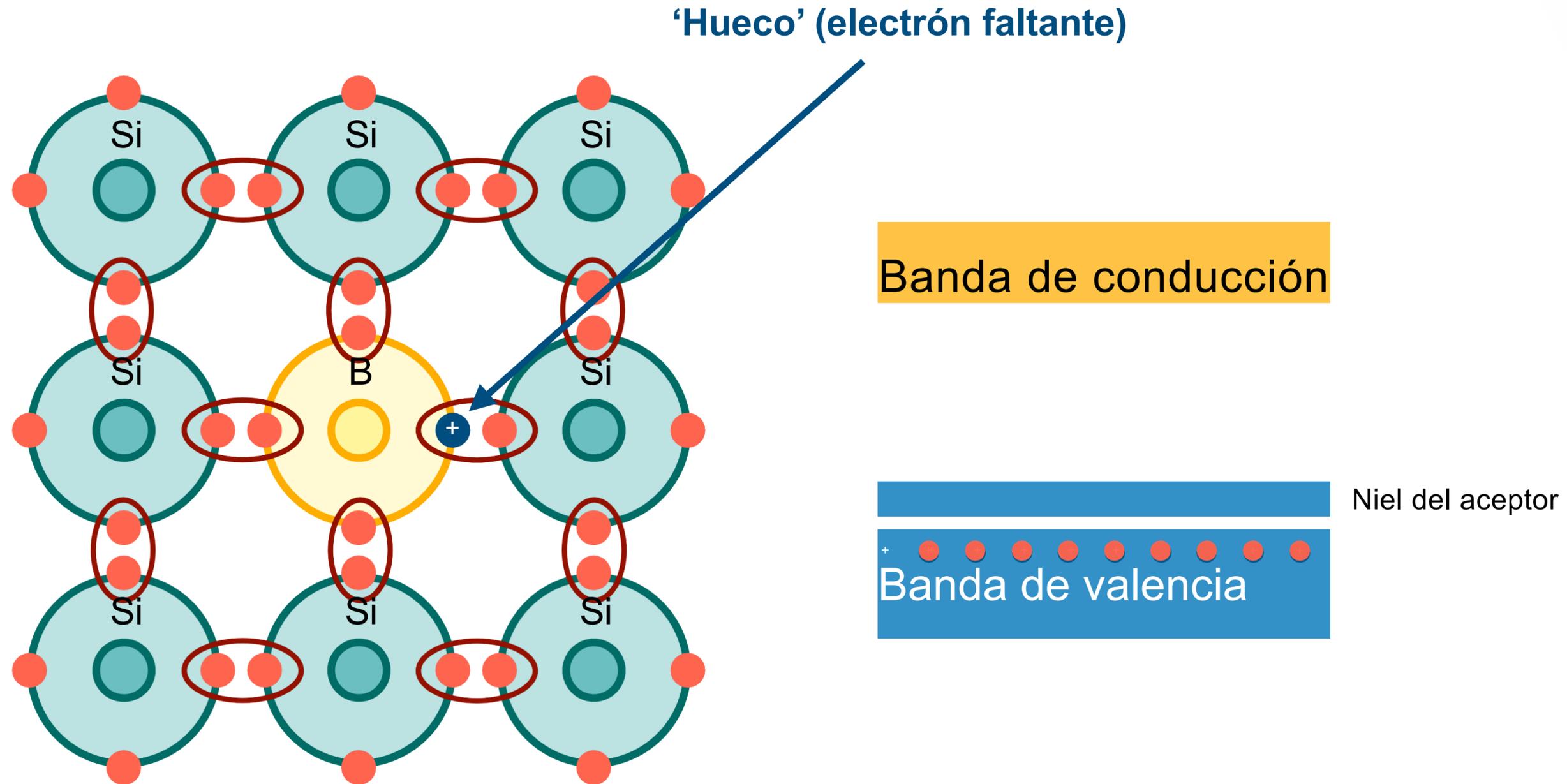
Tipo N
Elementos del grupo V

IIIA	IVA	VA
⁵ B Boron		
¹³ Al Aluminum	¹⁴ Si Silicon	¹⁵ P Phosphorus
³¹ Ga Gallium	³² Ge Germanium	³³ As Arsenic
⁴⁹ In Indium		⁵¹ Sb Antimony

Baodan Liu et al. (2017). DOI: 10.1002/sml.201701998



Semiconductores extrínsecos: Semiconductor Tipo-P

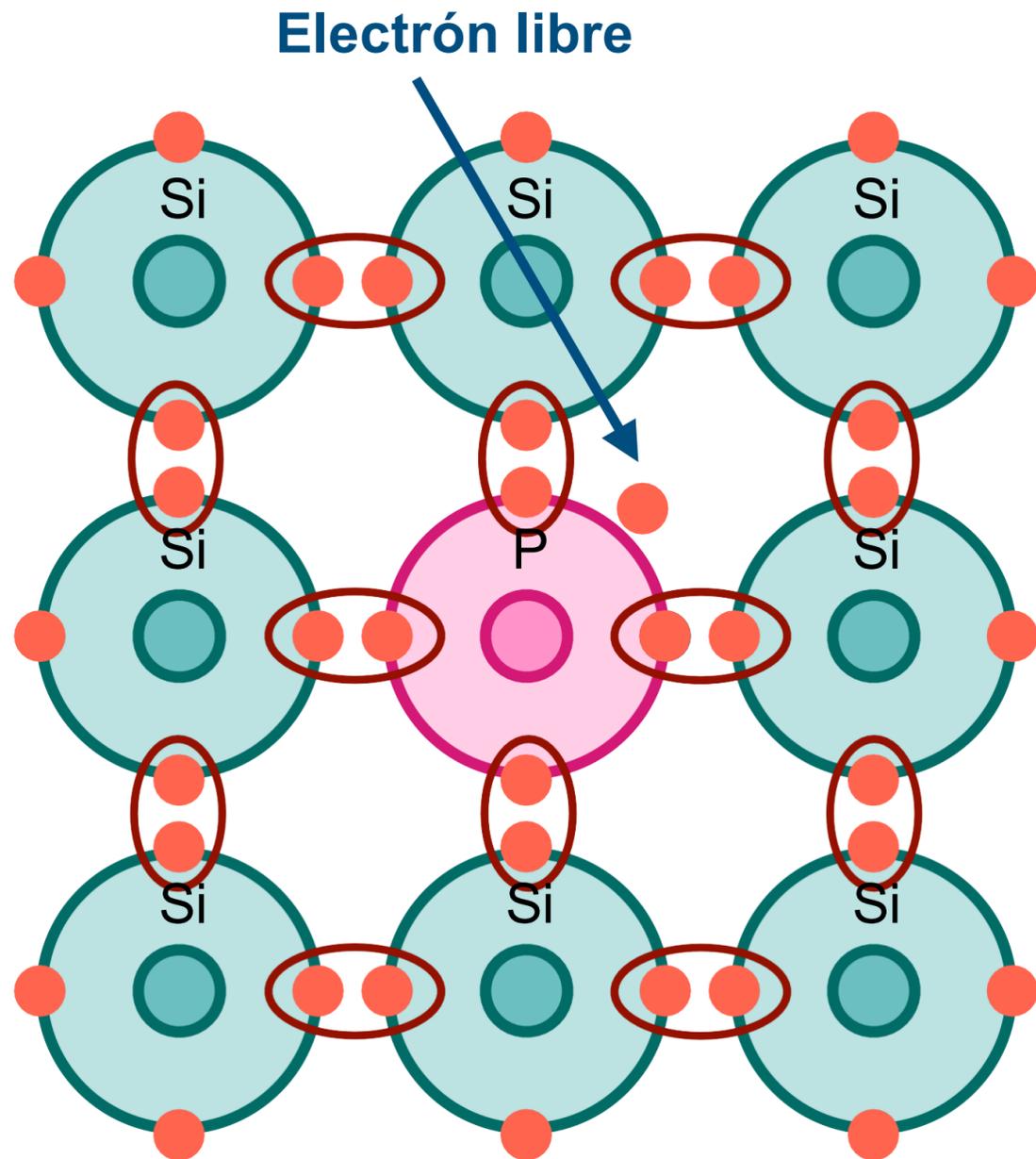


Dopante (átomo de impureza): grupo III

Portador de carga mayoritario: huecos positivos



Semiconductores extrínsecos: Semiconductor Tipo-N



Banda de conducción



Nivel del donador

Banda de valencia

Dopante (átomo de impureza): grupo V

Portador de carga mayoritario: electrones negativos



Semiconductores extrínsecos

La conductividad mejora notablemente en relación a los semiconductores intrínsecos por la aparición de un nivel de energía intermedio.

Semiconductores Tipo-P

- Nivel intermedio del tipo del aceptor
 - Está mas cercano a la banda de valencia
 - Inicialmente no esta ocupado
- Portadores mayoritarios: huecos
- Portadores minoritarios: electrones



Semiconductores Extrínsecos

Semiconductores Tipo-N

- Nivel intermedio del tipo del donar
 - Está mas cercano a la banda de conducción
 - Inicialmente ocupado por un electrón
- Portadores mayoritarios: electrones
- Portadores minoritarios: huecos



Conducción en semiconductores

Esta relacionada con el número de portadores de carga presente.

Semiconductores Intrínsecos:

Concentración de electrones en la banda de conducción

$$n_i = N_c e^{-\frac{E_c - E_i}{kT}}$$

donde: n_i es la densidad volumétrica de electrones en la banda de conducción; N_c es el número máximo de electrones por unidad de volumen que se admitirán en la banda de conducción; E_c es la energía de la parte inferior de la banda de conducción; E_i es la energía de Fermi (mide la relación de ocupación de las bandas de valencia y conducción); k es la constante Boltzmann; y T es la temperatura en grados Kelvin.



Conducción en semiconductores intrínsecos

Concentración de huecos en la banda de valencia

$$p_i = N_v e^{-\frac{E_i - E_v}{kT}}$$

donde: p_i es la densidad volumétrica de los huecos en la banda de valencia; N_v es el número máximo de agujeros por unidad de volumen potencialmente disponible en la banda de valencia; E_v es la energía del techo de la banda de valencia; E_i es la energía de Fermi (mide la relación de ocupación de las bandas de valencia y conducción); k es la constante de Boltzmann; y T es la temperatura en °K.



Conducción en semiconductores intrínsecos

El producto de las concentraciones anteriores será:

$$n_i p_i = N_c N_v e^{-\frac{E_g}{kT}}$$

- Este producto dependerá únicamente de la temperatura.
 - Por lo tanto, para una temperatura dada será una constante.



Conducción en semiconductores intrínsecos

En un semiconductor intrínseco (sin impurezas) las concentraciones de portadores son iguales ya que se generan en pares, por lo que

$$n_i = p_i = [N_c N_v]^{1/2} e^{-\frac{E_c - E_v}{2kT}}$$

En equilibrio térmico, la expresión del producto de ambas concentraciones se escribe como:

$$n_0 = p_0 = n_i^2 = N_c N_v e^{-\frac{E_c - E_v}{2kT}}$$

- Si una de estas concentraciones se desequilibra artificialmente, será compensada por la variación de la otra, manteniendo siempre constante su producto.



Conducción en semiconductores extrínsecos

En los semiconductores extrínsecos hay un desequilibrio muy grande en las concentraciones de portadores mayoritarios y minoritarios.

Semiconductores Tipo-P:

- N_A es el número de impurezas aceptoras por unidad de volumen(cm^3)
- Portadores mayoritarios (huecos): $p_0 \approx N_A$
 - Siendo $N_A \gg p_i$ y como $p_i = n_i$ resulta que $N_A \gg n_i$
 - Portadores minoritarios: $n_0 \approx n_i^2 / N_A = n_i n_i / N_A \ll n_i$



Conducción en semiconductores extrínsecos

Semiconductores Tipo-N:

- N_D es el número de impurezas donantes por unidad de volumen (cm^3)
- Portadores mayoritarios (electrones): $n_0 \approx N_D$
- Siendo $N_D \gg n_i$ y como $n_i = p_i$ resulta que $N_D \gg p_i$
- Portadores minoritarios: $p_0 \approx p_i^2 / N_D = p_i p_i / N_D \ll p_i$



Conducción en semiconductores extrínsecos

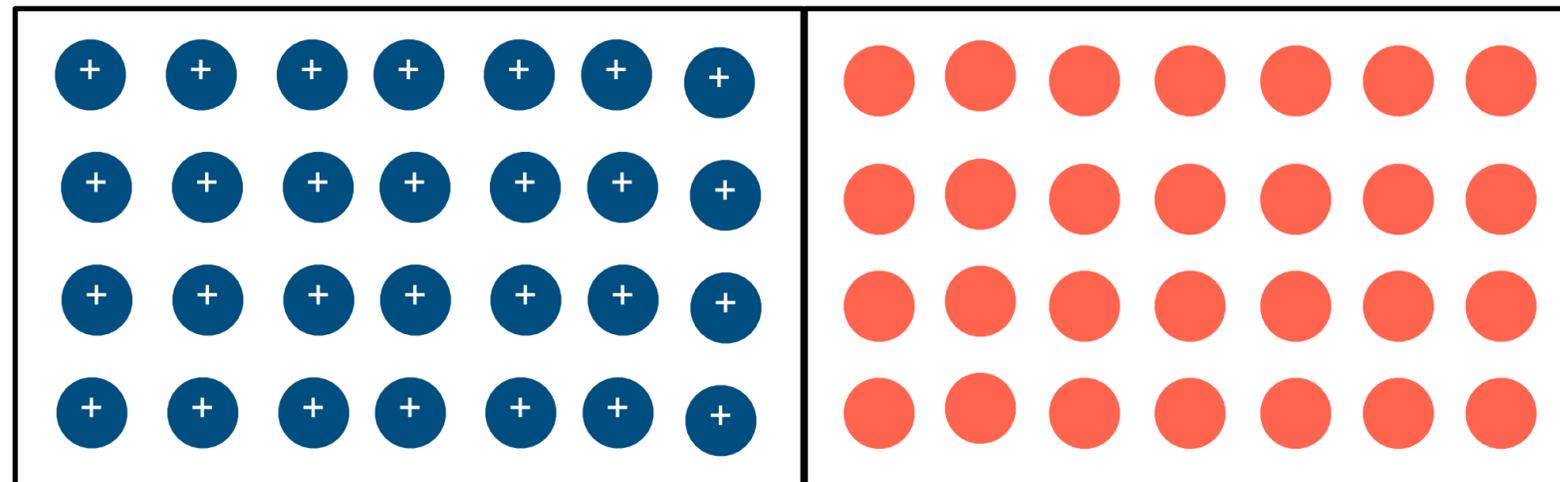
Notas:

- La mayoría de los portadores son prácticamente constantes y solo dependen de la concentración de las impurezas.
- La concentración de portadores minoritarios es mucho más baja que en un semiconductor intrínseco y depende en gran medida de la temperatura.



Estructura de la unión P-N

Se forma poniendo en contacto un semiconductor Tipo-P con un semiconductor Tipo-N.



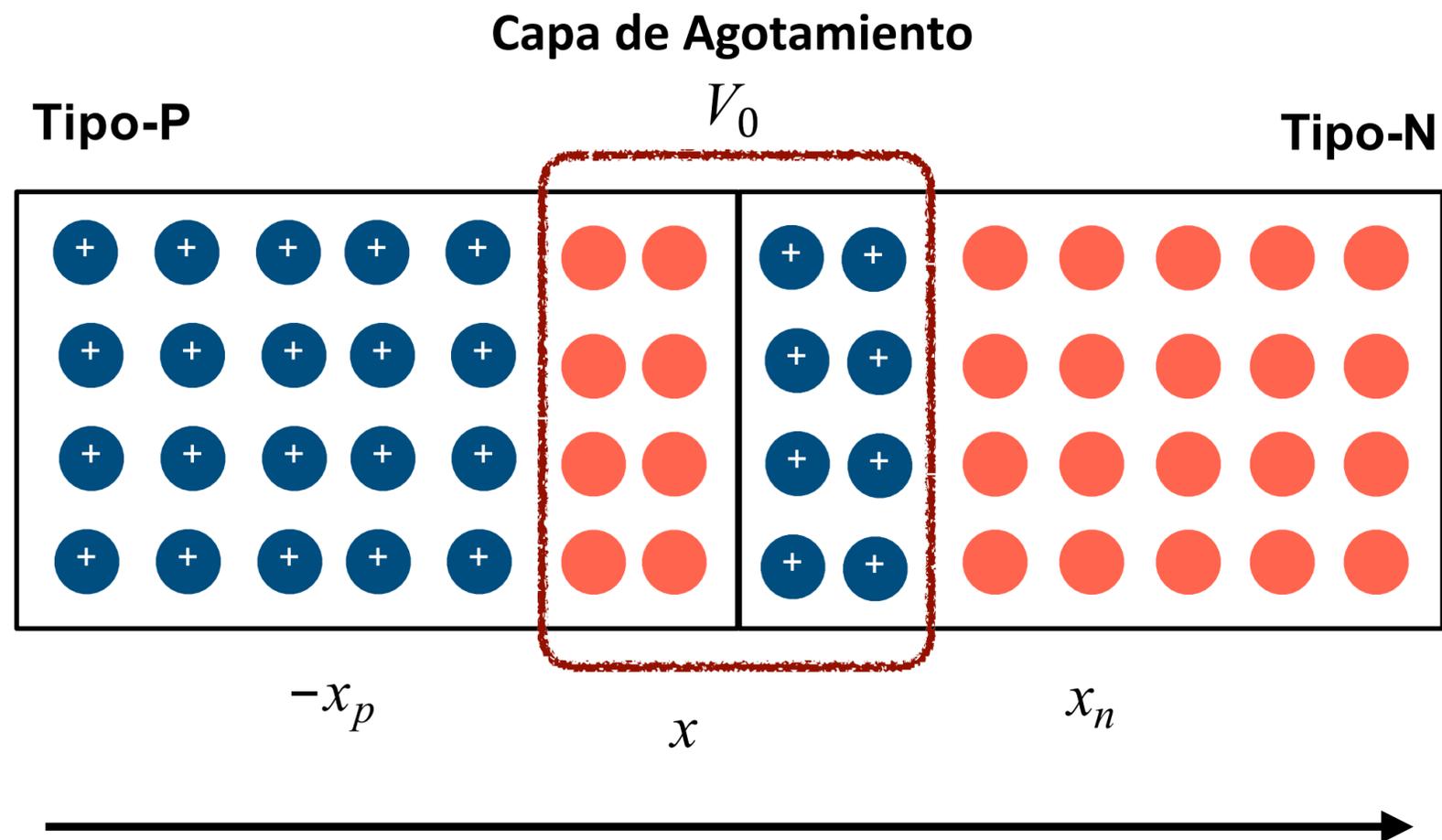
Tipo-P

Tipo-N



Estructura de la unión P-N

Se forma poniendo en contacto un semiconductor Tipo-P con un semiconductor Tipo-N.





Estructura de la unión P-N

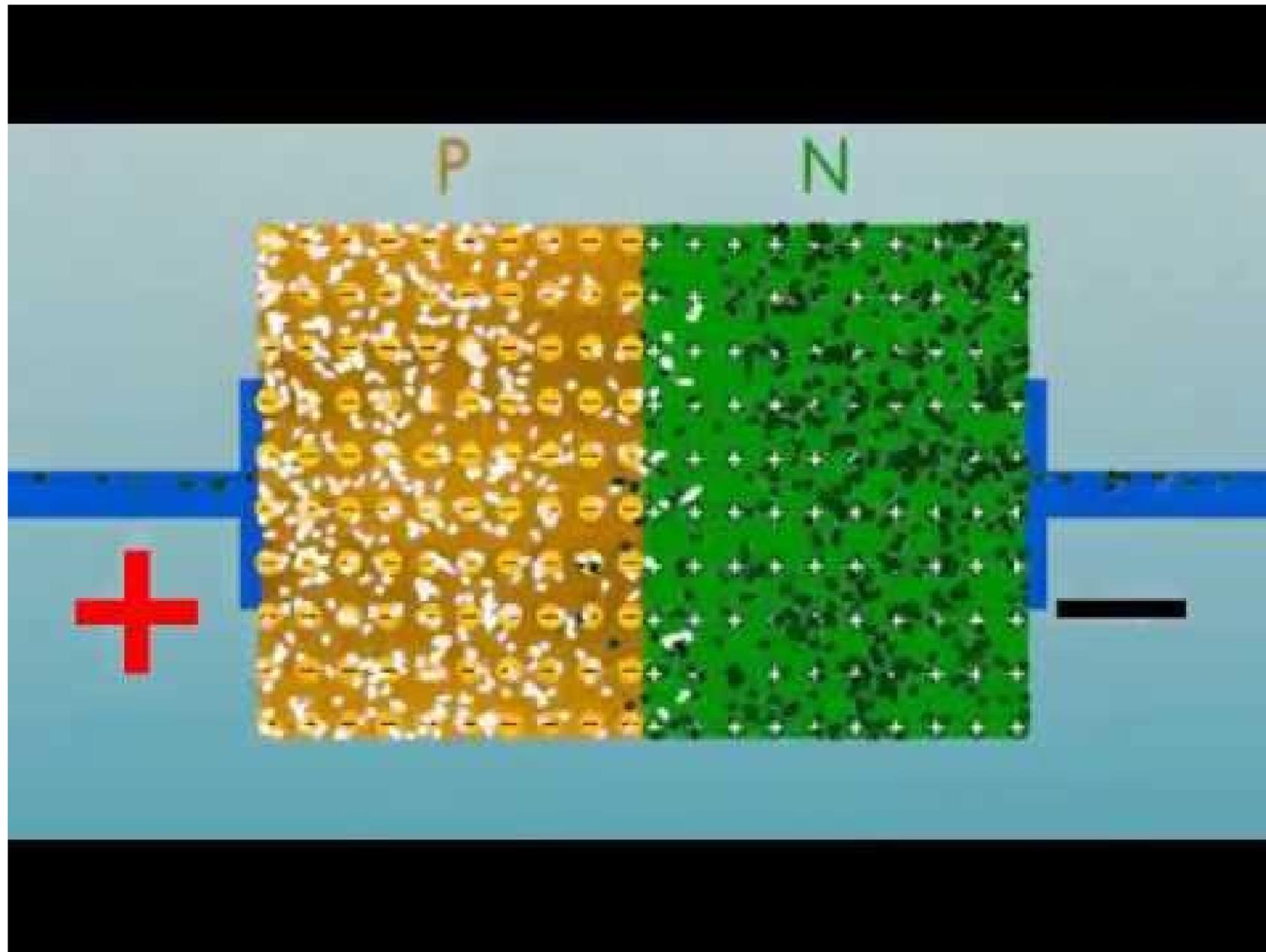
Cuando los dos semiconductores entren en contacto, comenzará:

Un proceso de difusión de los portadores mayoritarios de una zona a otra ...

... pero este proceso se interrumpe antes de alcanzar las mismas concentraciones porque con esta difusión se crea un potencial eléctrico.

- El potencial eléctrico aumenta progresivamente y se opone al proceso de difusión.
- El potencial de contacto alcanzará un nivel para el cual se establecerá el equilibrio entre el proceso de difusión y el proceso de deriva (campo eléctrico del potencial de contacto).

Estructura de la unión P-N





Estructura de la unión P-N

Esta situación de balance puede ser expresada como sigue:

$$J_p = J_{pd} + J_{pa}$$

$$J_n = J_{nd} + J_{na}$$

donde:

J_{pd} es la densidad de corriente de los huecos por difusión, J_{nd} es la densidad de corriente de los electrones por difusión, J_{pa} es la densidad de corriente de los huecos por deriva, J_{na} es la densidad de corriente de los electrones por deriva.



Estructura de la unión P-N

$$J_{pd} = -qD_p \frac{dp(x)}{dx}$$

$$J_{pa} = q\mu_p E(x)p(x)$$

$$J_{nd} = -qD_n \frac{dn(x)}{dx}$$

$$J_{na} = q\mu_n E(x)p(x)$$

μ_p : Movilidad de los huecos

μ_n : Movilidad de los electrones

: coeficiente de difusión ($D = \mu \frac{kT}{q}$)



Estructura de la unión P-N

Sustituyendo en la expresión del equilibrio en la zona p, tenemos

$$E(x)dx = \frac{D_p dp(x)}{\mu_p p(x)}$$

donde: $E(x)dx = - dV(x)$

por lo tanto:

$$dV(x) = \frac{D_p dp(x)}{\mu_p p(x)}$$



Estructura de la unión P-N

Integrando en la última expresión entre los dos lados de la unión entre los que se ha establecido el potencial de contacto, tenemos

$$\int_0^{V_0} = -\frac{D_p}{\mu_p} \int_{p_{pe}}^{p_{ne}} \frac{dp}{p} \implies V_0 = \frac{D_p}{\mu_p} [\ln(p_{pe}) - \ln(p_{ne})]$$

donde:

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{q}; \quad p_{pe} \cong N_A; \quad p_{ne} \cong \frac{n_i^2}{N_D}$$

p_{pe} la concentración de huecos en la zona p en equilibrio

p_{ne} la concentración de huecos en la zona n en equilibrio



Estructura de la unión P-N

Finalmente, se puede escribir:

$$V_0 = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{p_{pe}}{p_{ne}} \right) = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$$

De la expresión anterior podemos obtener una expresión que relaciona las concentraciones en ambos lados de la unión:

$$p_{ne} = p_{pe} e^{-\frac{qV_0}{kT}}$$



Estructura de la unión P-N

Este mismo resultado se puede aplicar al caso de concentraciones de electrones en ambos lados de la unión, siendo

$$n_{pe} = n_{ne} e^{-\frac{qV_0}{kT}}$$



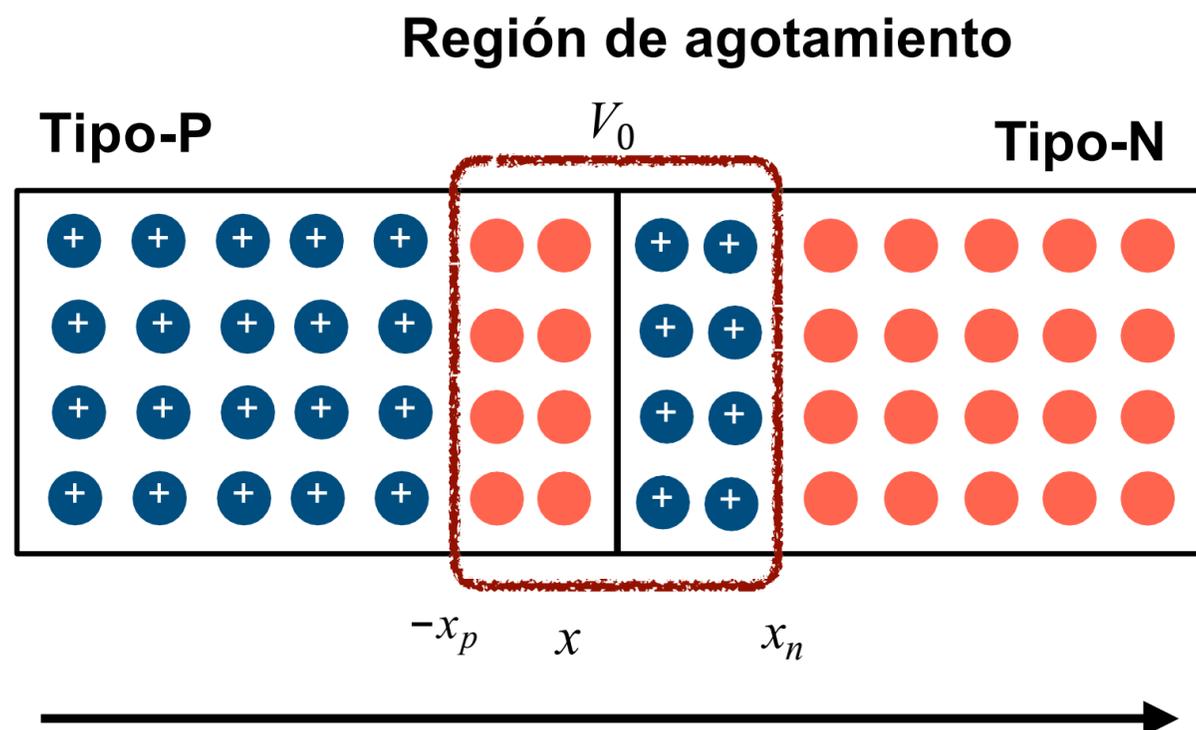
Estructura de la unión P-N

Una vez que se alcanza el equilibrio, las cantidades de carga en ambos lados de la articulación serán

$$\text{Lado N: } Q_n = + qN_D x_n S$$

$$\text{Lado P: } Q_p = - qN_A x_p S$$

- S el área de la región del semiconductor.
- x_n y x_p es el ancho de la región de agotamiento en los lados n y p , respectivamente.

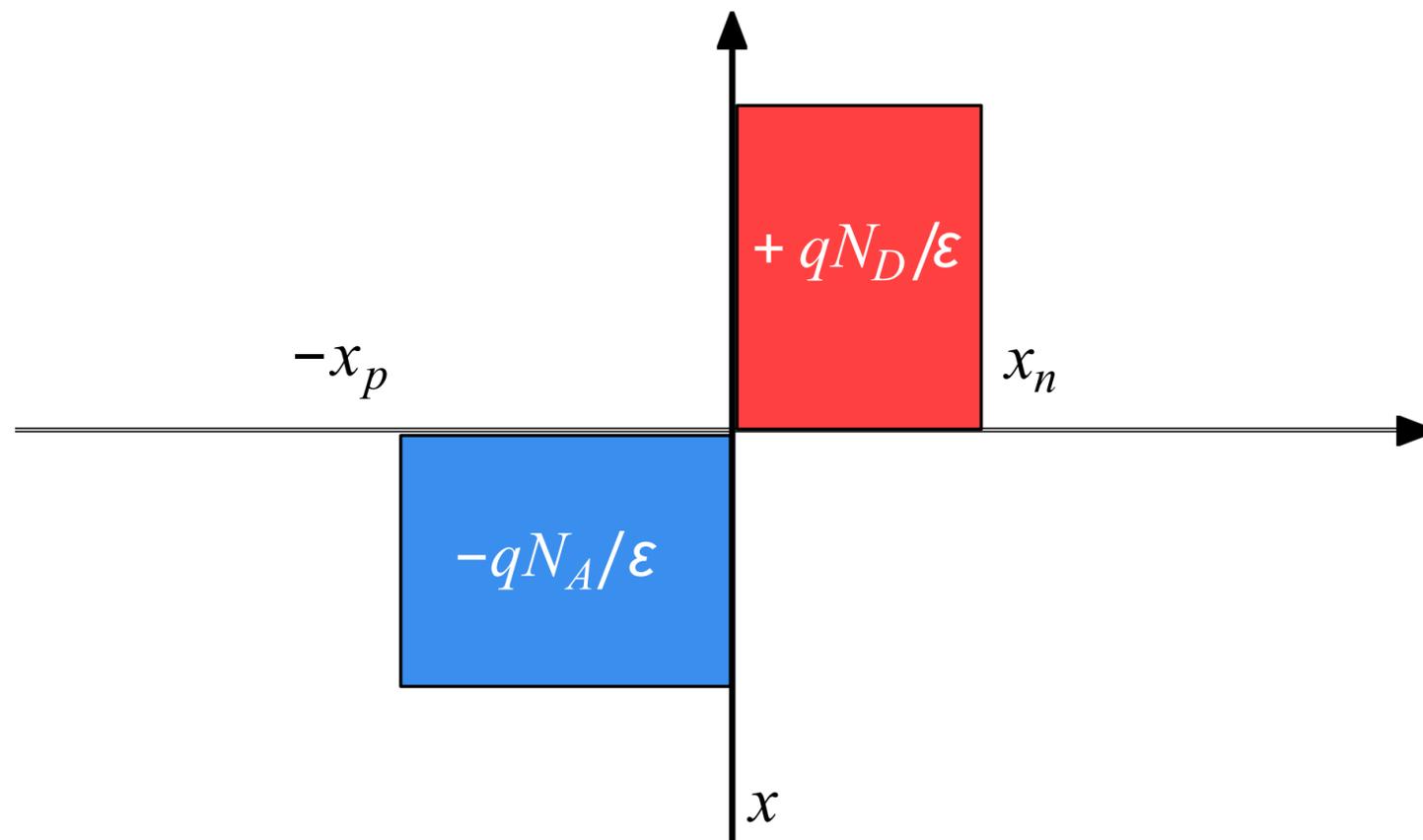




Estructura de la unión P-N

Dado que la unión debe permanecer eléctricamente neutra, tenemos que:

$$|Q_n| = |Q_p| \implies N_D x_n = N_A x_p$$



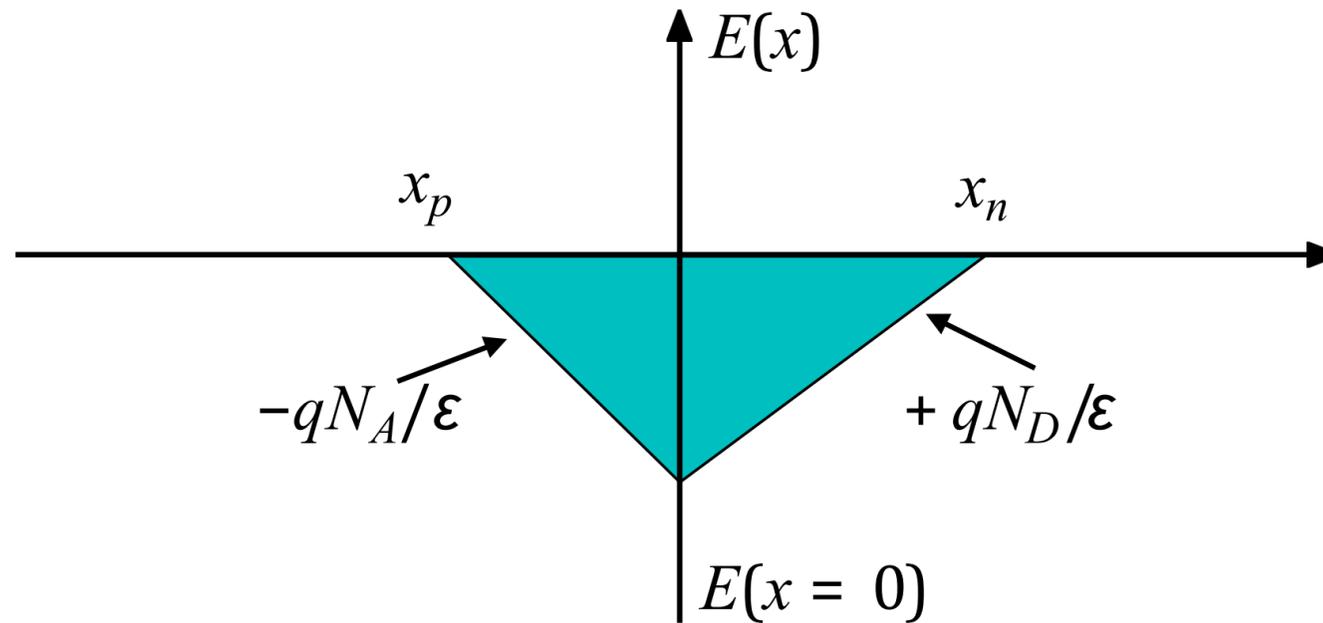
ρ es la densidad de carga por volumen
(carga por unidad de volumen)

ϵ es la constante eléctrica
(permitividad eléctrica)



Estructura de la unión P-N

Gráficamente, el campo eléctrico será :





Estructura de la unión P-N

$$V_0 = -\frac{W^2 q}{2 \varepsilon} \left(\frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \right)$$

donde W es el ancho de la región de agotamiento:

$$W = x_p + x_n$$

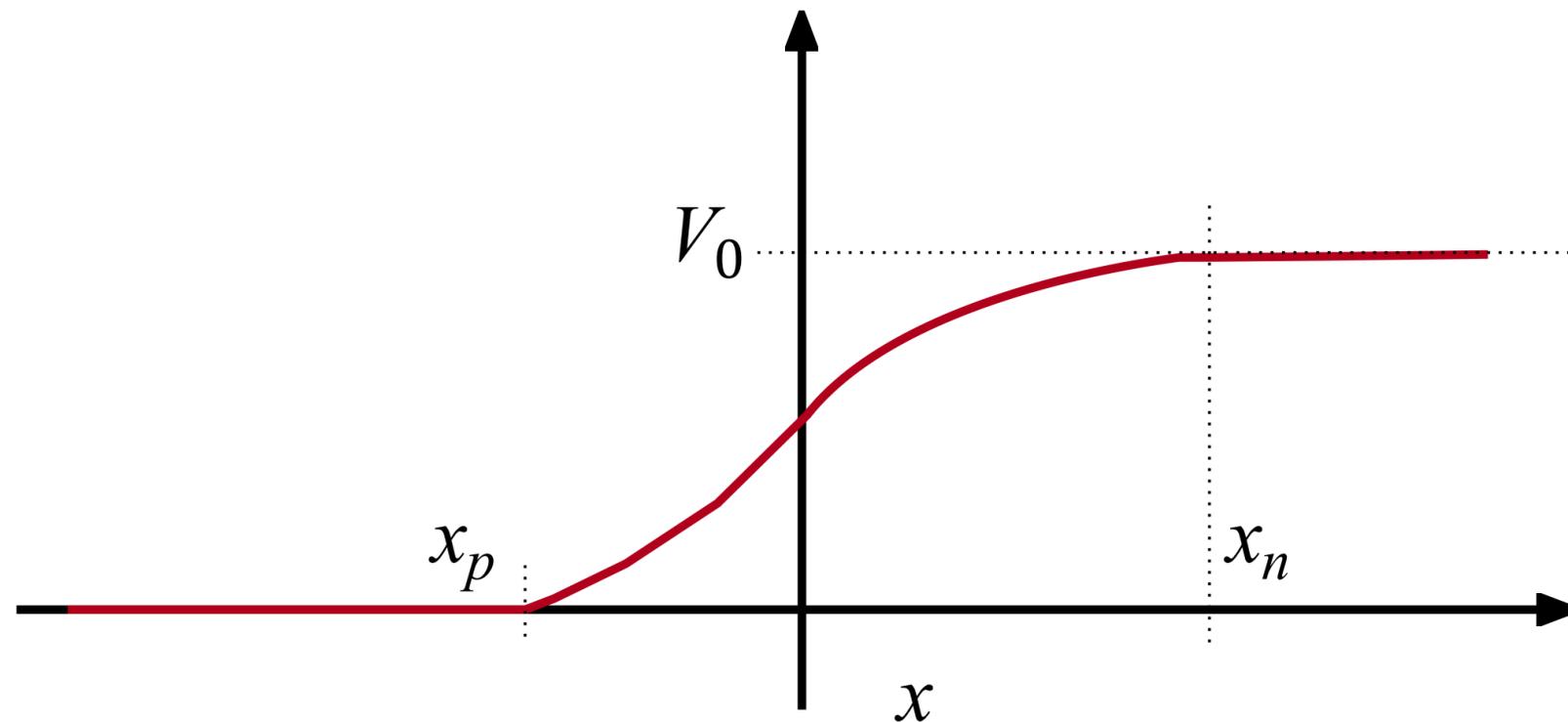
Despejando el ancho de la región de agotamiento de la ecuación anterior, tenemos

$$W = \left[\frac{2\varepsilon V_0}{q} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) \right]^{1/2}$$



Estructura de la unión P-N

La representación gráfica de la tensión de contacto V_0 será:



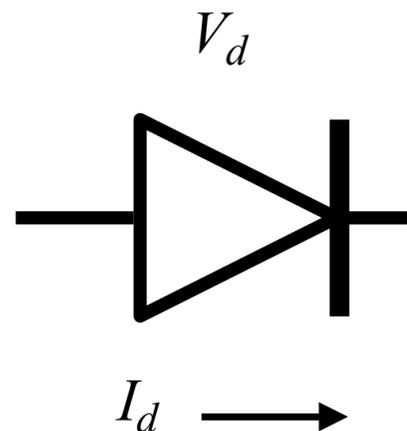
Consecuencia importante : Si aumentamos externamente el valor del potencial V_0 (aplicando una polarización inversa) aumentaremos el ancho de la región de agotamiento.



El diodo

Es el dispositivo electrónico semiconductor más simple.
Se construye formando una unión P-N.

Simbolo:



Estructura:





Polarización del Diodo

El comportamiento del diodo será muy diferente dependiendo de su polarización.

Polarización
del Diodo

Polarización Directa. Cuando el voltaje en el ánodo es mayor que el voltaje en el cátodo. También conocido como sesgado hacia adelante.

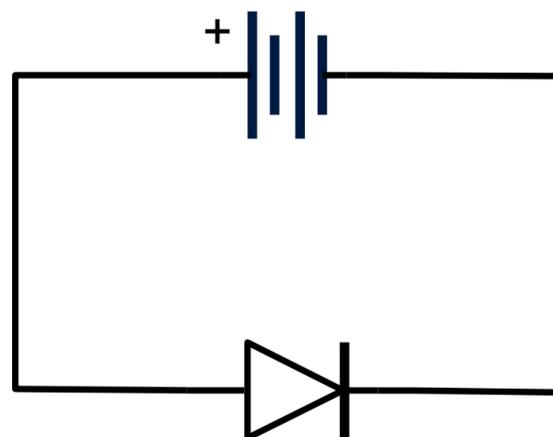
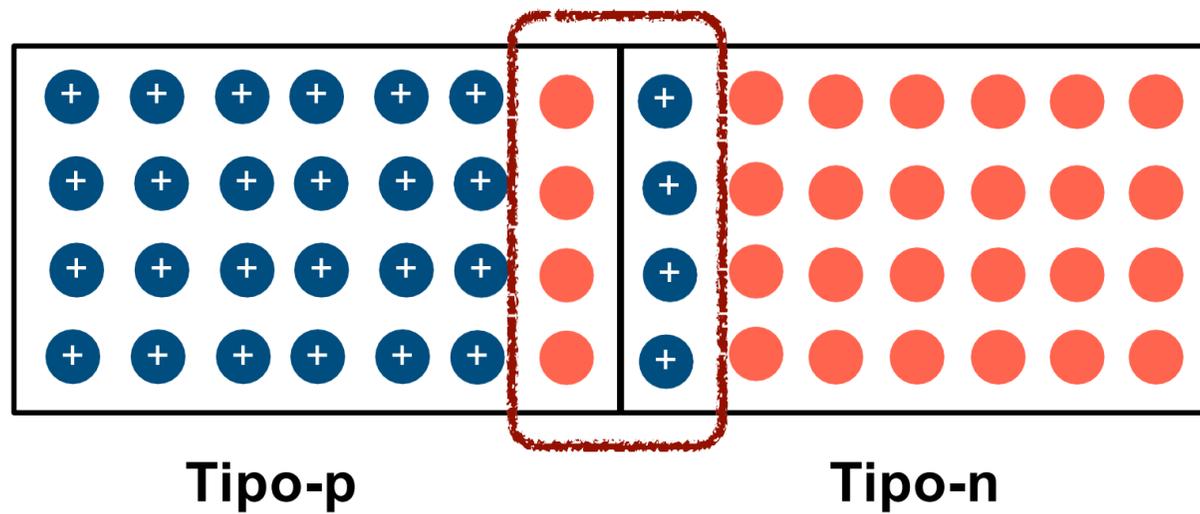
Polarización Inversa. Cuando el voltaje en el ánodo es menor que el voltaje en el cátodo. También conocido como polarización inversa.



Polarización del Diodo

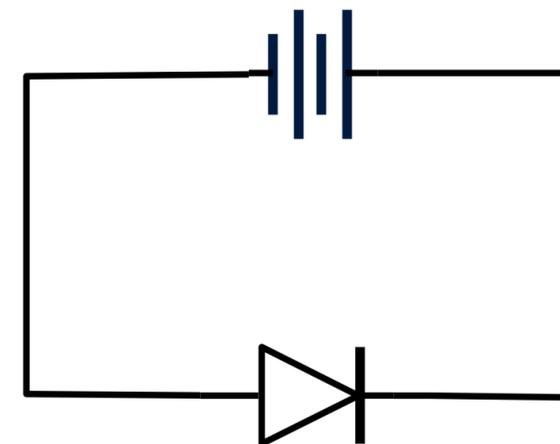
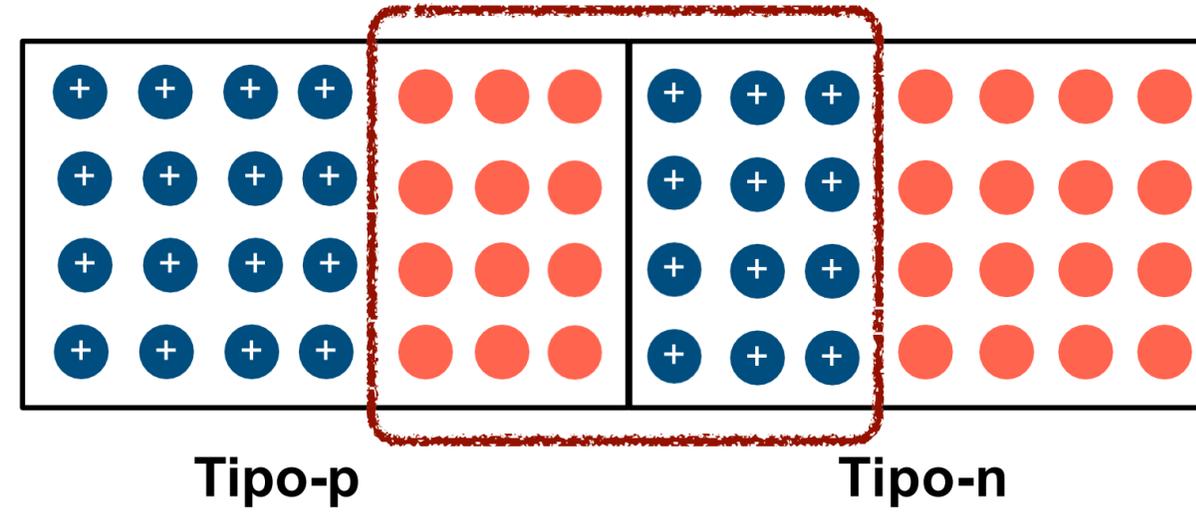
Polarización Directa

Región de agotamiento



Polarización Inversa

Región de agotamiento





Ecuación del Diodo (Ley)

Relaciona la corriente que pasa a través del diodo (I_d) con la tensión externa que se le aplica (V_d) y está dada por:

$$I_d = I_s \left(e^{\frac{qV_d}{kT}} - 1 \right)$$

I_s es la corriente de saturación inversa y depende de las características constructivas del diodo. La corriente es del orden de 10^{-12} A.

V_d es el voltaje externo aplicado al diodo.

k es la constante de Boltzmann's (eV/cm³).

T es la temperatura en °K.

q es la carga del electrón (valor absoluto).



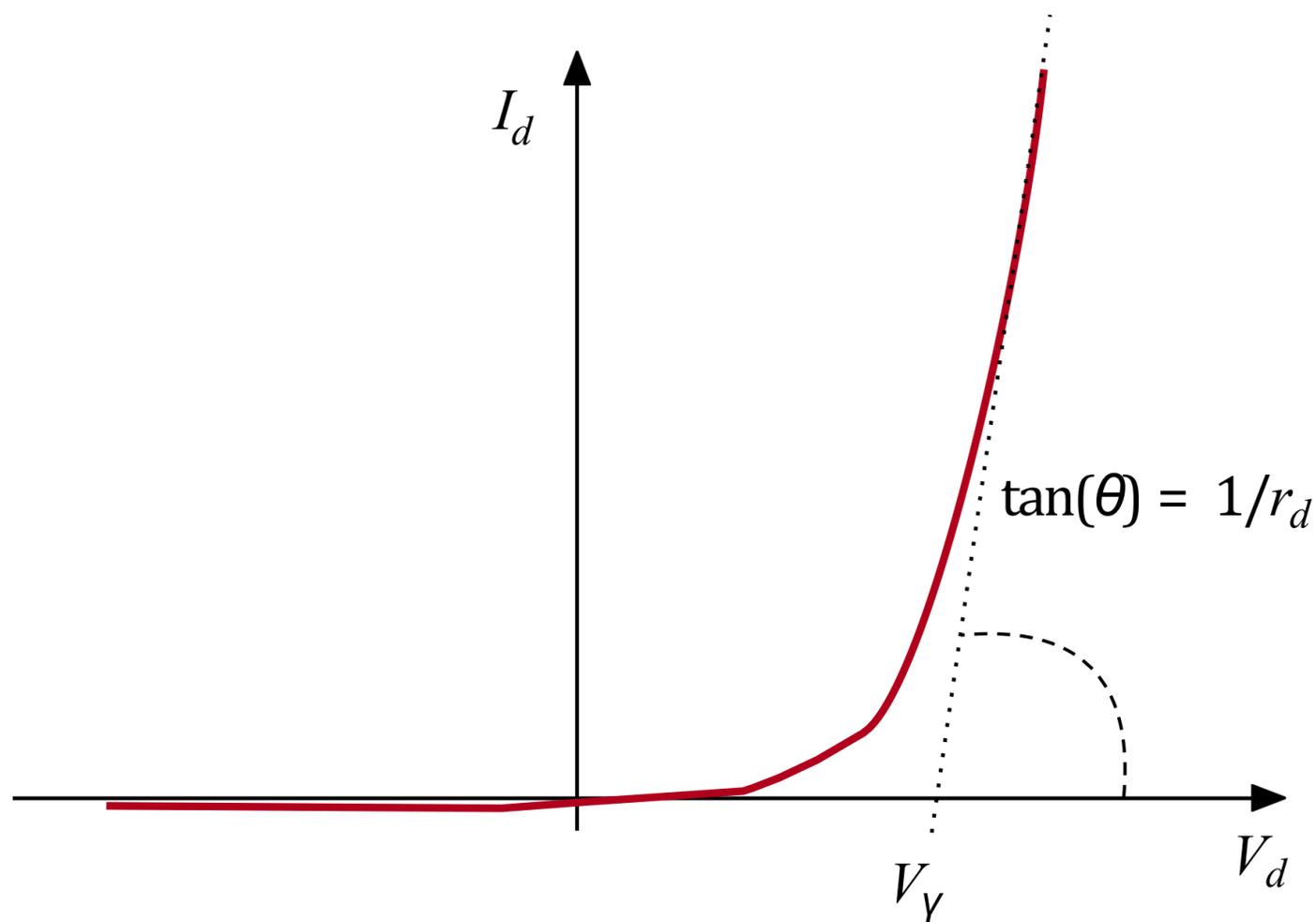
Curva característica del diodo

Relaciona la corriente que pasa a través del diodo (I_d) con la tensión externa que se le aplica (V_d) y está dada por

$$I_d = I_s \left(e^{\frac{qV_d}{kT}} - 1 \right)$$

V_Y es el voltaje de umbral del diodo.

For $T = 300K$ (temperatura ambiente) el término kT/q es aproximadamente 25mV.





Modelos equivalentes del Diodo

El cálculo con la expresión directa es complejo y por tanto se utilizan los modelos aproximados.

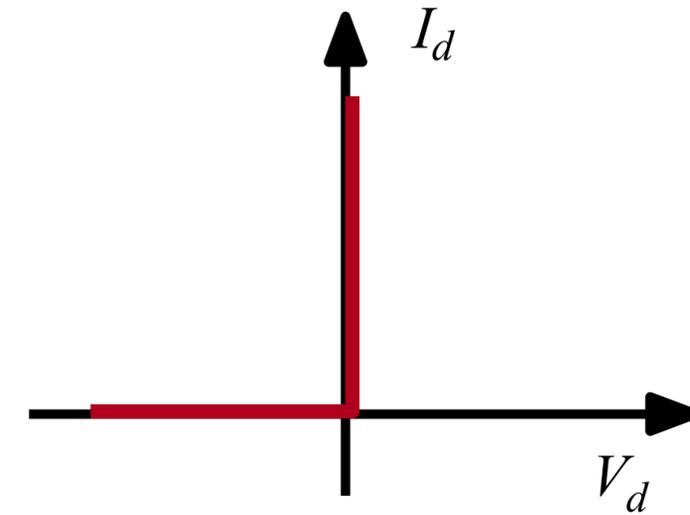
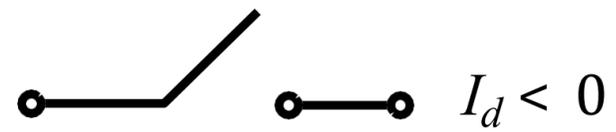
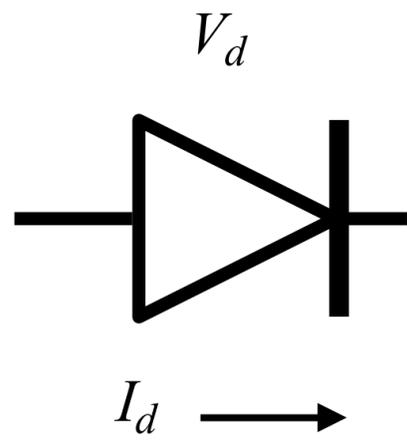
Modelos
equivalente
del diodo

Diodo ideal o modelo de interruptor

Como interruptor con una caída de tensión

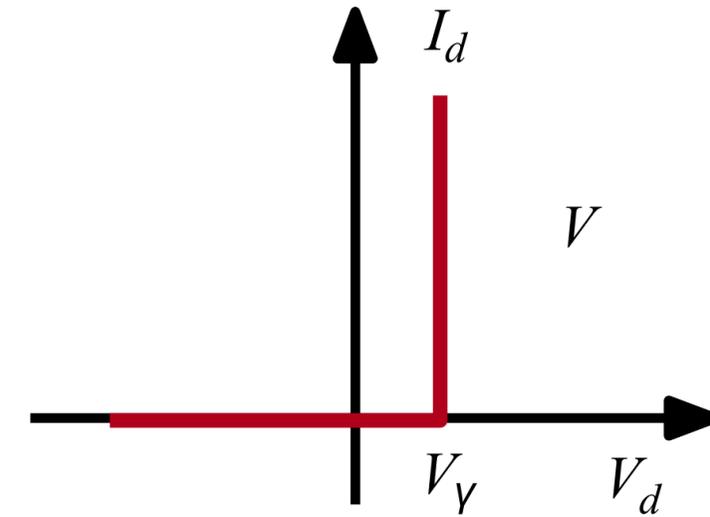
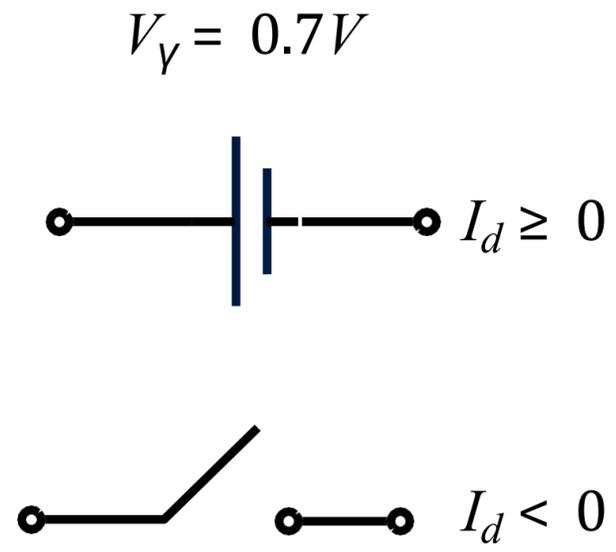
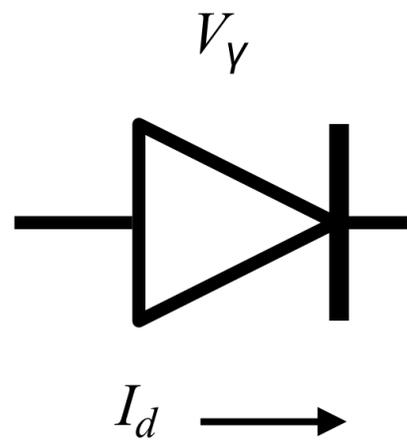
Un interruptor con una batería y un resistor en serie

Modelo de interruptor



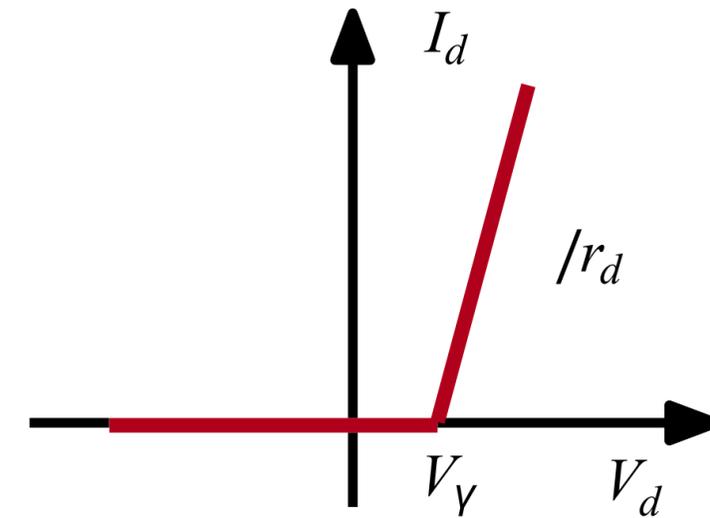
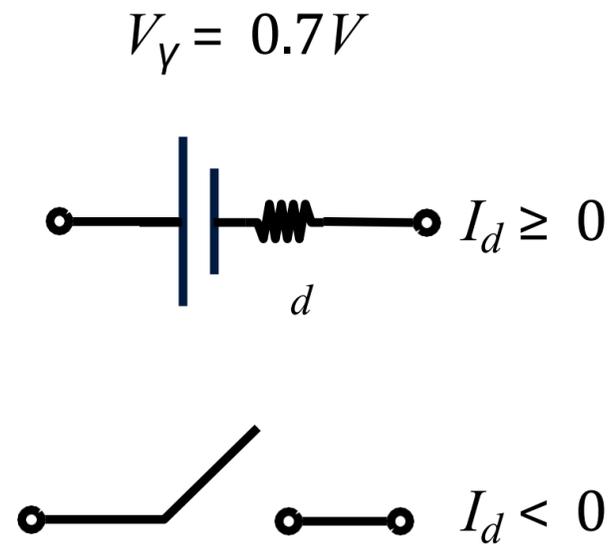
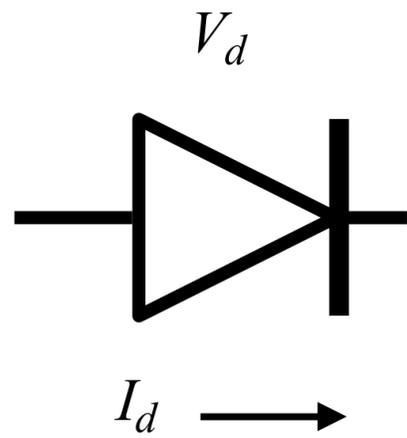


Modelo de interruptor con caída de tensión





Modelo de interruptor con una batería y resistor en serie



Otros tipos de diodos

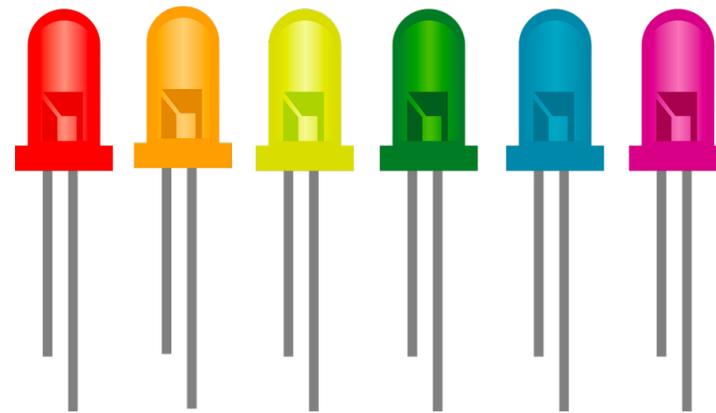


Otros tipos
de
Diodos

Zener



LED





Diodo Zener

Cuando un diodo está en polarización inversa, el campo eléctrico distribuido a lo largo de la región de unión (región de agotamiento) aumentará con la raíz del voltaje inverso.

Cuando el campo eléctrico es lo suficientemente grande, la carga asociada con la corriente inversa se acelerará tremendamente, de modo que adquirirá una alta energía cinética entre colisiones.

- La virulencia de estas colisiones aumentará, y parte de la energía cinética de la carga móvil será transferida a la carga anclada en enlaces, rompiendo algunos de estos, lo que liberará nuevas cargas.
- Esto producirá una avalancha de carga que hará que el diodo conduzca desde ese punto de ruptura.



Diodo Zener

Esto sucede en cualquier tipo de diodo antes o después, generalmente a voltajes inversos relativamente altos.

- Ciertos tipos de diodos se fabrican de tal forma para que la tensión de rotura sea exacta y precisa, y se produzca a valores de voltaje relativamente bajos. Estos dispositivos se denominan diodos de efecto de avalancha.

En otros tipos de diodos, el campo eléctrico en la región de agotamiento puede ser tan intenso que su efecto sobre los electrones en los enlaces covalentes es lo suficientemente fuerte como para arrancarlos directamente, transformándolos en una carga en movimiento.

- Este tipo de diodos son en realidad los denominados diodos de efecto Zener.



Diodo Zener

Los diodos Zener se utilizan como reguladores de voltaje.

Su comportamiento cuando se polariza en directo (polarización directa) es el mismo que el de un diodo común.

Sin embargo, cuando se polarizan a la inversa (polarización inversa) y alcanzan un valor de voltaje relativamente bajo determinado por el proceso de fabricación, comienzan a conducir abruptamente.



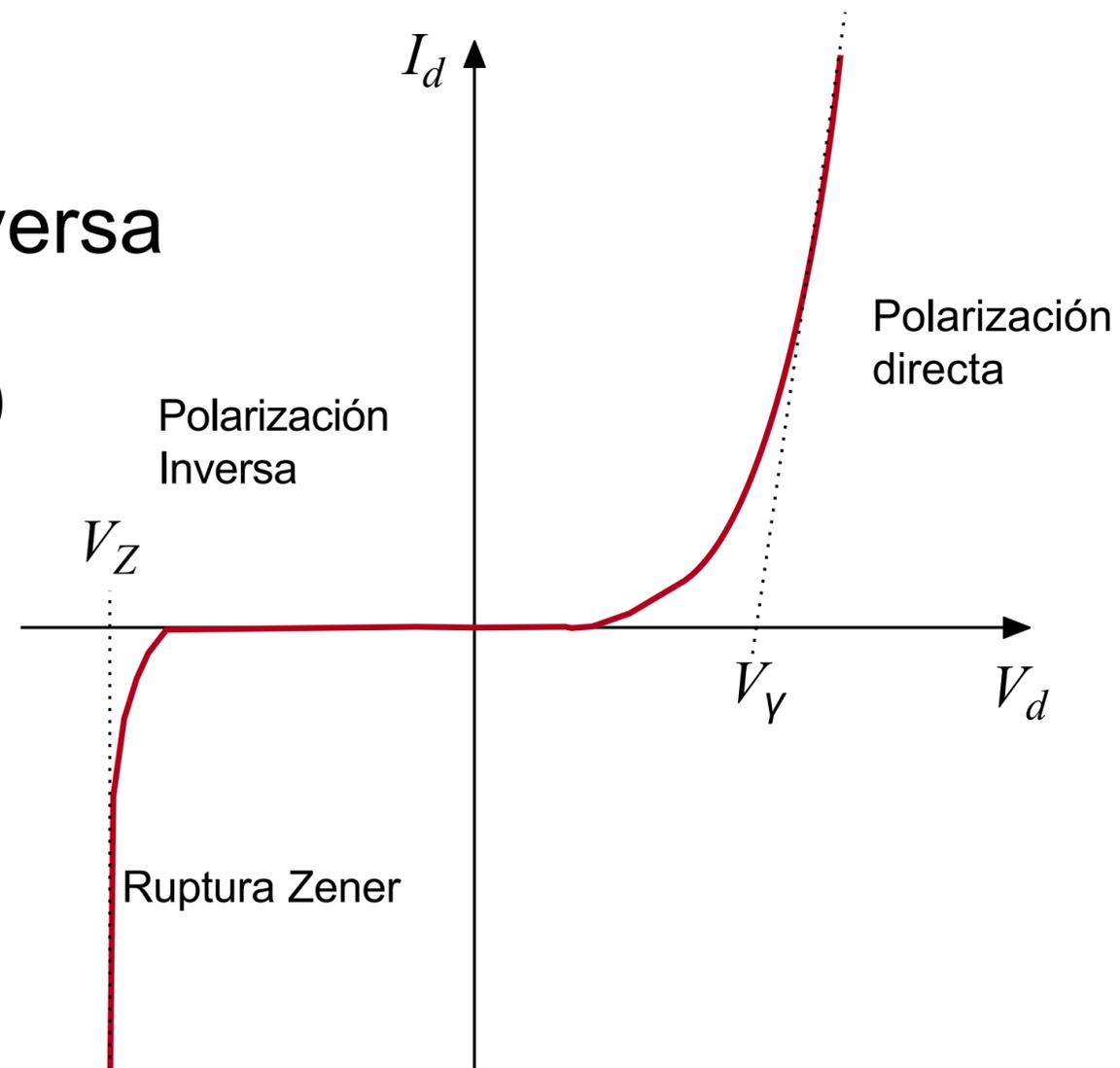
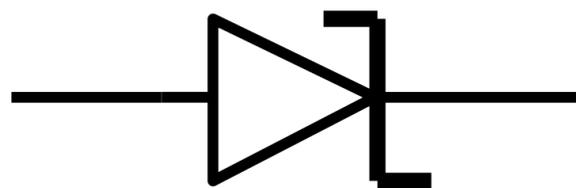
Diodo Zener

Curva característica

- V_Z el voltaje Zener.
- I_t es el voltaje en polarización inversa a partir del que conduce abruptamente (efecto avalancha)



Simbolo:



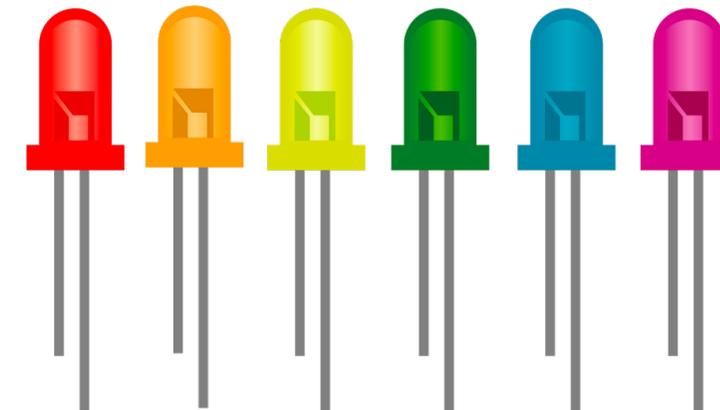


LED (Light-Emitting Diode)

Son diodos que emiten luz en el espectro visible, infrarrojo o ultravioleta (según su construcción) cuando se polarizan directamente.

La intensidad de la luz emitida es proporcional a la corriente que circula por la unión.

Se basan en la recombinación de carga que tiene lugar cuando una unión p-n está fuertemente polarizada en forma directa.



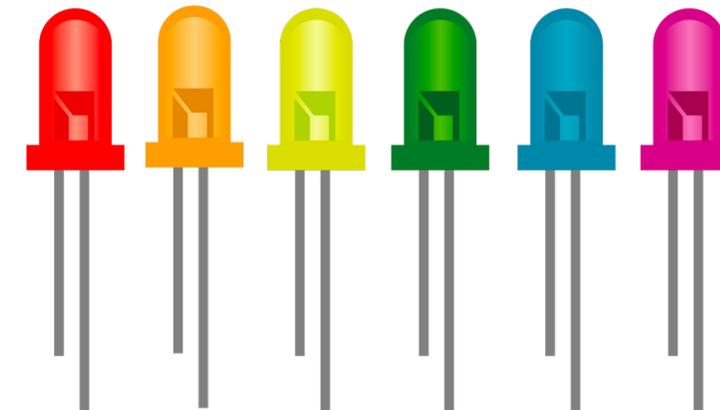
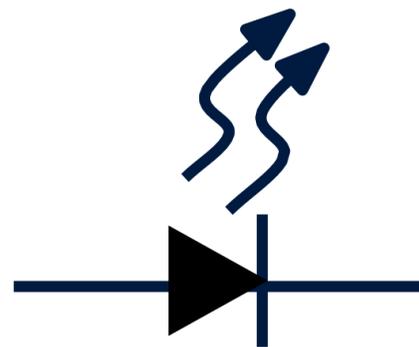


LED (Light-Emitting Diode)

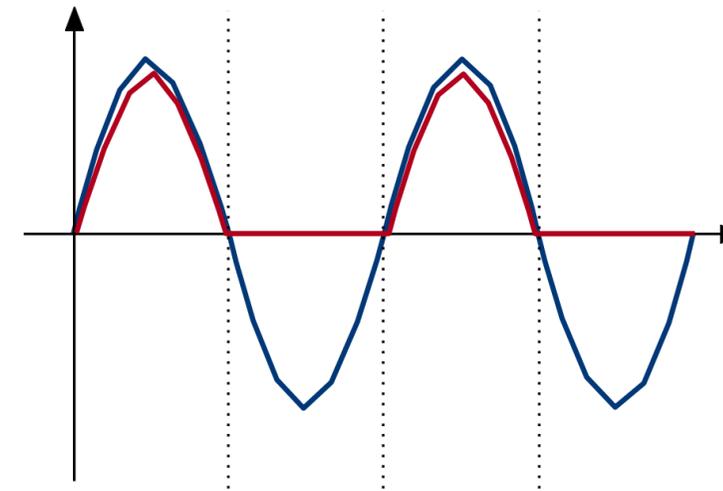
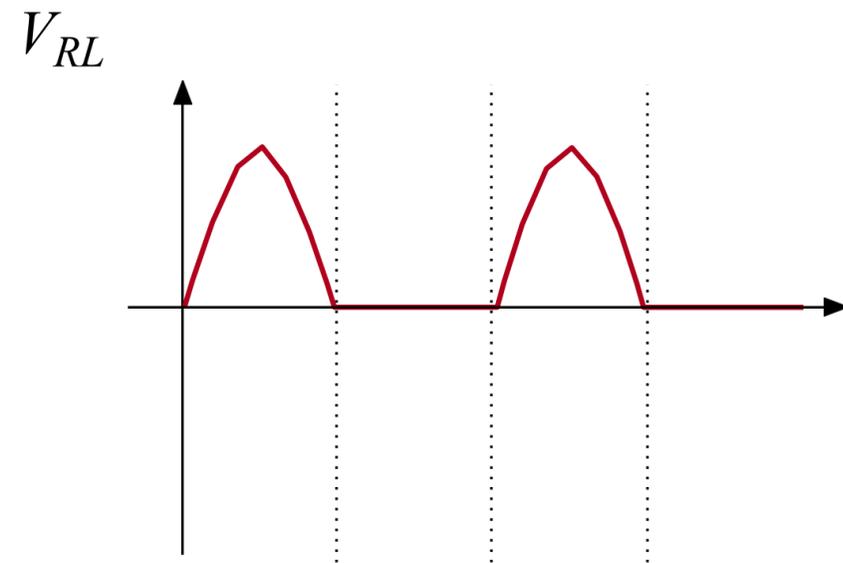
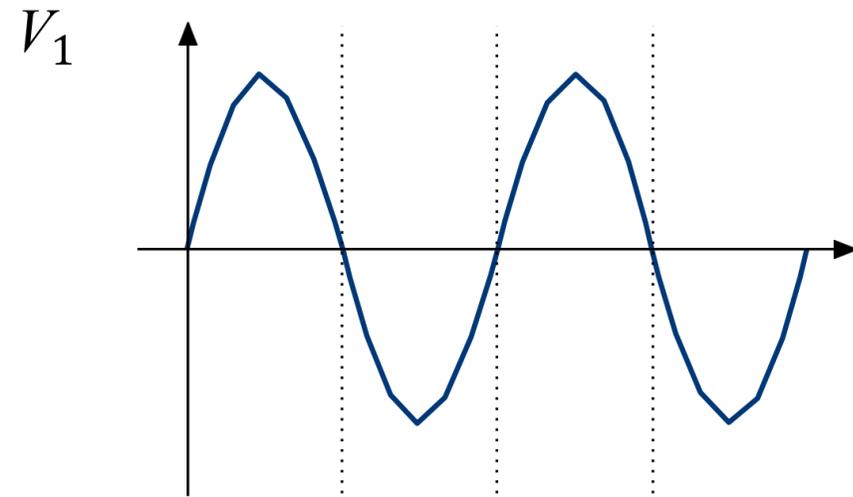
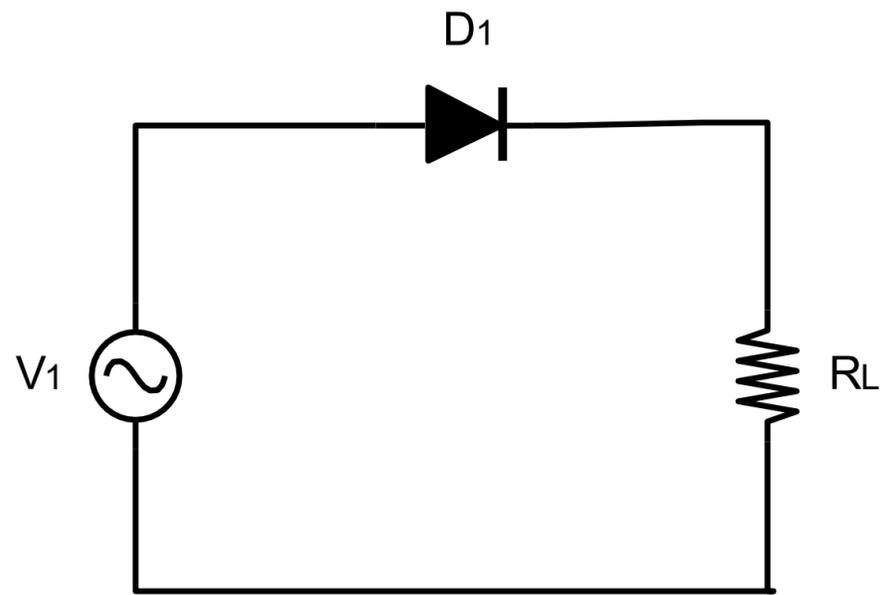
El efecto de la inyección introduce grandes cantidades de portadores de un área (donde son la mayoría) a la otra (donde están en minoría).

La colisión de un electrón con un hueco implica la reconstrucción de un enlace covalente, perdiendo el electrón el exceso de energía que transportaba, que resulta en una emisión en forma de fotón.

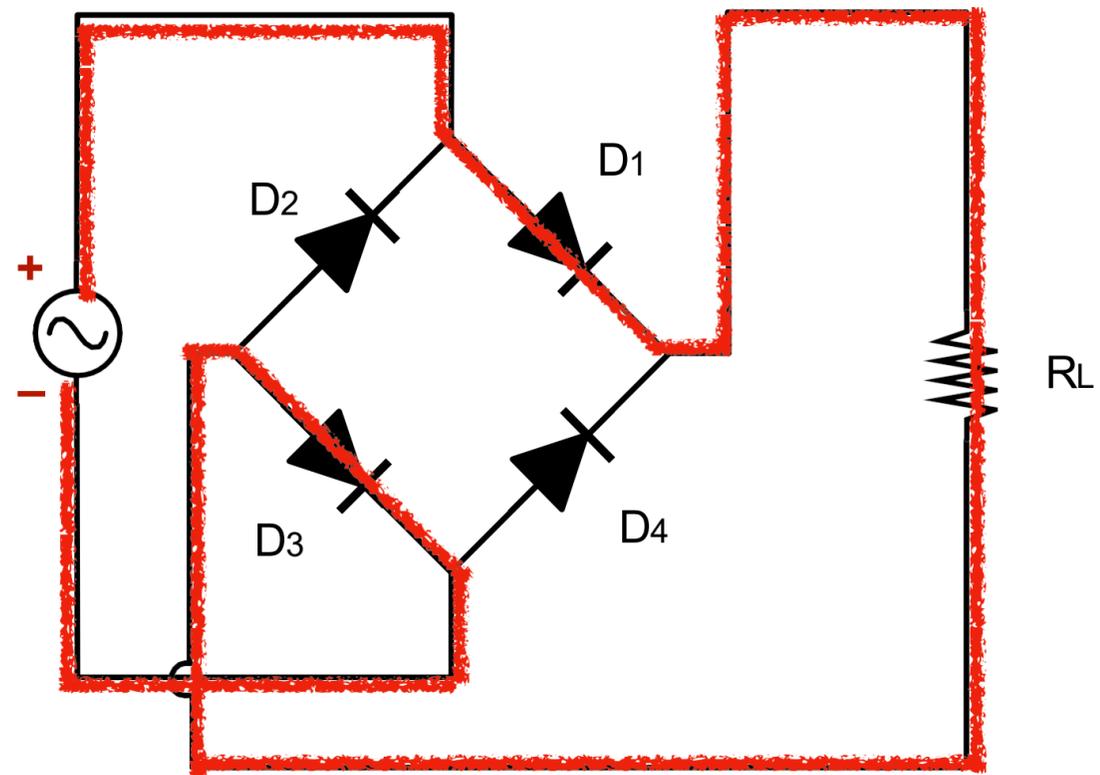
Simbolo:



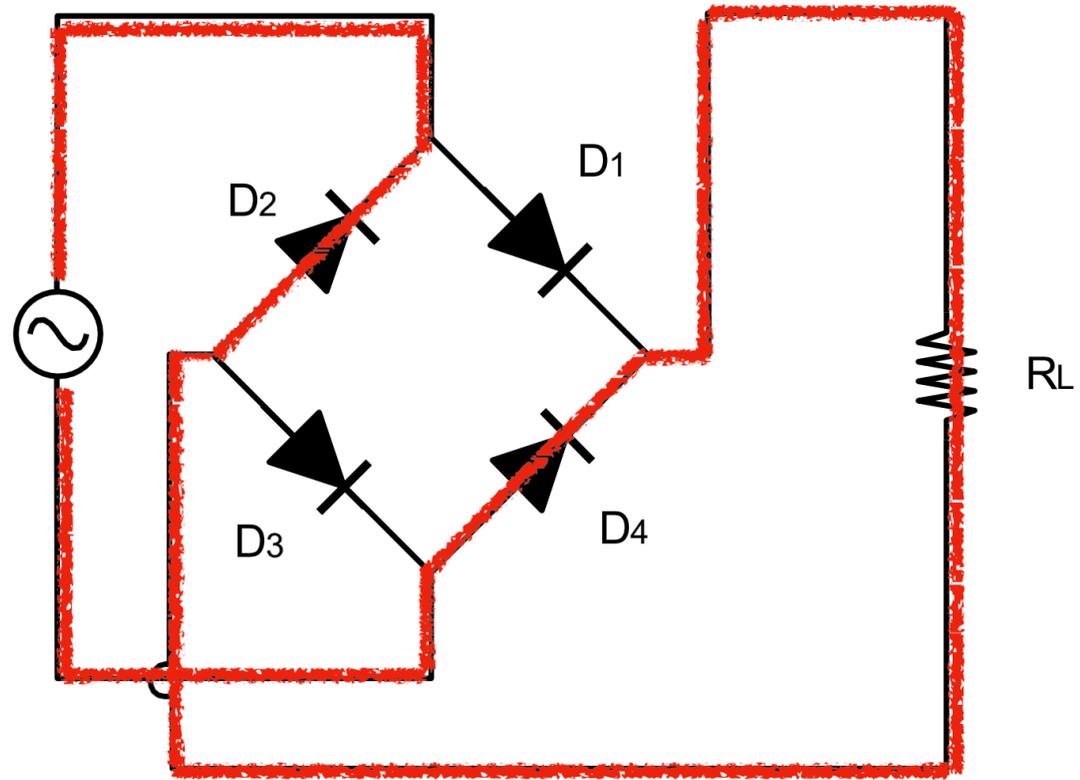
Aplicaciones con Diodos: Rectificador de media onda



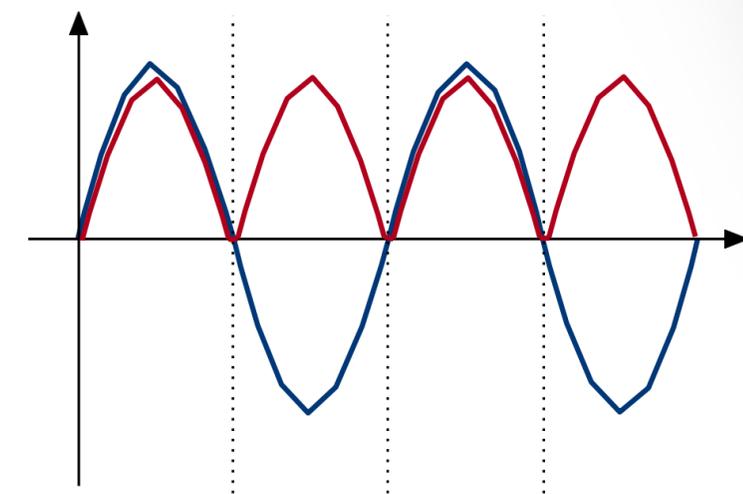
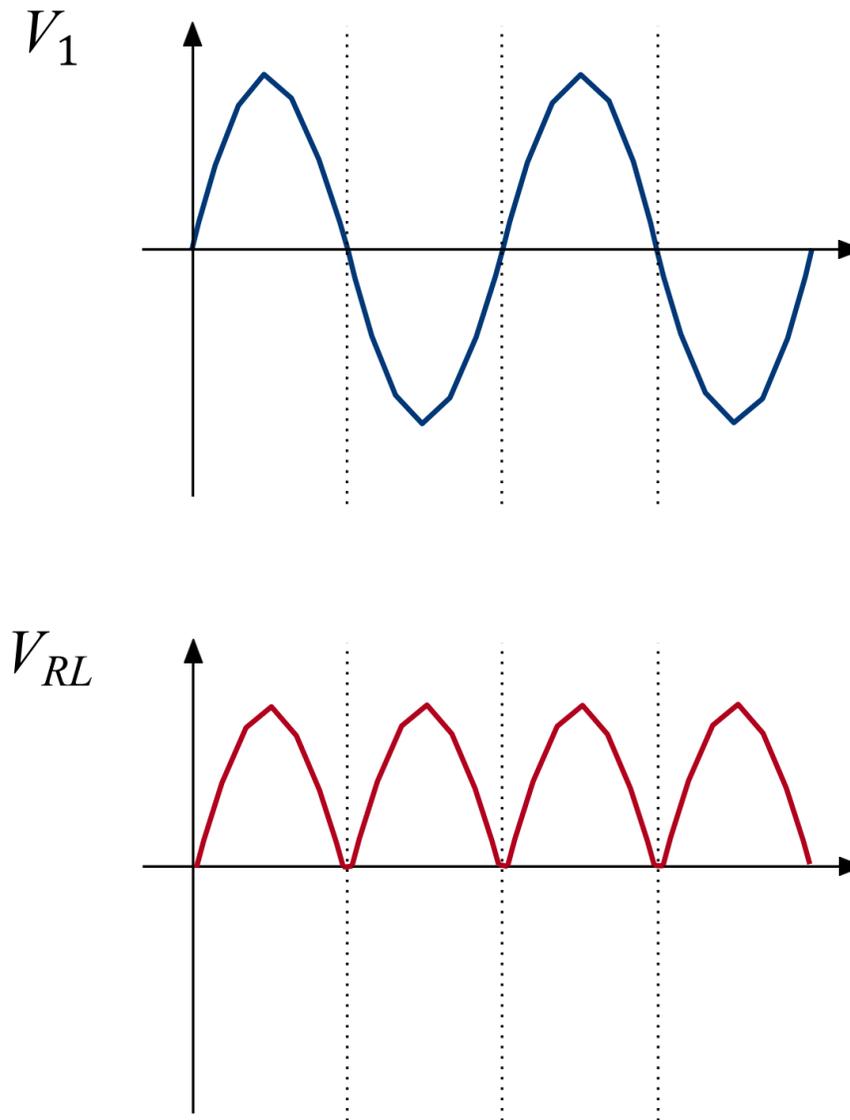
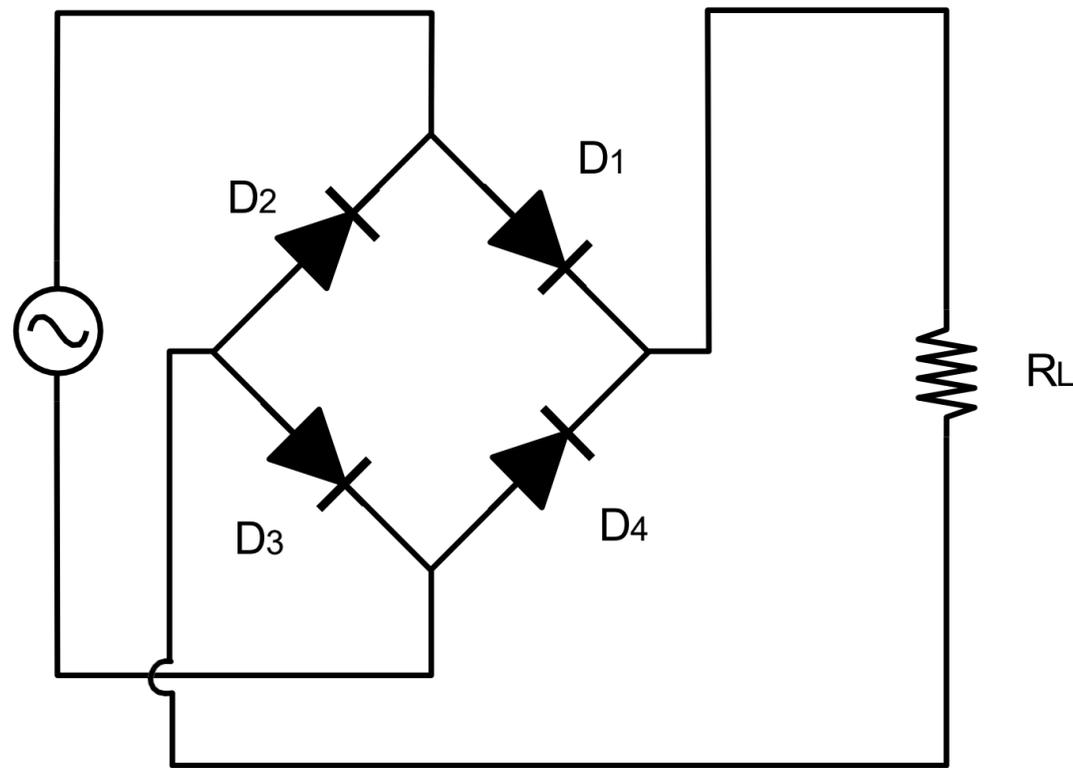
Aplicaciones con Diodos: Rectificador de onda completa



Aplicaciones con Diodos: Rectificador de onda completa



Aplicaciones con Diodos: Rectificador de onda completa





Aplicaciones con Diodos: Regulador de voltaje

Su misión es evitar que los márgenes de fluctuación de voltaje en un punto excedan los valores especificados.

