

Diodos

■ Resumen

Diodos

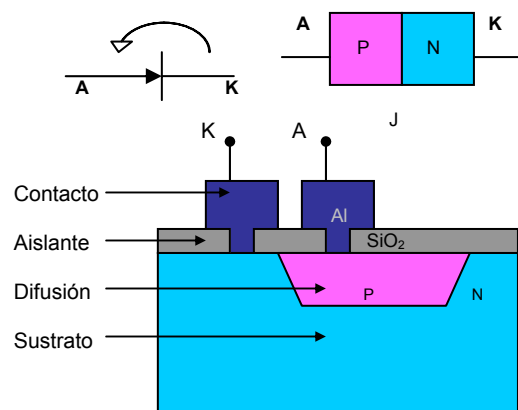
Caracterización:

- Dispositivo de dos terminales: Anodo y cátodo
- Presenta una corriente circulante por efecto de juntura que idealmente es función exponencial de la tensión V aplicada en sus bornes

$$I = I_s \left(e^{\frac{V}{n_1 V_T}} - 1 \right)$$

donde I_s es la corriente de saturación inversa, n_1 un coeficiente de idealidad y V_T es el potencial eléctrico de la temperatura que es función de la carga del electrón $q=1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}$, la constante de Boltzmann $k=1,381 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$ y T la temperatura absoluta

$$V_T = \frac{kT}{q}$$



Símbolo esquemático del diodo, diagrama simplificado de una juntura y corte transversal de un diodo integrado

A su vez, ocurren otros efectos que deforman la curva:

★ Polarización directa:

- **Alta inyección:** Para alta tensión el dispositivo tiene comportamiento óhmico porque la zona de deserción se achica tanto que la tensión cae principalmente fuera de ella (en las zonas cuasineutras). La corriente es proporcional a la tensión (recta con pendiente $1/R$)

$$I = \frac{V}{R} \quad \forall V \geq V_{critico}$$

★ Polarización inversa:

- **Ruptura Zener:** A partir de cierta tensión negativa, pequeña, la corriente crece abruptamente con un factor de multiplicación M_z por efecto túnel por lo que la tensión queda constante para cualquier corriente (recta casi vertical).

$$I = I_s M_z \quad \forall V \leq V_z$$

- **Ruptura de avalancha:** A partir de cierta tensión negativa grande, la corriente comienza a crecer abruptamente con un factor de multiplicación M_a por ionización de impacto de los portadores que liberan nuevos pares electrón-hueco. También la tensión se fija para cualquier corriente (recta casi vertical).

$$I = I_s M_a \quad \forall V \leq V_a$$

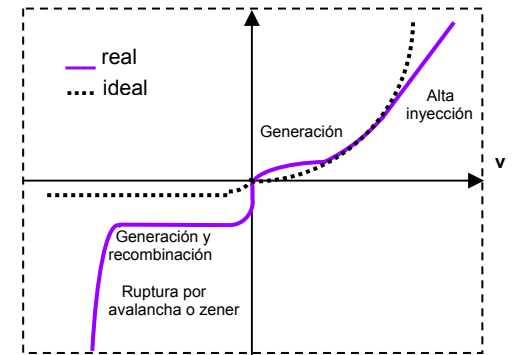
- **Perforación:** A partir de cierta tensión negativa la corriente queda limitada por el circuito externo. Esto ocurre porque la zona de deserción alcanza el contacto óhmico y el campo eléctrico provee electrones como si estuviera en cortocircuito.

$$I = \frac{|V - V_p|}{R} \quad \forall V \leq V_p$$

★ Polarización directa e inversa:

- **Generación y recombinación:** A la corriente I_s , se agrega otra, I_{sr} , por recombinación de portadores en la zona de deserción para polarización directa, y en inversa, por generación de portadores en dicha zona afectada por un factor de idealidad n_2

$$I = I_s \left(e^{\frac{V}{n_1 V_T}} - 1 \right) + I_{sr} \left(e^{\frac{V}{n_2 V_T}} - 1 \right)$$



Corriente versus tensión en un diodo

Tipos:

- Según su proceso de fabricación
- ★ Discretos
 - Diodo común
 - Diodo Zener
 - Diodo Shockley
 - Varactor
 - Varistor
 - Diodo de recuperación escalón
 - Fotodiodo
 - LED
- ★ Integrados

Regiones de polarización

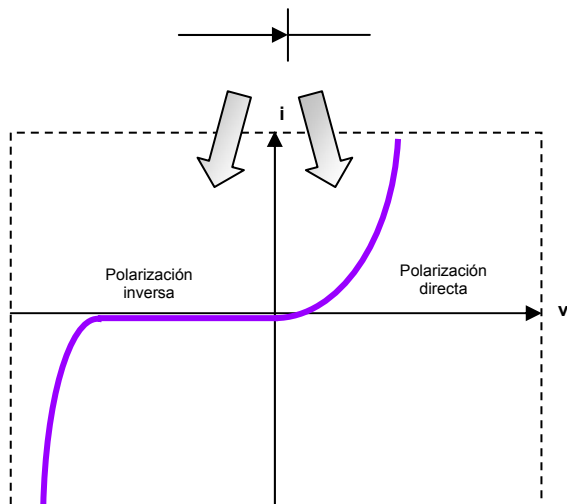
En un diodo, el modo de operación depende de la manera en la que se aplique la tensión entre sus bornes, es decir, de la forma de polarización de la juntura.

Polarización directa: El cátodo se polariza a un potencial inferior al del ánodo.

Polarización inversa: El cátodo se polariza a un potencial superior al del ánodo.

► Diodo real

En polarización directa, el diodo conduce una corriente que crece exponencialmente con la tensión aplicada. En polarización inversa, el diodo conduce una corriente despreciable, hasta alcanzar la tensión de ruptura. A partir de allí, para un pequeño crecimiento de la tensión inversa, la corriente crece abruptamente en el sentido negativo.



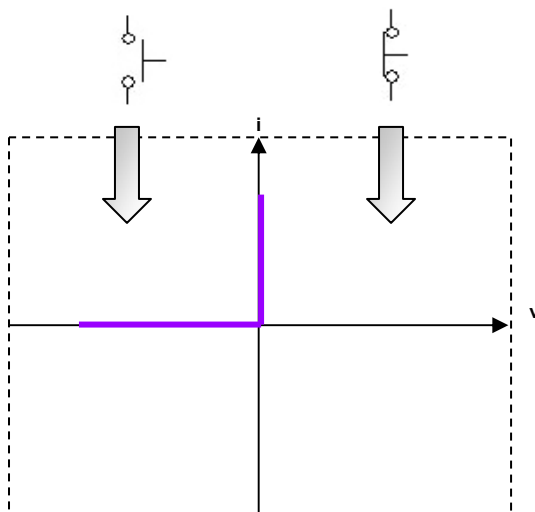
Curva característica de tensión y corriente en el diodo

Modelos equivalentes

Existen varios circuitos equivalentes que modelan aproximadamente el comportamiento de un diodo, con mayor o menor exactitud. Los modelos están compuestos por componentes lineales, interruptores y fuentes dependientes. Para el estudio de un circuito con diodos, puede reemplazarse ese dispositivo por el modelo equivalente haciendo más sencillo el análisis.

► Diodo ideal

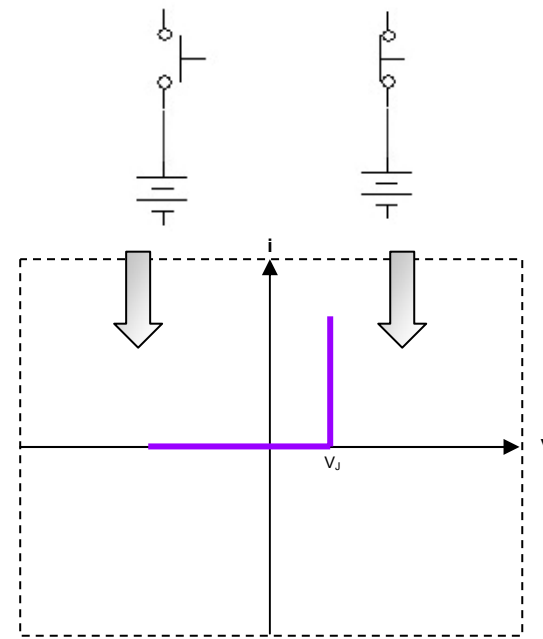
Consiste en considerar al diodo como un interruptor abierto en polarización inversa y cerrado en directa. Esto modela el comportamiento rectificante del diodo como si fuera un interruptor ideal que se cierra cuando la tensión entre ánodo y cátodo es positiva, por lo que el diodo conduce, y se abre cuando es negativa, por lo que el diodo deja de conducir corriente.



Curva característica del modelo ideal

► 2^{da} aproximación del diodo

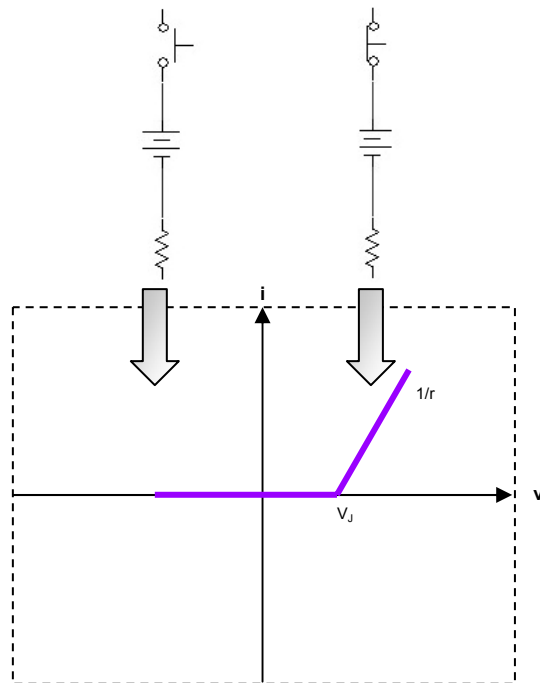
Consiste en considerar al diodo como una fuente de tensión continua que representa el potencial de juntura V_j en serie con el interruptor que se encuentra abierto en polarización inversa y cerrado en directa. Esto modela el comportamiento del diodo como si fuera un interruptor ideal que se cierra cuando la tensión entre ánodo y cátodo es mayor que la tensión de juntura (usualmente de 0,6 a 0,7V), por lo que el diodo conduce, y se abre cuando es menor que dicha tensión, por lo que el diodo deja de conducir corriente. Este modelo es apropiado cuando las tensiones usadas son del orden del potencial de juntura.



Curva característica de la 2^{da} aproximación

► 3^{er} aproximación del diodo

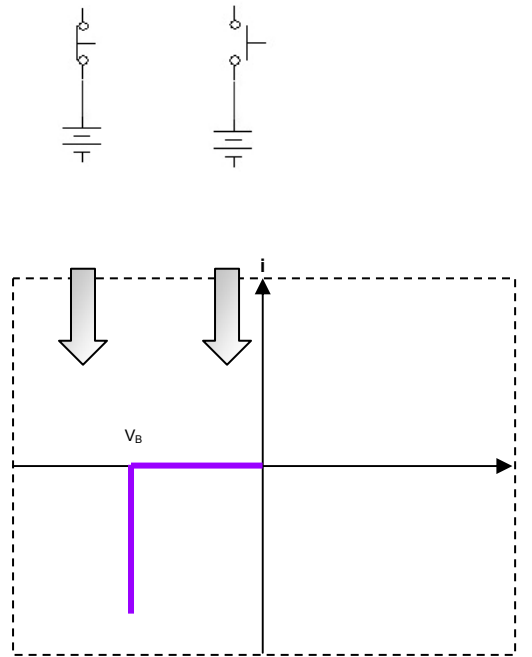
Consiste en considerar al diodo como un resistor r_d que modela la pendiente de la curva exponencial, en serie con la fuente de continua V_J y el interruptor que se abre en polarización inversa y se cierra en directa. A los modelos anteriores, le aproxima la curva exponencial de la característica del diodo como una recta. La zona lineal resultante permite considerar al diodo en esa región de funcionamiento como una resistencia ya que un resistor es un componente cuya característica es que la corriente es linealmente proporcional a la tensión. Este modelo reproduce más fielmente el comportamiento del diodo, pero a veces la mejora introducida no se justifica en relación a las complicaciones que produce en los cálculos.



Curva característica de la 3^{er} aproximación

► 2^{da} aproximación del diodo en ruptura

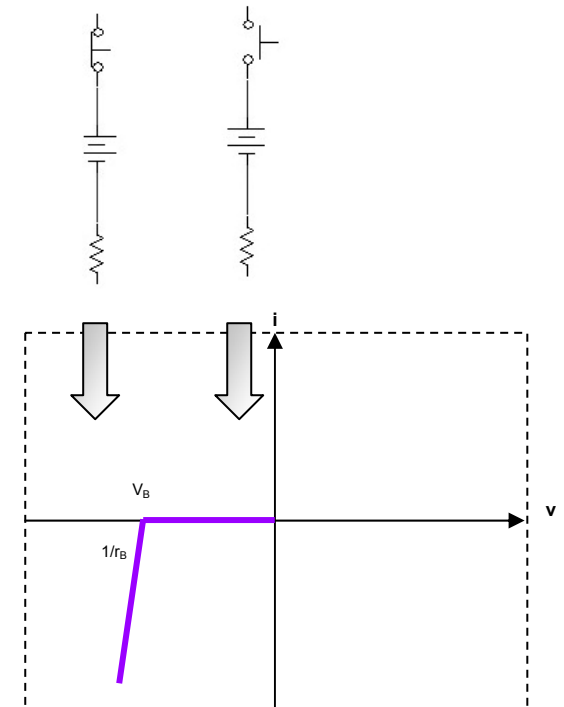
Consiste en considerar al diodo como una fuente de tensión que representa el potencial de ruptura V_B , en serie con un interruptor abierto en polarización inversa y cerrado cuando se alcanza la tensión de ruptura. Esto modela el comportamiento en la zona de ruptura por efecto zener o avalancha como si fuera un interruptor ideal que se abre cuando la tensión entre ánodo y cátodo es negativa pero menor a la de ruptura, y se cierra al alcanzar dicha tensión, quedando fija para cualquier corriente que circule. Este modelo es apropiado para la mayoría de los casos en los que el diodo funciona como regulador manteniendo fija la tensión en el entorno de la tensión de ruptura para cualquier corriente variando dentro de ciertos límites.



Curva característica de la 2^{da} aproximación en ruptura

► 3^{er} aproximación del diodo en ruptura

Consiste en considerar al diodo como un resistor r_B en serie con una fuente de tensión V_B y un interruptor abierto en polarización inversa y cerrado cuando se alcanza la tensión de ruptura. Esto modela el comportamiento en la zona de ruptura como en el caso anterior, pero aproxima la curva exponencial de la ruptura como una recta. En general, aun para grandes cambios en la corriente circulante, la tensión varía muy poco en ruptura, por lo que la mejora introducida en este modelo a veces no se justifica comparándola con las complicaciones que introduce en los cálculos.



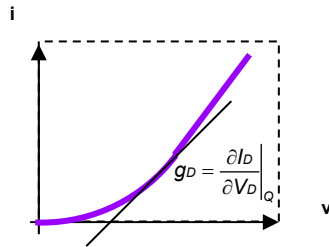
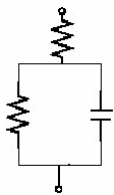
Curva característica de la 3^{er} aproximación en ruptura

Modelo SPICE

El modelo SPICE del diodo consiste en un circuito equivalente que representa aproximadamente el comportamiento de un diodo con todos sus efectos. Se utiliza extendidamente en programas de simulación de circuitos. Los parámetros del modelo se ajustan en función de los valores de los parámetros físicos de fabricación del dispositivo en cuestión.

Para un análisis con pequeñas variaciones de la tensión en el entorno de un punto de polarización fijo de corriente continua, se utiliza el modelo de pequeña señal. Consiste en un resistor cuya transconductancia $g_D = r_D^{-1}$ es variable, en paralelo con un capacitor que modela la capacidad de difusión de la juntura C_D . A su vez, se considera en serie un resistor que representa la resistencia R_s que presentan los contactos y las regiones de material semiconductor fuera de la zona de deserción.

$$g_D = \frac{\partial I}{\partial V} \bigg|_Q = \frac{I_s e^{-\frac{V}{nV_T}}}{nV_T} \cong \frac{I_Q}{nV_T}$$

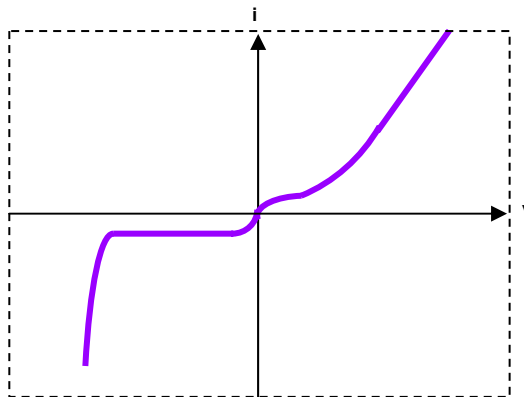
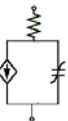


Curva del modelo SPICE en pequeña señal

Para el análisis del punto de polarización se utiliza el modelo de gran señal. Este consiste en una fuente de corriente dependiente de la tensión, en paralelo con un capacitor de capacidad C_D gobernada por la tensión. También se representa la resistencia R_s vista en serie.

$$I(V) = \begin{cases} I_s \left(e^{\frac{V}{nV_T}} - 1 \right) & \text{si } -5V_T \leq V \\ -I_s & \text{si } -V_B \leq V \leq -5V_T \\ -I_s \left(e^{\frac{V-V_B}{V_T}} - 1 + \frac{V_B}{V_T} \right) & \text{si } V < -V_B \end{cases}$$

$$C_D(V) = \frac{\tau I_s}{nV_T} e^{\frac{V}{nV_T}} + \frac{C_{J0}}{\left(1 - \frac{V}{V_J}\right)^m}$$



Curva del modelo SPICE para gran señal

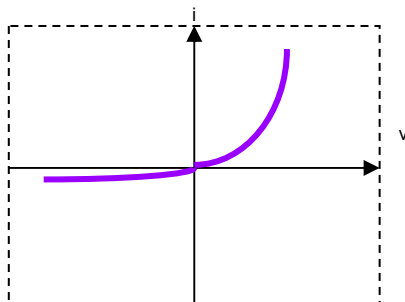
	Parámetro	Unidad	X defecto
VJ	Potencial de juntura	V	1
TT	Tiempo de tránsito	S	0
M	Coefficiente de graduación de juntura		0.5
EG	Energía de activación	EV	1.11
IS	Corriente de saturación	A	$1 \cdot 10^{-14}$
N	Coefficiente de emisión		1
XTI	Exponente de temperatura de IS		3
ISR	Parámetro de corriente de recombinación	A	0
NR	Coefficiente de emisión para ISR		2
BV	Tensión inversa de ruptura	V	∞
IBV	Corriente inversa de ruptura	A	$1 \cdot 10^{-10}$
NBV	Factor de idealidad de ruptura inversa		1
IBVL	Corriente de codo de ruptura inversa de bajo nivel	A	0
NBVL	Factor de idealidad de ruptura inversa de bajo nivel		1
TBV1	Coefficiente lineal de temperatura de BV	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	0
TBV2	Coefficiente cuadrático de temperatura de BV		0
IKF	Corriente de codo de alta inyección	A	∞
TIKF	Coefficiente lineal de temperatura de IKF	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	0
RS	Resistencia serie parásita	Ω	0
TRS1	Coefficiente lineal de temperatura de RS		0
TRS2	Coefficiente cuadrático de temperatura de RS	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	0
CJO	Capacitancia de juntura en polarización nula	F	0
FC	Coefficiente de capacitancia de deserción directa		0.5
KF	Coefficiente de ruido Flicker		0
AF	Exponente de ruido Flicker		1

Tabla de parámetros del modelo SPICE

Punto de operación del diodo

Curva característica del diodo

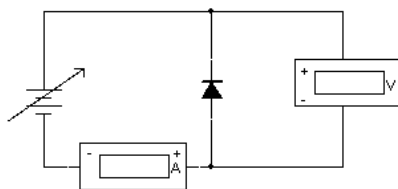
- ★ Es la gráfica de i en función de v de un dispositivo.



- ★ Está dada por la ecuación del dispositivo.

$$I = I_s \left(e^{\frac{V}{nV_T}} - 1 \right)$$

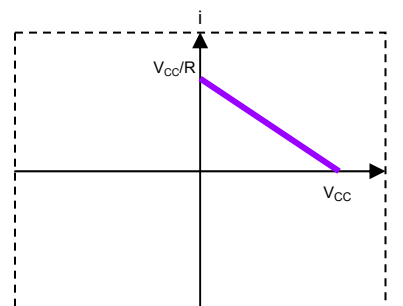
- ★ Es independiente del circuito al que se conecte.



- ★ Puede relevarse introduciendo al diodo en un circuito de prueba cualquiera. En dicho circuito, se mide la tensión en bornes del diodo y la corriente circulante por él mientras se varía alguno de los dos parámetros (tensión o corriente).

Recta de carga

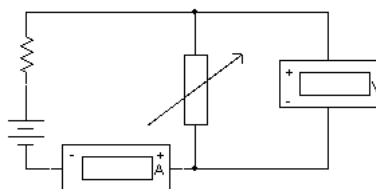
- ★ Es la gráfica de i en función de v para un circuito.



- ★ Se deduce de la ecuación de la malla.

$$V_{cc} - iR - v = 0 \Rightarrow i = -\frac{1}{R}v + \frac{V_{cc}}{R}$$

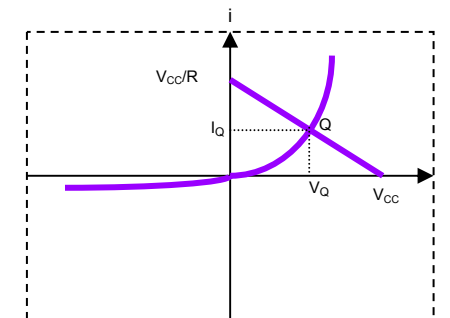
- ★ Es independiente del dispositivo que se conecte.



- ★ Puede relevarse introduciendo en el circuito un elemento de prueba cualquiera. En dicho elemento (por ejemplo un resistor variable) se hace variar la tensión o la corriente mientras se miden los dos parámetros (tensión y corriente).

Punto Q de operación en reposo

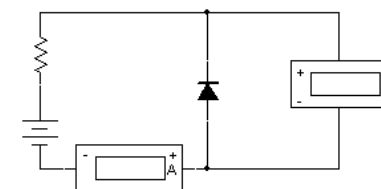
- ★ Es la intersección de las gráficas de i en función de V del dispositivo y del circuito.



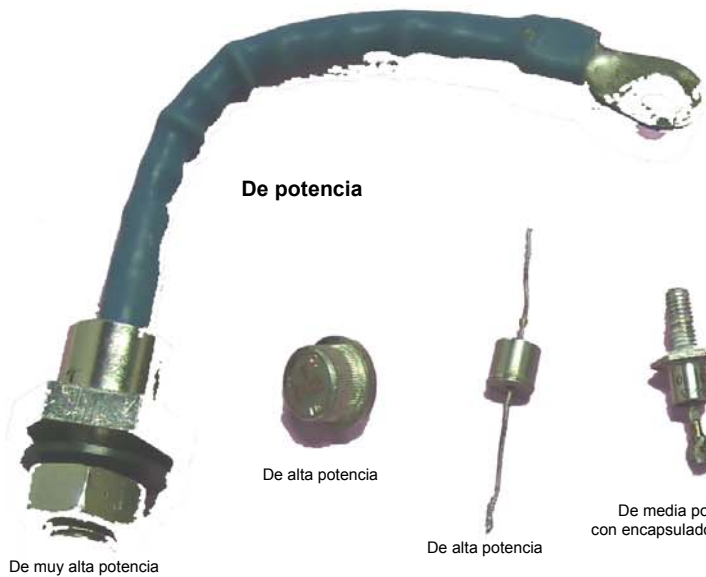
- ★ Se obtiene resolviendo el sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas de la característica del dispositivo y del análisis de la malla

$$\begin{cases} i = I_s \left(e^{\frac{v}{nV_T}} - 1 \right) \\ V_{cc} - iR - v = 0 \Rightarrow i = -\frac{1}{R}v + \frac{V_{cc}}{R} \end{cases}$$

- ★ Representa el punto de funcionamiento del dispositivo en el circuito.



DIODOS



De potencia



Diodos Schotky
(pares empaquetados)



Puente rectificador



Celdas fotovoltaicas



Normales

De montaje superficial



Emisores de luz (LED)



Arreglo de 7 segmentos

Fotodiodos



Optoacoplador

