

TEMA 1. Principios Básicos de Semiconductores

CONDUCTORES, AISLANTES Y SEMICONDUCTORES.

Una de las propiedades características de los materiales es la resistividad (ρ), que es la inversa de la conductividad (σ). En función del valor de dicha propiedad los materiales son:

- ◻ SEMICONDUCTORES $\rho \approx 10^{-2}$
- ◻ CONDUCTORES $\rho \approx 10^{-6}$
- ◻ AISLANTES $\rho \approx 10^4$

DIFERENCIAS PRINCIPALES

SEMICONDUCTORES	CONDUCTORES
<ul style="list-style-type: none"> • Tienen dos tipos de portadores <ul style="list-style-type: none"> ▪ Huecos ▪ Electrones • Al aumentar la temperatura disminuye la resistividad 	<ul style="list-style-type: none"> • Tienen un solo tipo de portador <ul style="list-style-type: none"> ▪ Electrones • Al aumentar la temperatura aumenta la resistividad

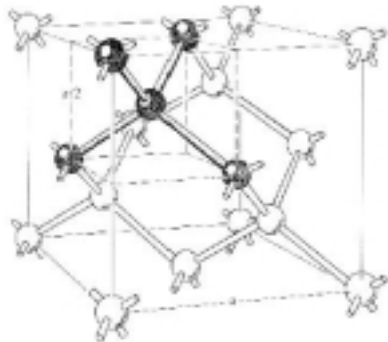
Los SEMICONDUCTORES son sólidos cristalinos con enlaces covalentes. Podemos distinguir:

Elementales: Si, Ge.

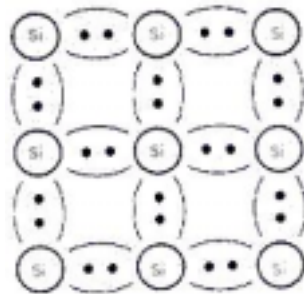
Compuestos: AsGa, PGa, OZn, y otras aleaciones.

La estructura cristalina del Si, base de la “inteligencia artificial”, es idéntica a la del C, base de la “inteligencia humana”; se trata de la *estructura diamantina*:

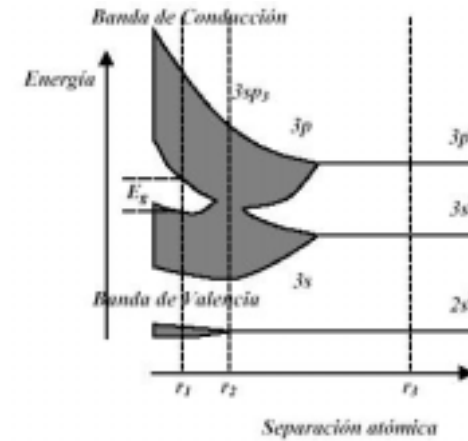
Representación tridimensional



Representación bidimensional

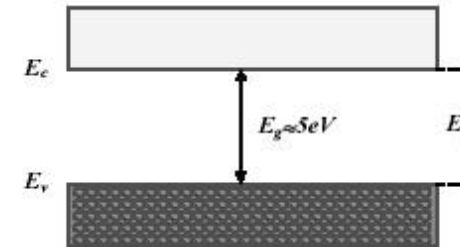


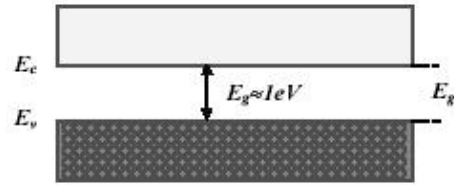
Para estudiar las propiedades de conducción de los semiconductores se utiliza el modelo de Bandas de Energía, basado en la aglomeración de los diferentes niveles de energía de los orbitales atómicos. Se forman tres tipos de bandas:



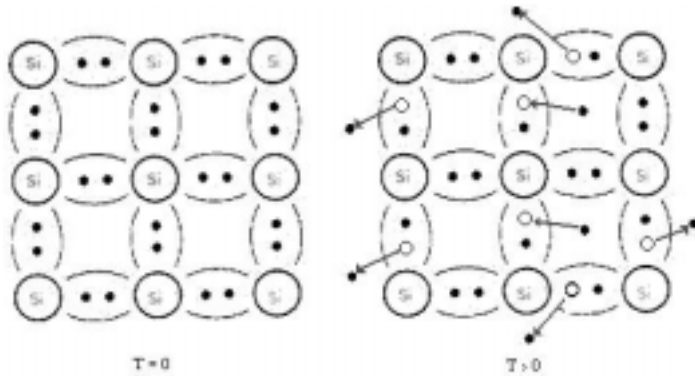
- Banda de Electrones de Valencia (BV)
- Banda de Electrones de Conducción (BC)
- Banda Prohibida (BP) o gap

La distancia que define la periodicidad de una red cristalina, determina el grado de interacción entre los electrones de los orbitales externos (valencia), de modo que las Bandas de Conducción y de Valencia pueden adoptar diferentes configuraciones, dependiendo si quedan separadas por una Banda Prohibida, o si resultan solapadas, así como por el grado de ocupación de los orbitales contenidos en cada capa. Así, si la distancia de cristalización se correspondiese con r₁ las Bandas de Conducción y de Valencia quedarían separadas por una Banda Prohibida de valor E_g (energía del gap). Estos materiales no son conductores de modo espontáneo. Si el valor de E_g supera los 2 eV, el material tiende a ser aislante, ya que resultará difícil conseguir que algún electrón de la Banda de Valencia salte a la Banda de Conducción para que facilite el movimiento de carga.

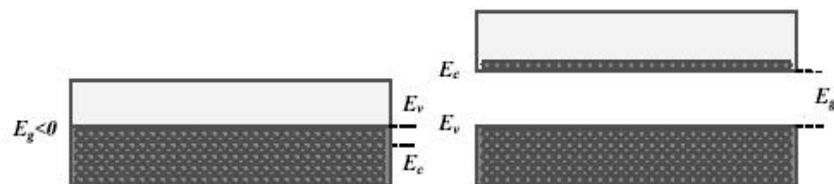




Si la Banda de Conducción y la Banda de Valencia quedan separadas por distancias energéticas de alrededor de 1 eV, como es el caso del Si, algunos estados en la Banda de Conducción pueden ser ocupados por electrones que hayan saltado desde la Banda de Valencia (esto significa que se han salido de su posición de enlace habitual, o que han roto el enlace), y en este caso el material será débilmente conductor, pero sólo a partir de una cierta temperatura, ya que a 0°K el material será totalmente aislante. A este tipo de materiales se le denomina Semiconductores.



Si la distancia de cristalización corresponde al caso r_2 da lugar a un solapamiento de la Banda de Conducción y la de Valencia, y en este caso los electrones pueden moverse con total libertad, pues romper un enlace para conducir requiere muy poca energía, y a temperaturas fuera de los 0°K esto sucede de forma natural. Este material es de tipo Conductor. Es posible para un conductor, que las Bandas de Conducción y de Valencia se hallen separadas, pero la Banda de Conducción tenga parte de sus estados ocupados.

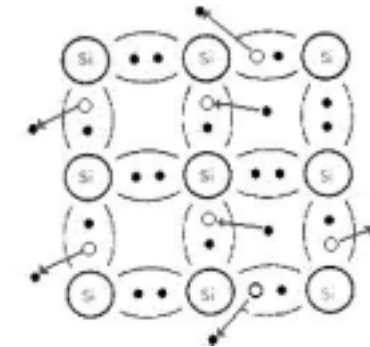


TIPOS DE SEMICONDUCTORES

Los **Semiconductores Intrínsecos** son aquellos materiales que presentan una conductividad nula a bajas temperaturas, pero que pueden ser débilmente conductores a temperatura ambiente, debido a que la anchura de la Banda Prohibida no es elevada, lo que hace que la resistividad del material, con ser alta no sea infinita. Algunos de los semiconductores intrínsecos, o en estado de máxima pureza más conocidos son el Silicio (Si), el Germanio (Ge), o el Arseniuro de Galio (AsGa). La tabla muestra la anchura de la Banda Prohibida para los mismos.

Símbolo	Nombre	Ancho BP (eV)	Mov. elec. (cm ² /V.s)	Mov. huecos (cm ² /V.s)	Dist. crist. (Å)
SPb	Galema	0,37	575	200	3,93
NZn	Blenda	3,60	110	-	3,41
Ge	Germanio	0,67	3900	1900	3,65
Si	Silicio	1,11	1350	480	3,43
AsGa	Arseniuro de Galio	1,43	8500	400	3,65

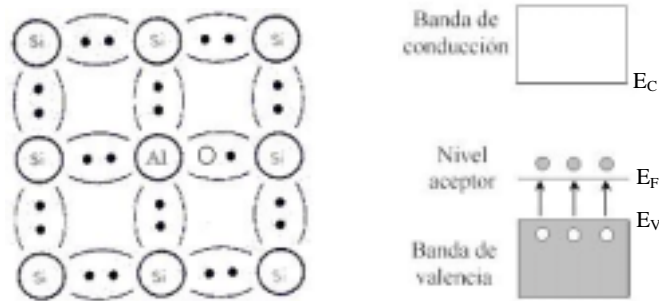
En este tipo de semiconductor existe un equilibrio entre el número de **electrones** libres (**n**) y el número de **huecos** libres (**p**)



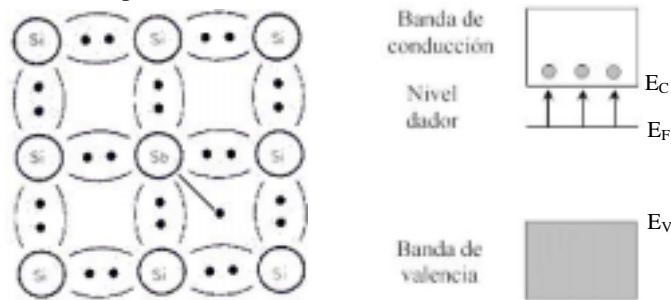
Los **semiconductores extrínsecos**, son aquellos en que se ha introducido un elemento contaminante, llamado impureza, generalmente del grupo III o V de la tabla periódica, que cambia drásticamente las propiedades de conducción del material intrínseco, reduciendo enormemente la resistividad del mismo. Se distinguen dos tipos de semiconductores extrínsecos:

- TIPO P (n < p)
- TIPO N (n > p)

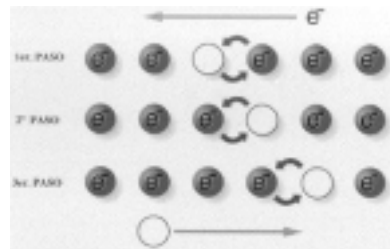
Si el material contaminante es del tipo III (B, Al, Ga, In), los átomos de dicho material completan solamente tres enlaces covalentes, quedando un enlace covalente incompleto, que puede ser completado por un electrón de un orbital vecino de un átomo de Si con una pequeña aportación de energía del entorno. Si esto sucede, se genera un hueco. La consecuencia de impurificar con este tipo de materiales, llamados **aceptadores**, es la aparición de un **hueco** por cada átomo de impureza introducido en el cristal. El semiconductor tiene entonces un exceso de huecos ($n < p$). Se trata de un tipo **p**.



Si la impureza es del grupo V (P, As, Sb) se completarían los cuatro enlaces covalentes con los cuatro átomos vecinos de Si, sobrando un electrón débilmente ligado, que podría pasar a la Banda de Conducción. Este tipo de material recibe el nombre de donador y al existir un exceso de electrones ($n > p$) el semiconductor es del tipo **n**.



Al aplicarle a la un semiconductor una excitación externa, se logra un flujo ordenado de los electrones y de los huecos. Son los electrones libres los que realmente se mueven, pero el sentido de la corriente eléctrica, por convenio, se toma en sentido contrario.



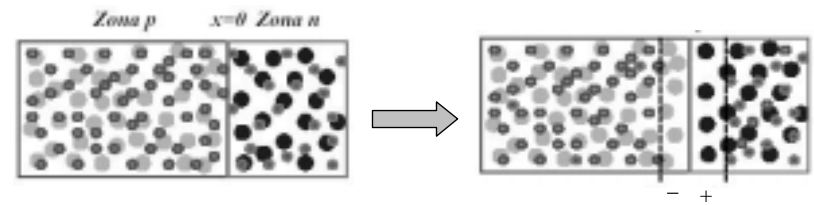
LA UNIÓN P-N

Se trata de la unión de un semiconductor tipo p y uno de tipo n. Su fruto será la obtención de un dispositivo semiconductor llamado diodo de unión.

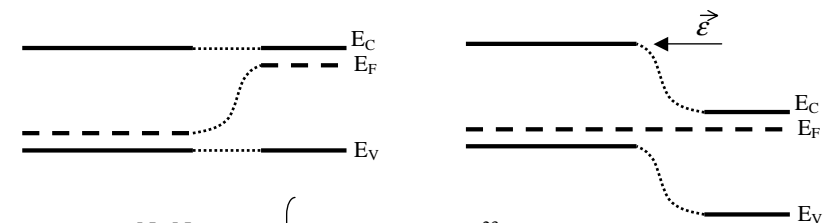
Desde el punto de vista de su forma de operación, el dispositivo semiconductor más simple y fundamental es el diodo; todos los demás dispositivos pueden entenderse en base a su funcionamiento.

Cuando un semiconductor de tipo n y otro del tipo p se “unen”, las concentraciones inicialmente desiguales de electrones y huecos dan lugar a una transferencia de electrones a través de la unión desde el lado p al n y de huecos desde el lado n al p. Como resultado, se crea una doble capa de carga en la unión semejante a la de un condensador de placas paralelas, siendo negativo el lado p y positivo el lado n.

Ya que esta región se ha vaciado de carga libre se le denomina región de vaciamiento, (o región de carga espacial, o región de transición).



En atención a las bandas de energía E_F debe ser constante, con lo que se produce una curvatura de las bandas de energía. Esta curvatura implica la aparición de un campo eléctrico hacia la izquierda, y como consecuencia una variación de potencial en la zona de transición, el potencial de contacto V_{bi} .



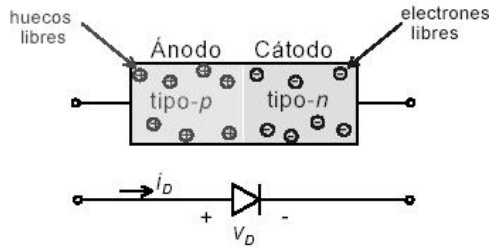
$$V_{bi} = V_T \ln \frac{N_d N_a}{n_i^2}$$

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

$$\left\{ \begin{array}{l} K = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K} \\ T = 300^\circ \text{ K} \\ q = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C} \\ V_T (T=300\text{K}) = 0.0259 \text{ V} \\ n_i (T=300\text{K}) = 1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3} \end{array} \right.$$

DIODOS

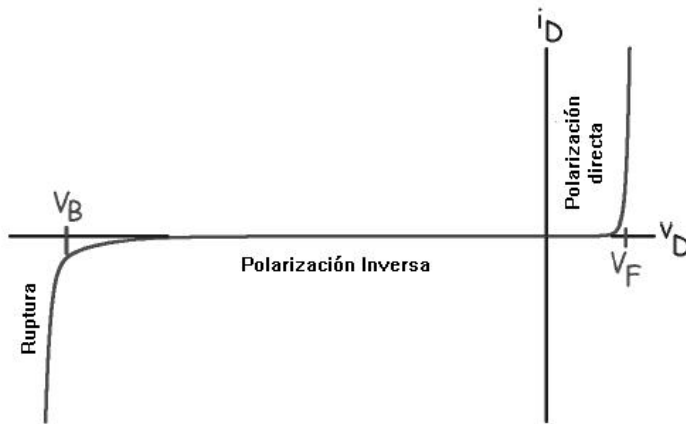
Un diodo es básicamente una unión p-n. Se trata de un dispositivo semiconductor que permite el paso de la corriente en un solo sentido.



Cuando aplicamos un voltaje externo a la unión que facilite la combinación entre electrones y huecos, la corriente fluye fácilmente. La unión está entonces directamente polarizada ($V_D > 0$).

Cuando aplicamos un voltaje opuesto sólo circula un pequeña corriente que puede despreciarse. La unión está inversamente polarizada ($V_D < 0$).

Se puede aplicar un voltaje negativo suficientemente grande como para forzar la corriente en sentido inverso, se entra entonces en una zona de ruptura o avalancha. La característica I-V del diodo es:



V_F es la tensión directa de polarización y vale aproximadamente 0.7 V. V_B es la tensión de ruptura y varía entre 3.3 V y kV según el tipo de diodo. En polarización inversa la corriente que fluye por el diodo es negativa y con un valor $I_S \approx 10^{-12}$ A. Se puede modelar por la ecuación de Shockley:

$$I_D = I_S (e^{V_D/nV_T} - 1) \quad V_D = nV_T \ln\left(\frac{I_D}{I_S} + 1\right)$$

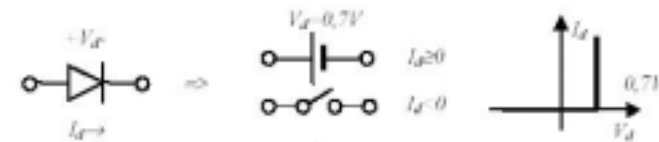
MODELOS MATEMÁTICOS SIMPLIFICADOS PARA LOS DIODOS.

Debido a la complejidad de la ecuación de Shockley, en la resolución de circuitos con diodos se suelen usar otros modelos más simples.

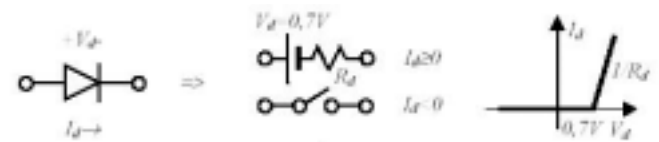
El primero de ellos es el Modelo Elemental de Conmutador de Corriente, según el cual, cuando la tensión supere el cero, la corriente puede dispararse hasta el infinito, mientras que en sentido contrario se producirá un bloqueo total de corriente.



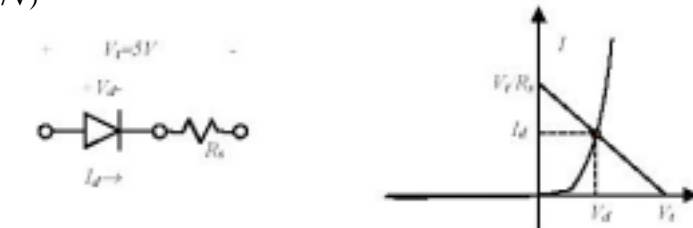
El segundo de los modelos es el Modelo de Conmutador de Corriente con caída de Tensión; es equivalente al anterior salvo que la tensión a vencer para que conduzca corriente es un valor dado $V_D = 0,7$ V, que es la tensión a la que la corriente comienza a despuntar claramente.



Finalmente, el Modelo de Conmutador de Corriente con caída de Tensión y Resistencia Equivalente. El valor de la resistencia R_d puede aproximarse por la inversa de la pendiente de la curva del diodo en el punto de arranque (V_F).



Usando dichos modelos podemos resolver este sencillo problema. ($R_s = 1k\Omega$, $V_F=0.7V$)

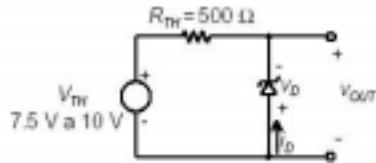


OTROS TIPOS DE DIODOS

ZENER

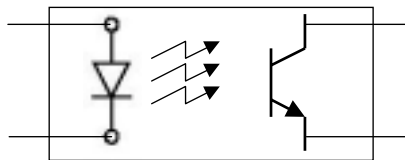
Se trata de un diodo que suele trabajar en la zona de ruptura. Cuando la tensión de ruptura V_B está por debajo de los 10V se suele denominar tensión Zener V_Z .

Cuando la tensión a la que está sometido el diodo trata de ser menor que V_Z se produce el efecto de avalancha y según la característica I-V del diodo el diodo se comporta como una fuente de alimentación con valor V_Z bastante estable. Por ello una de las aplicaciones es la estabilización y regulación de fuentes de tensión.



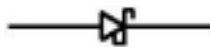
LED

Los diodos LED se basan en la recombinación de carga que tiene lugar cuando una unión p-n está fuertemente polarizada en directo. La colisión de un electrón con un hueco supone la reconstrucción de un enlace covalente, perdiendo el electrón el exceso de energía que portaba, que resulta emitida en forma de un fotón, bien en el espectro visible o del infrarrojo (**IRE**). Dicha radiación puede excitar la base de un transistor bipolar, obligándolo a proporcionar corriente. Un dispositivo así formado es un **optoacoplador**.



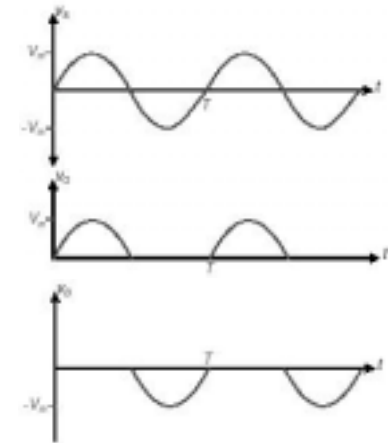
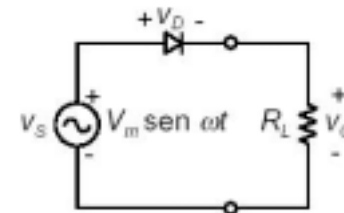
SCHOTTKY

Se trata de un diodo constituido por la unión de un semiconductor tipo n y un metal. El metal sustituye al semiconductor tipo p. Las ventajas es que conducen más rápidamente y su $V_F \cong 0.35V$. Las desventajas estriban en su mayor I_s y menor V_B . Su símbolo:



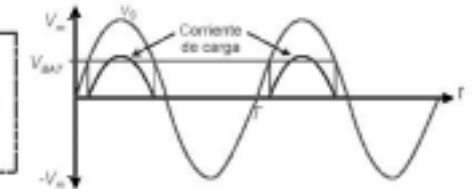
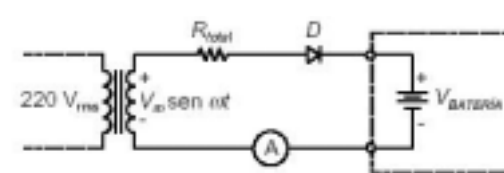
APLICACIONES: RECTIFICADOR DE MEDIA ONDA.

Esta aplicación permite convertir voltaje AC en DC. Durante el semiciclo positivo el diodo conduce (ON) y durante el semiciclo negativo no (OFF).



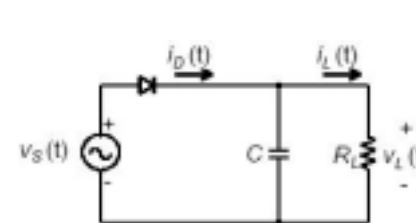
CIRCUITO CARGADOR DE BATERIA

La corriente fluye solo cuando $V_m \sin(\omega t) < V_{BAT}$.

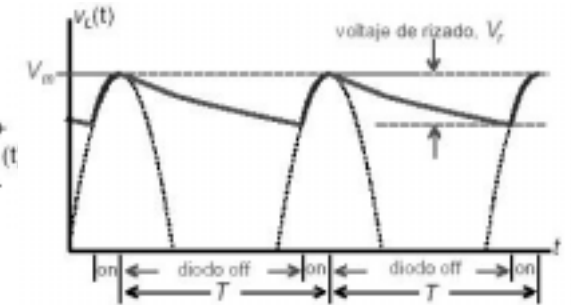


RECTIFICADOR FILTRADO

También llamado detector de pico, se construye con un rectificador y un condensador C en paralelo con la carga. El resultado es una señal prácticamente DC.

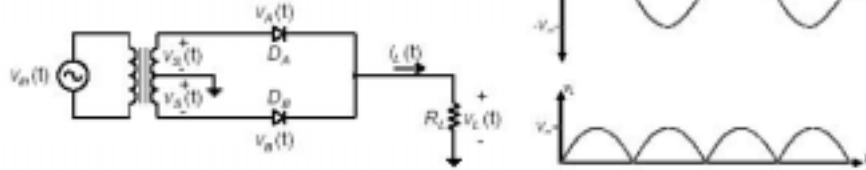


$$C \cong \frac{V_m}{V_r f R_L} \quad \text{si } V_r \ll 1$$



APLICACIONES: RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA I.

Este circuito usa un transformador con derivación central, creando dos fuentes de entrada efectivas.

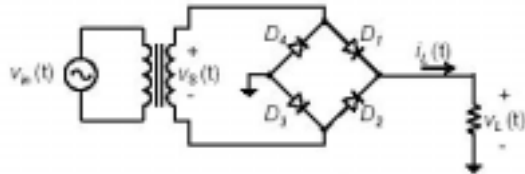


Durante el semiciclo positivo DA (ON) y DB (OFF). En el semiciclo negativo al contrario.



APLICACIONES: RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA II.

En lugar de usar un transformador con derivación central, este circuito usa un puente de diodos, resultando más barato y más moderno.



Semiciclo positivo: D1 y D3 (ON), D2 y D4 (OFF)
 Semiciclo negativo: D1 y D3 (OFF), D2 y D4 (ON)



RECTIFICADOR FILTRADO

Como la salida del rectificador es de “onda completa”, el condensador C se descarga aproximadamente la mitad de tiempo que el caso del rectificador de media onda.

$$C \cong \frac{V_m}{2V_r f R_L} \quad \text{si } V_r \ll 1$$

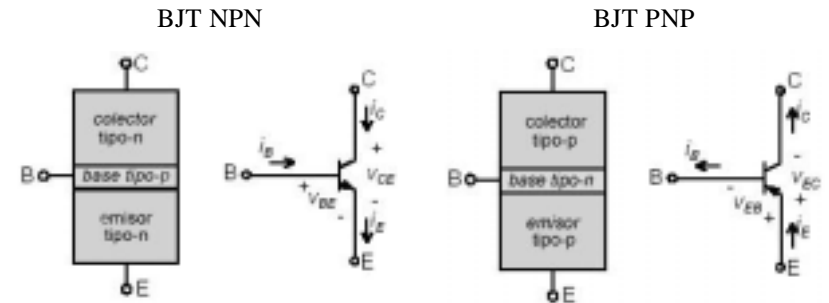
TRANSISTORES BIPOLARES BJT

BJT significa *Bipolar Junction Transistor* (Transistor de Unión Bipolar). Se trata de un dispositivo no lineal semiconductor basado en el diodo de unión p-n. Su uso fue frecuente hasta 1975, fecha a partir de la cual se usó más el transistor MOS. La tecnología bipolar actual hace uso preferentemente de un híbrido BICMOS.

Tienen dos principales aplicaciones:

- Como amplificador en circuitos analógicos
- Como conmutador en circuitos digitales

ACCIÓN DE TRANSISTOR: consiste en la captación de portadores minoritarios provenientes de una unión PN directamente polarizada, que los emite por otra unión PN inversamente polarizada y muy cercana a la anterior.



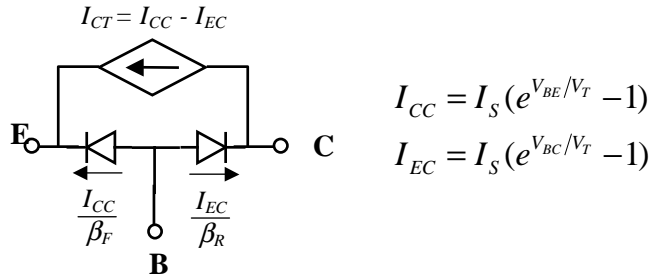
REGIONES DE OPERACIÓN TRANSISTOR NPN

REGIÓN	Unión B-E	Unión B-C	Característica
Corte (OFF)	Inversa	Inversa	$I_E = I_B = I_C = 0$
Activa Directa (ZAD)	Directa	Inversa	Amplificador
Saturación (SAT)	Directa	Directa	$V_{CE} \sim 0$
Activa Inversa (ZAI)	Inversa	Directa	Poco uso

MODELOS MATEMÁTICOS SIMPLIFICADOS PARA LOS BJT.

Las ecuaciones matemáticas que describen el comportamiento de los transistores Bipolares son las ecuaciones de Ebers-Moll. Debido a la complejidad de estas ecuaciones se suelen usar modelos más sencillos como en el caso de los diodos.

Un modelo muy usado es la versión Híbrida en π .



β_F es un parámetro típico de los transistores dado por el fabricante. Se calcula como:

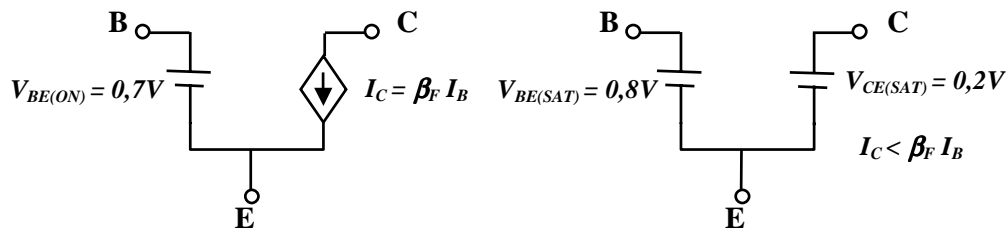
$$\beta_F = \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F}$$

dónde α_F se define como la relación entre la intensidad capaz de llegar al colector y la intensidad que entra en el emisor. Para la Z.A.I. se tiene β_R .

De una forma simple el transistor se puede modelar en un circuito como:

ZONA ACTIVA DIRECTA

ZONA DE SATURACIÓN



TRANSISTORES DE EFECTO CAMPO: FET

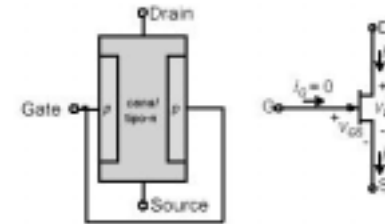
Dispositivos semiconductores de tres terminales. Tipos:

- JFET (Junction FET, MESFET)
- MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor FET, Insulated-Gate FET)

Son dispositivos de portadores mayoritarios (unipolares), cuyo funcionamiento se basa en la aplicación de un campo eléctrico para gobernar una corriente. Se modelizarán como fuentes de corriente controladas por tensión.

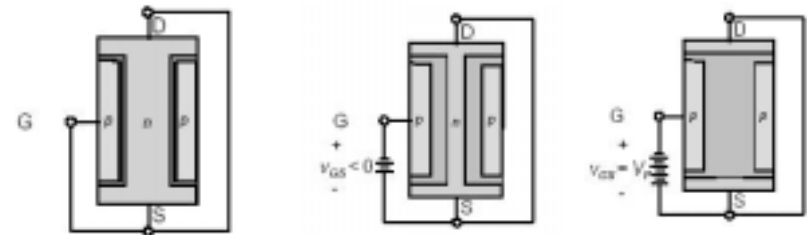
JFET DE CANAL N

Estructura:

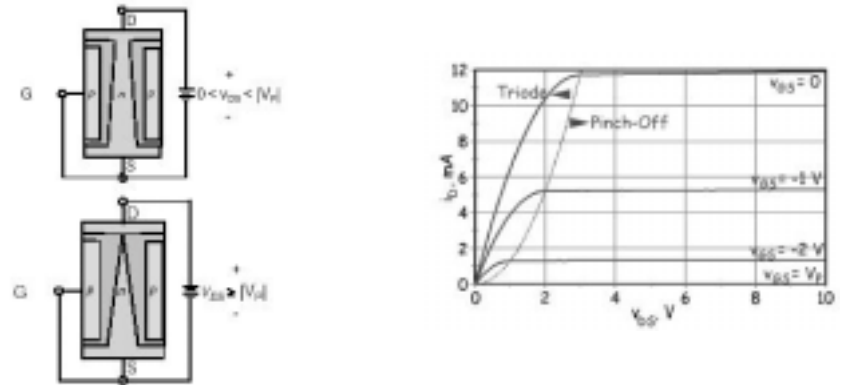


Operación:

ZONA LINEAL-OHMICA (Triode)



ZONA SATURACIÓN (Pinch-off)

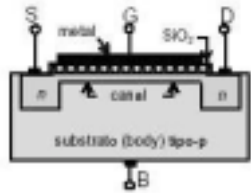


TRANSISTOR MESFET

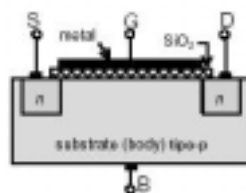
Es una variación del JFET construida en AsGa y con uniones metal-semiconductor (Schottky). Su comportamiento es similar, pero más rápido.

TRANSISTOR MOS DE CANAL N

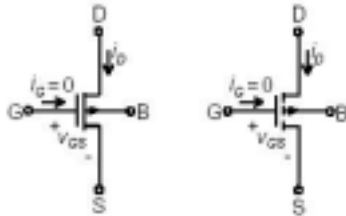
nMOS de Empobrecimiento



nMOS de enriquecimiento



Simbología:



Modos de Operación:

- Inversión Débil: bajas corrientes, funcionamiento similar al BJT
- Inversión Fuerte: grandes corrientes cuando $V_{GS} > V_{TH}$
 - Zona Subumbral o Corte ($V_{GS} < V_{TH}$)
 - Zona Ohmica o Lineal ($V_{GS} > V_{TH}$ y $V_{DS} < V_{GS} - V_{TH}$)
 - Zona Saturación ($V_{GS} > V_{TH}$ y $V_{DS} \geq V_{GS} - V_{TH}$)
- Inversión Moderada: entre las dos anteriores.

COMPARATIVA FETs

