

Tema 3 – Electrónica y Puertas Lógicas

3.1 Estructura electrónica de los átomos.

3.2 Teoría de la conducción: metales, aislantes, semiconductores.

3.3 Diodo de unión p-n: rectificador de corriente y puertas lógicas.

3.4 Diodo emisor de luz (LED).

3.5 Diodo Zener: limitador de tensión.

3.6 Transistores MOSFET de enriquecimiento. Puertas lógicas.

3.7 Inversor CMOS.

3.8 Retraso y potencia en circuitos digitales.

3.9 Lógica CMOS.

Introducción

La electrónica es la rama de la física y la especialización de la ingeniería, que estudia y emplea sistemas cuyo funcionamiento se basa en la conducción y el control del flujo microscópico de los electrones u otras partículas cargadas eléctricamente.

Una puerta lógica es un dispositivo electrónico el cual es la expresión física de un operador booleano en la lógica de conmutación. Cada puerta lógica consiste en una red de dispositivos interruptores que cumple las condiciones booleanas para el operador particular. Son circuitos de conmutación integrados en un chip.



3.1 Estructura electrónica de los átomos

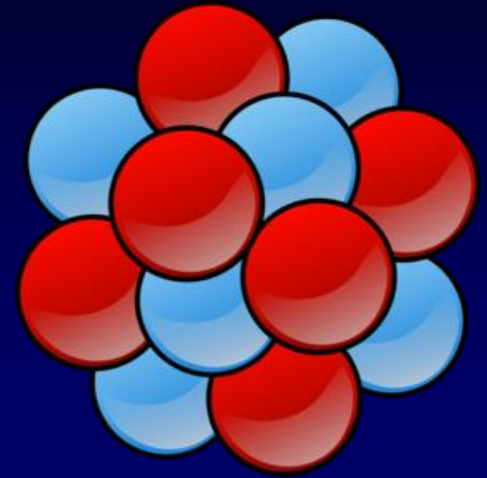
átomo (del griego ἄτομος, no divisible) es la unidad más pequeña de un elemento químico que mantiene su identidad o sus propiedades, y que no es posible dividir mediante procesos químicos.



- El átomo está formado por partículas más pequeñas, llamadas partículas subatómicas.
- El núcleo del átomo es su parte central.
- Tiene carga positiva, y en él se concentra casi toda la masa del mismo.
- El núcleo está formado por protones y neutrones.
- Alrededor del núcleo se encuentran los electrones, partículas de carga negativa y masa muy pequeña .

El núcleo atómico

El núcleo del átomo se encuentra formado por nucleones, los cuales pueden ser de dos clases:



Protones: una partícula con carga eléctrica positiva igual a una carga elemental $q = |e| = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ y una masa $m_p = 1,67262 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

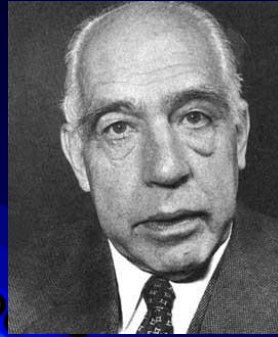
Neutrones: partículas carentes de carga eléctrica, y con una masa un poco mayor que la del protón $m_n = 1,67493 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

Las partículas subatómicas

<i>Nombre</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Masa</i>	<i>Carga</i>	<i>Descubrimiento</i>
protón	p	$1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	$+1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	Goldstein, 1886
electrón	e	$9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$	$-1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	Thomson, 1897
neutrón	n	$1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$		Chadwick, 1932

Átomo de Bohr

Fue propuesto en 1913 por el físico danés Niels Bohr, para explicar por qué los átomos presentaban espectros de emisión característicos.



Niels Bohr

En este modelo:

- los electrones giran en órbitas circulares alrededor del núcleo

$$k Z e^2 / r^2 = m_e v^2 / r$$

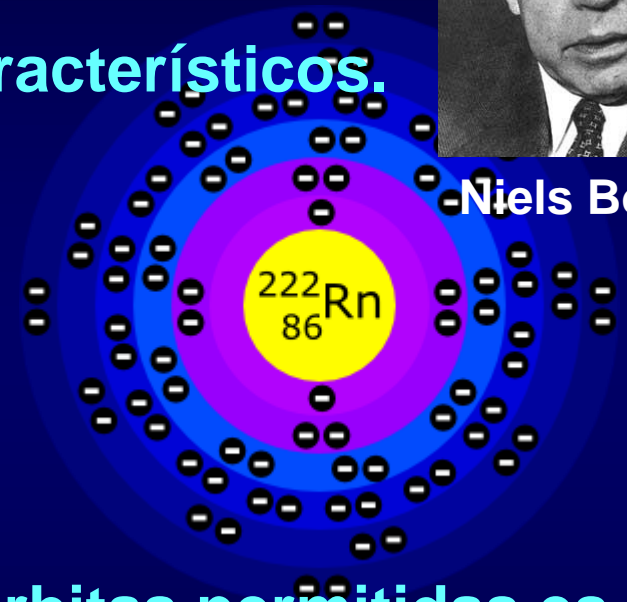
- el momento angular $L = m_e v r$, en las órbitas permitidas es un múltiplo entero de \hbar , $L = \hbar n$, n es número cuántico principal

- $r_n = n^2 a_0$ con radio de Bohr $a_0 = \hbar^2 / k m_e e^2 = 0.52 \times 10^{-10} \text{ m}$

- energía correspondiente a niveles permitidos $E_n = - Z^2 E_0 / n^2$

- energía del estado fundamental del átomo de Hidrógeno.

$$E_0 = - k^2 m_e e^2 / 2 \hbar^2 = -13.6 \text{ eV}$$



Espectro energético

El electrón sólo emite o absorbe energía en los saltos de una órbita permitida a otra. En dicho cambio emite o absorbe un fotón cuya energía es la diferencia de energía entre ambos niveles. Este fotón tiene una energía

$$E = h \nu = E_{n_i} - E_{n_f} \quad \text{donde}$$

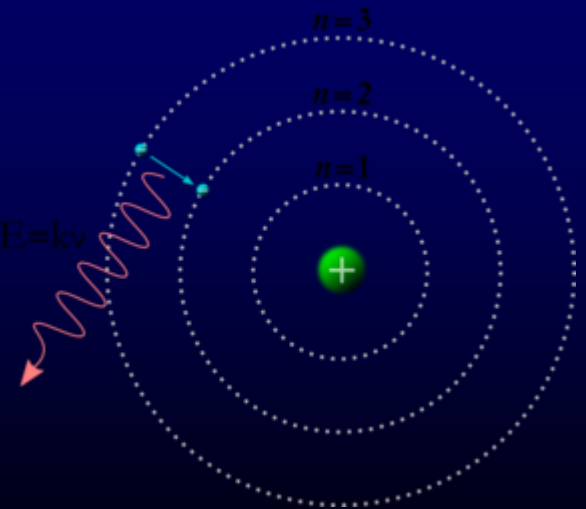
n_i identifica la órbita inicial,

n_f la final

ν la frecuencia

$h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ constante de Planck $\Delta E = h\nu$

$$1/\lambda = Z^2 R (1/n_f^2 - 1/n_i^2)$$



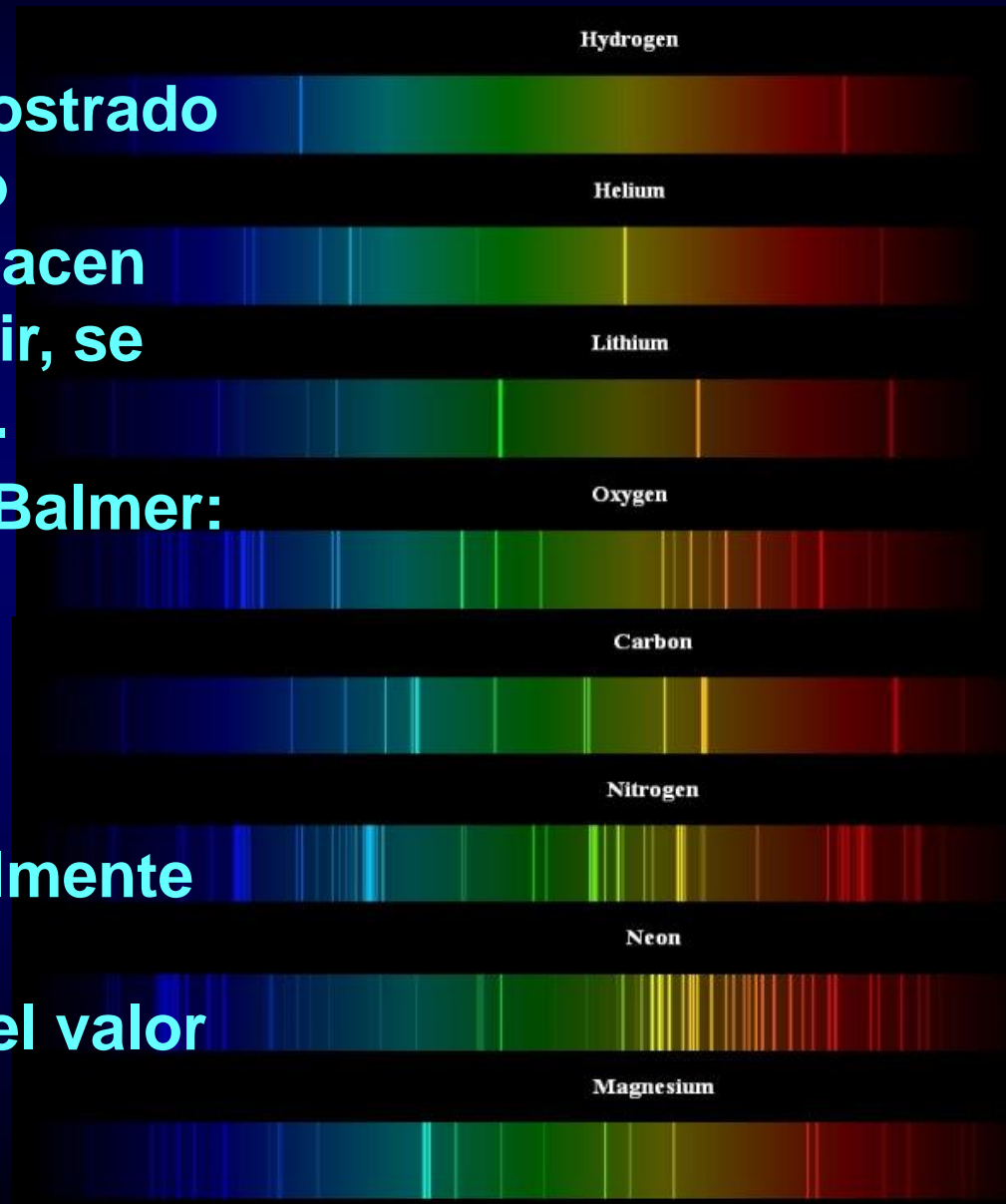
Excitación del hidrógeno

- En 1885, Balmer había demostrado que los átomos de hidrógeno cuando emiten radiación lo hacen de forma discontinua, es decir, se obtiene un espectro discreto.

Formula fenomenológica de Balmer:

$$1/\lambda = R_H (1/2^2 - 1/n^2)$$

El valor medido experimentalmente de la constante de Rydberg ($1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$), coincide con el valor de la formula teórica.



Números cuánticos

En física atómica, los números cuánticos son valores numéricos discretos que nos indican las características de los electrones en los átomos. Resulta, en el caso general, que son necesarios cuatro números cuánticos

1º El número cuántico principal $n = 1, 2, 3, \dots$ determina la energía total asociada a un estado particular.

2º momento angular orbital $l = 0, 1, 2, \dots, n$ indica la forma de la órbita clásica.

3º El número cuántico magnético orbital m_l puede tener los valores $0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$. Este número da la orientación de la órbita clásica con respecto a un campo magnético aplicado.

4º Espín del electrón. Está cuantificado y puede tener solamente los valores $+\frac{1}{2}$ o $-\frac{1}{2}$.

Capas electrónicas

Todos los electrones de un átomo que tienen la misma energía (el mismo valor de n) se dice que pertenecen a la misma capa electrónica.

- Las capas se identifican por las letras K, L, M, N, \dots , correspondientes a $n = 1, 2, 3, 4, \dots$, respectivamente.

una capa se divide en subcapas, que corresponden a diferentes valores de l y se identifican como s, p, d, f, \dots para $l = 0, 1, 2, 3, \dots$, respectivamente.

- La distribución de los electrones de un átomo en capas y subcapas se indica en la tabla, teniendo en cuenta el principio de exclusión de Pauli (1925):

nunca dos electrones en un sistema electrónico pueden tener iguales los cuatro números cuánticos, n, l, m_l y s

Configuración electrónica

Elemento	Z	Diagrama de orbitales							Configuración electrónica
		1s	2s	2p			3s		
H	1	↑						1s ¹	
He	2	↑↓						1s ²	
Li	3	↑↓	↑					1s ² 2s ¹	

Átomo	Z	Configuración electrónica						
Li	3	$1s^2 2s^1$	↑↓	↑				
Be	4	$1s^2 2s^2$	↑↓	↑↓				
B	5	$1s^2 2s^2 2p^1$	↑↓	↑↓	↑			
C	6	$1s^2 2s^2 2p^2$	↑↓	↑↓	↑	↑		
N	7	$1s^2 2s^2 2p^3$	↑↓	↑↓	↑	↑	↑	
O	8	$1s^2 2s^2 2p^4$	↑↓	↑↓	↑↓	↑	↑	
F	9	$1s^2 2s^2 2p^5$	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑	
Ne	10	$1s^2 2s^2 2p^6$	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	

Configuración electrónica de algunos elementos

Electrones de valencia

- Las capas más internas corresponden a los electrones más cercanos al núcleo.
- Las capas más externas corresponden a energías más altas, y por lo tanto, los electrones más alejados del núcleo.
- la capa de energía más elevada que cuento electrones se llama capa de valencia.
- El estado de ocupación de esta capa determina si el átomo se asociará o no con otras para formar moléculas y cristales.

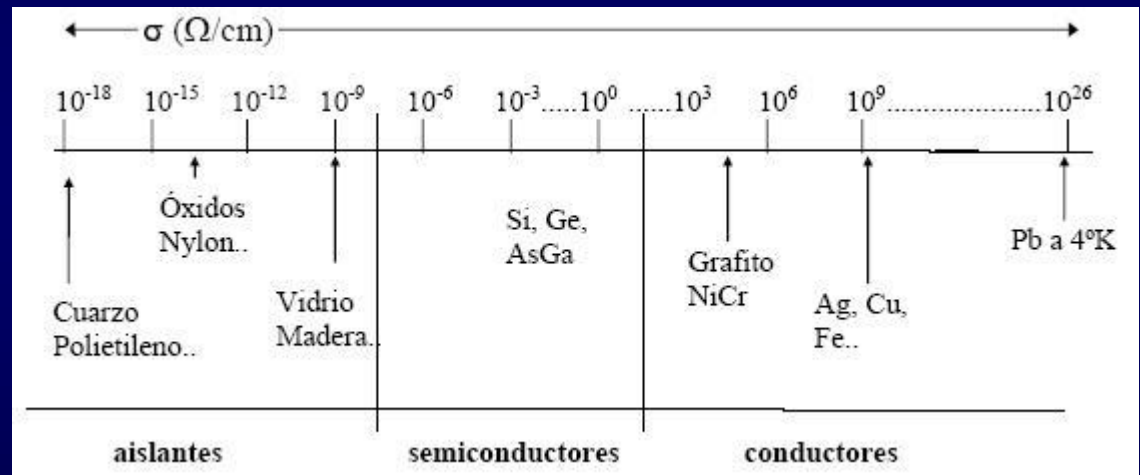
3.2. Teoría de la conducción

Los materiales se puede clasificar en función de la facilidad que tienen los electrones libres de moverse en la red cristalina (conductividad). Los sólidos pueden clasificarse en tres grandes grupos:

conductores,

semiconductores y

aislantes.

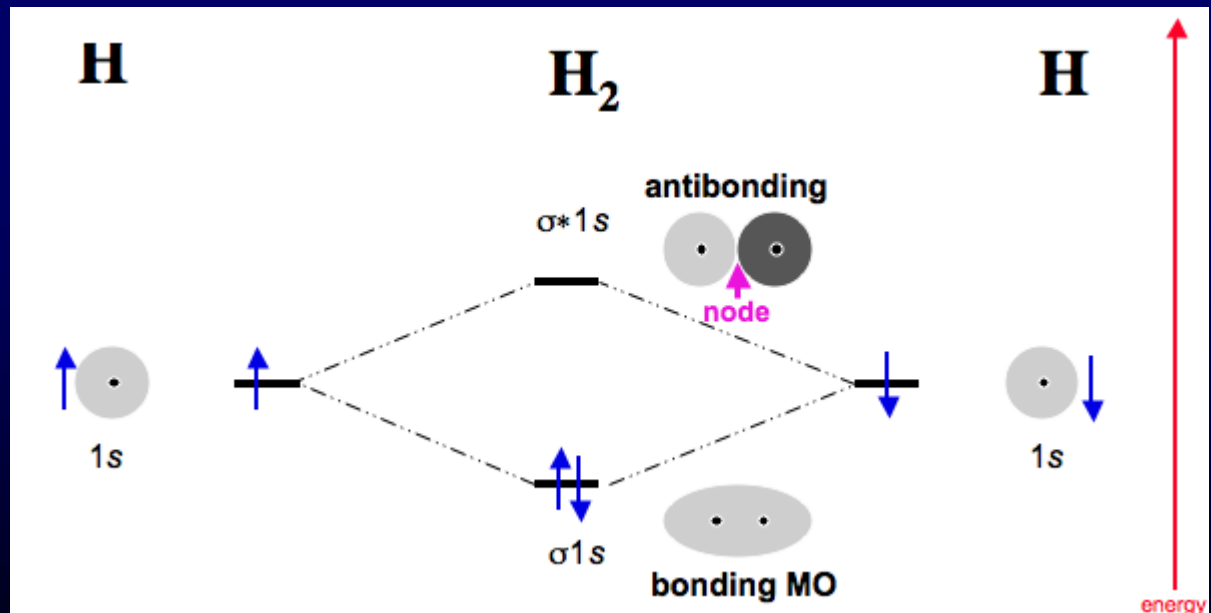


En los buenos conductores metálicos, tales como el **Cu**, **Ag** y **Al**, sus estructura cristalina es tal que los electrones de valencia están compartidos por todos los átomos y pueden moverse libremente por todo el material.

Dihidrógeno

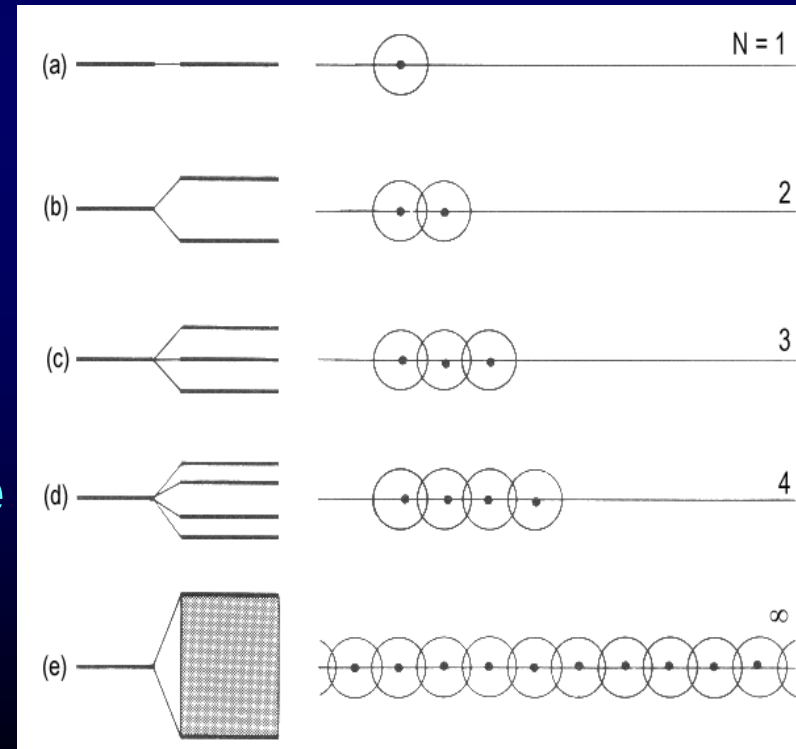
Cuando se acercan dos átomos idénticos (ejemplo dos átomos de hidrógeno H) para formar una molécula diatómica (H_2), cada nivel de energía se desdobra en dos subniveles de energías similares quitando degeneración.

- Estados degenerados son de la misma energía



Bandas de energía

- Un solo átomo tiene un nivel de una cierta energía.
- Si se añade un otro átomo, se forman dos niveles
- Con 3 átomos hay 3 niveles ...
- Con N átomos hay N niveles
- Cuando una gran cantidad de átomos se unen, como en las estructuras sólidas, el número de los niveles de energía más altos es tan grande y la diferencia de energía entre cada uno de ellos tan pequeña que se puede considerar como si los niveles de energía conjunta formaran bandas continuas.

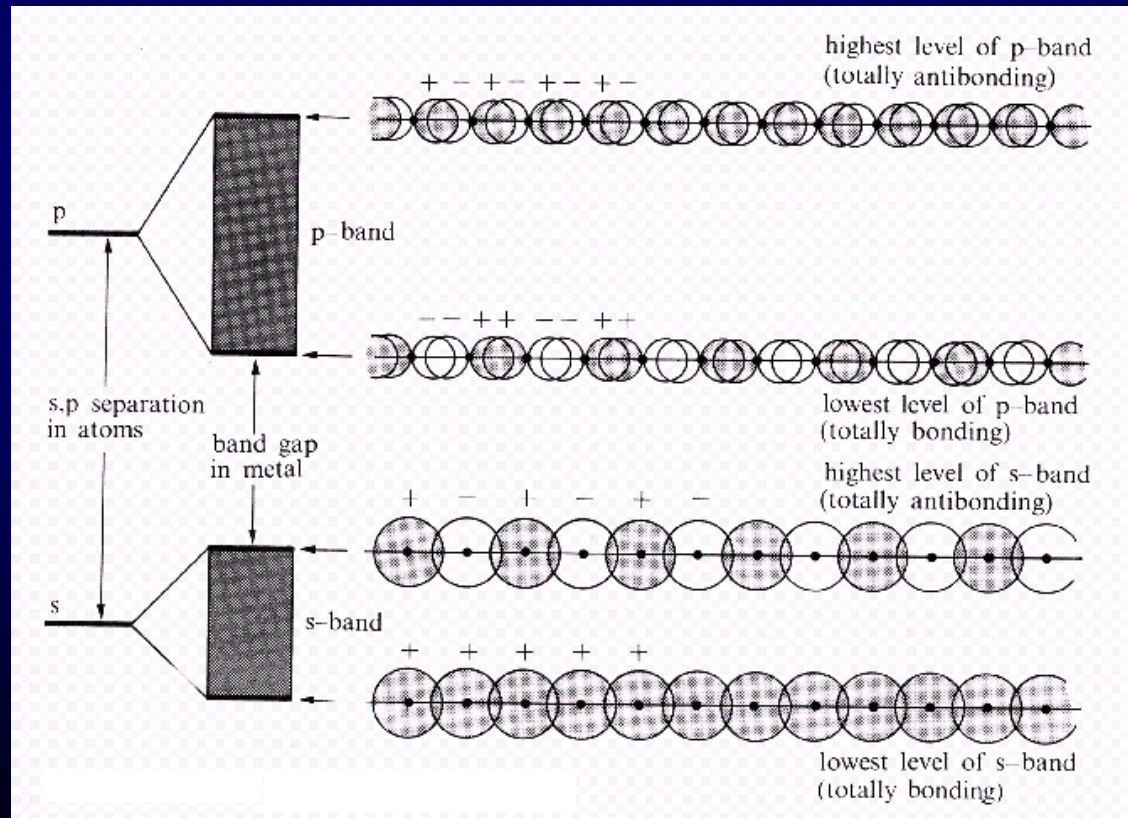


Resistividad de semiconductores

- debido a que algunos intervalos de energía no contienen orbitales, independiente del número de átomos agregados, se crean ciertas brechas energéticas entre las diferentes bandas.

$$N_A = 6.0 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

- número de Avogadro

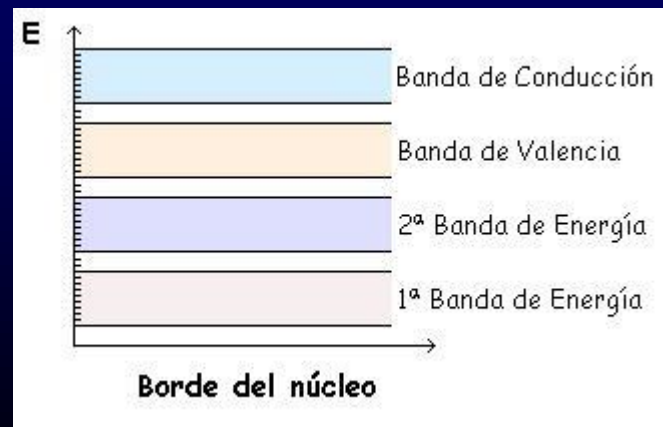


Banda de conducción

La banda de conducción: está ocupada por los electrones libres

-es decir, aquellos que se han desligado de sus átomos y pueden moverse fácilmente.

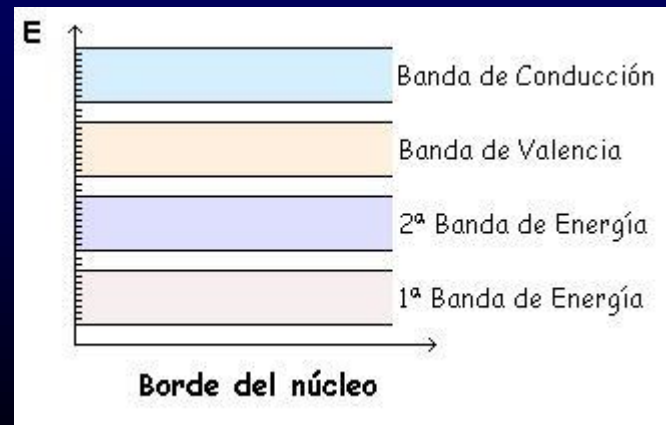
-Estos electrones son los responsables de conducir la corriente eléctrica.



Banda de valencia

La banda de valencia: está ocupada por los electrones de valencia de los átomos

- es decir, aquellos electrones que se encuentran en la última capa o nivel energético de los átomos.
- Los electrones de valencia son los que forman los enlaces entre los átomos, pero no intervienen en la conducción eléctrica.

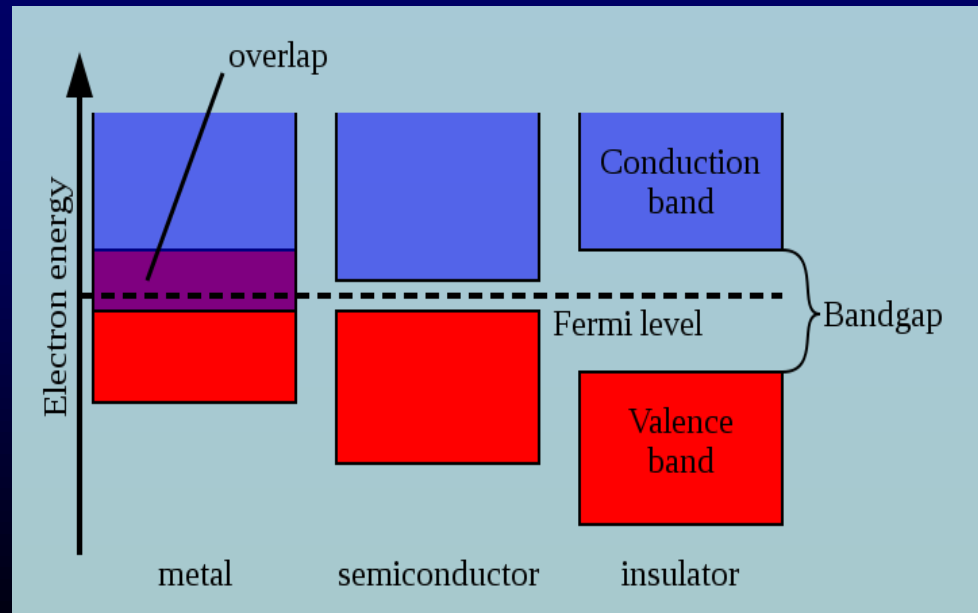


Energía de Fermi

La energía de Fermi es la energía del nivel más alto ocupado por un sistema cuántico a temperatura 0 K

-La energía de Fermi es importante a la hora de entender el comportamiento de las partículas fermiónicas, como por ejemplo los electrones.

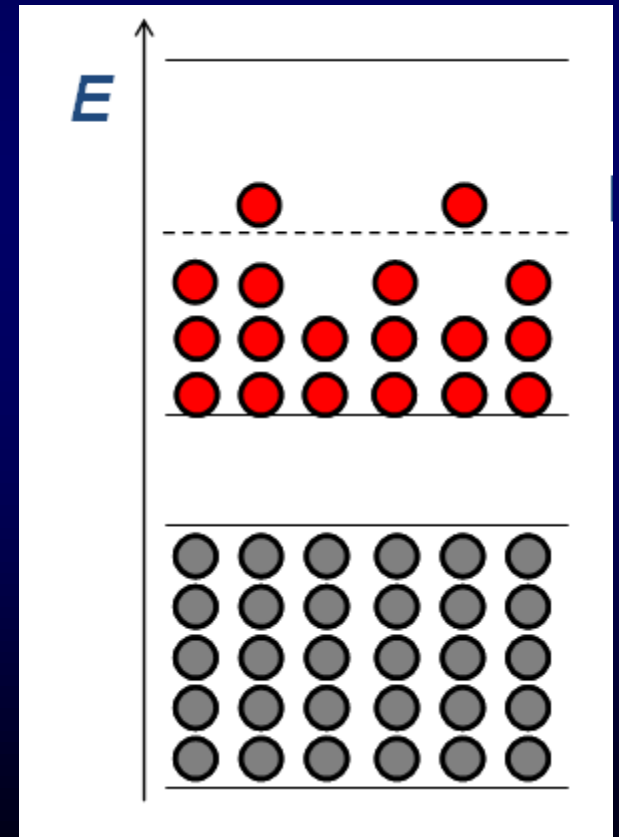
-Los fermiones son partículas de spin semientero que verifican el principio de exclusión de Pauli que dicta que dos fermiones no pueden ocupar simultáneamente el mismo estado cuántico.



Metales

En los metales no hay ningún intervalo de energías prohibidas entre las bandas de valencia y de conducción.

Energía de Fermi corresponde a la mitad de la banda



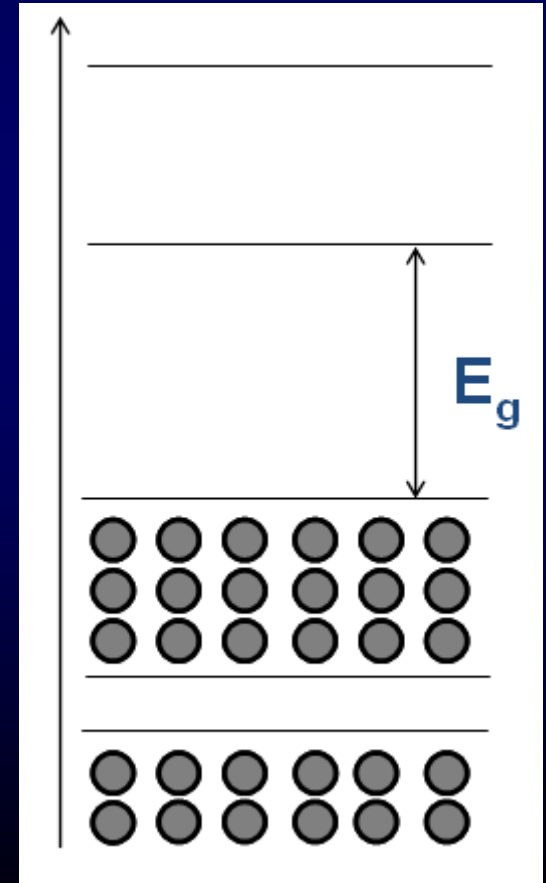
Aislantes

En los aislantes aparece una banda prohibida por encima de la banda de valencia, seguida de una banda de conducción a energías aún mayores.

Esto significa que cuando se aplica un campo eléctrico los electrones no pueden incrementar su energía (es decir, no pueden ser acelerados)

Banda prohibida es ancha, de valor típico de $E_g = (5-10) \text{ eV}$

- Banda de valencia a temperatura cero está llena.

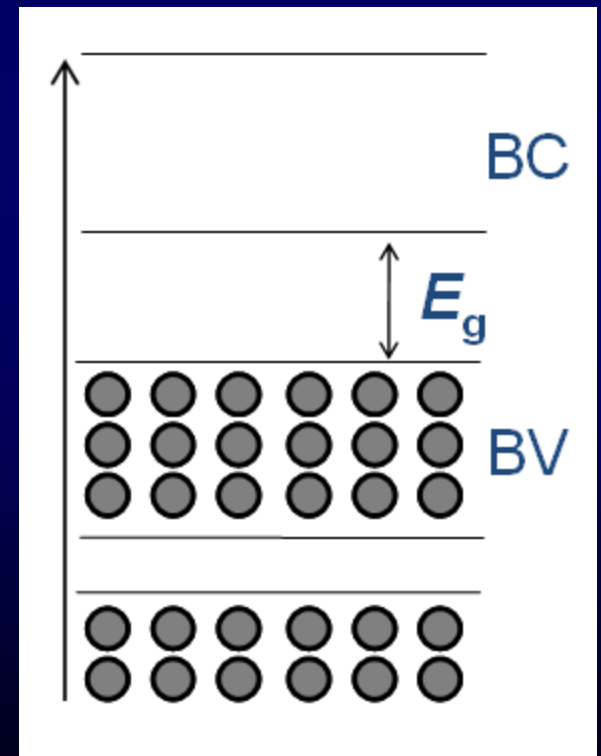


Semiconductores $T=0$ K

En semiconductores aparece una banda prohibida por encima de la banda de valencia, seguida de una banda de conducción a energías aún mayores.

Banda prohibida es estrecha, de valor típico de $E_g = (0.5 - 2) \text{ eV}$

La conducción es algo más probable, mientras a temperatura $T=0$ K es aislante.

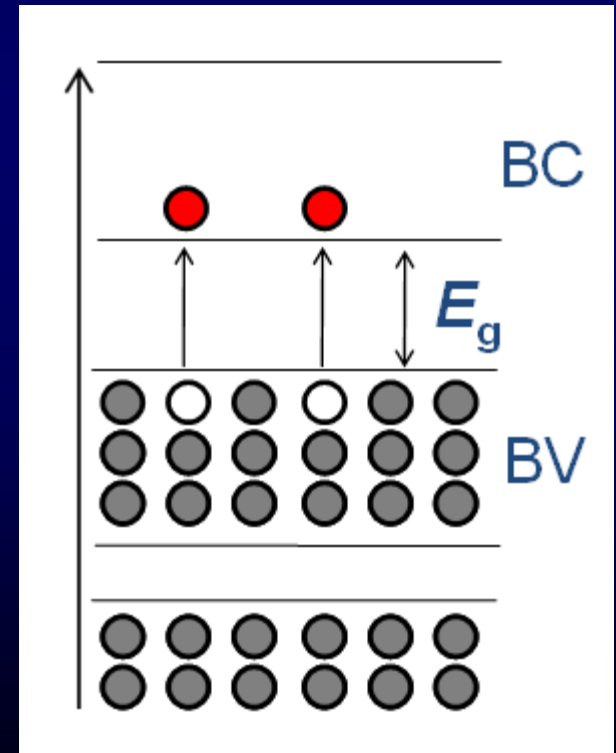


Semiconductores $T > 0$ K

Los semiconductores empiezan conducir a temperaturas finitas.

Occure una formación de parejas electron – hueco.

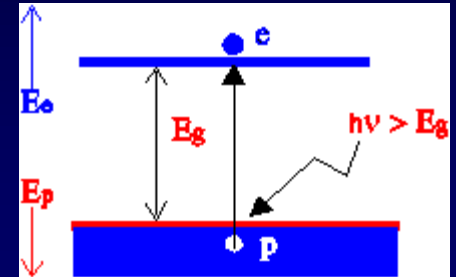
Cuanto es más pequeño de banda prohibida E_g más facil que pueda conducir.



Hueco

Un hueco de electrón es la ausencia de un electrón en la banda de valencia

-Esta banda de valencia estaría normalmente completa sin el hueco.

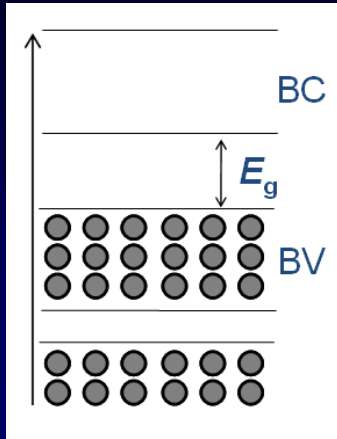


-El hueco junto al electrón son los portadores de carga que contribuyen al paso de corriente eléctrica

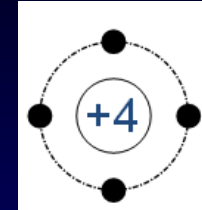
-El hueco de electrón tiene valores absolutos de la misma carga que el electrón pero con carga positiva.

-Los huecos no son partículas, sino la falta de un electrón en un semiconductor

Semiconductor $T=0$

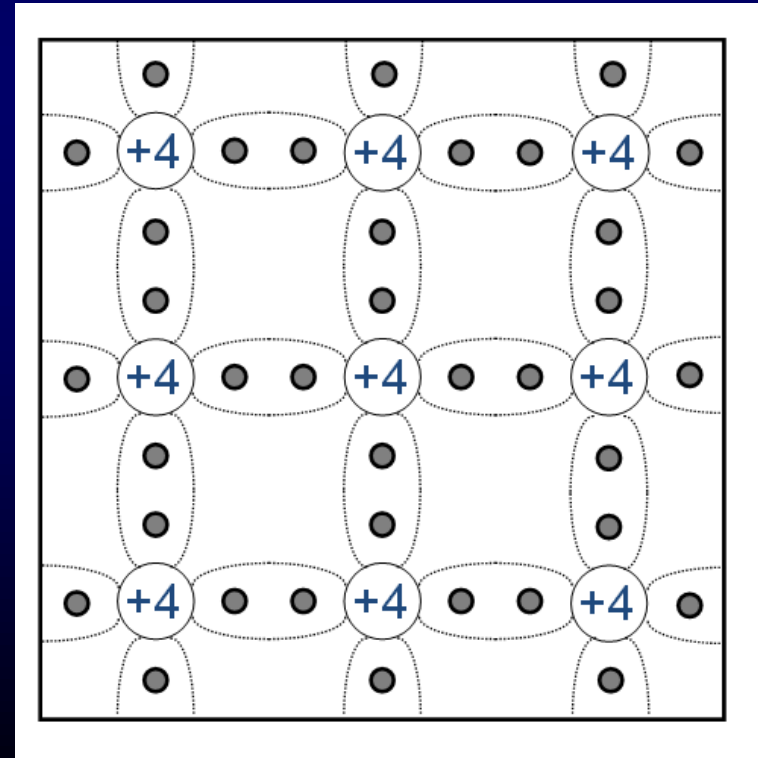


Ejemplo: los átomos del silicio (Si) con valencia 4.

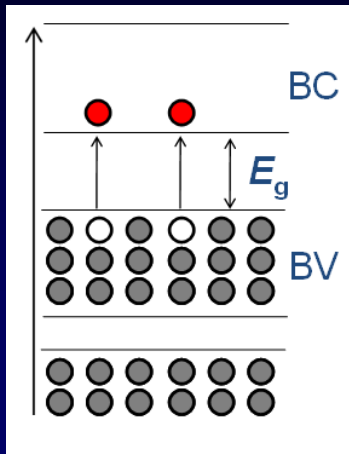


El silicio forma una estructura tetraédrica similar mediante enlaces covalentes entre sus átomos.

Es aislante a temperatura cero.

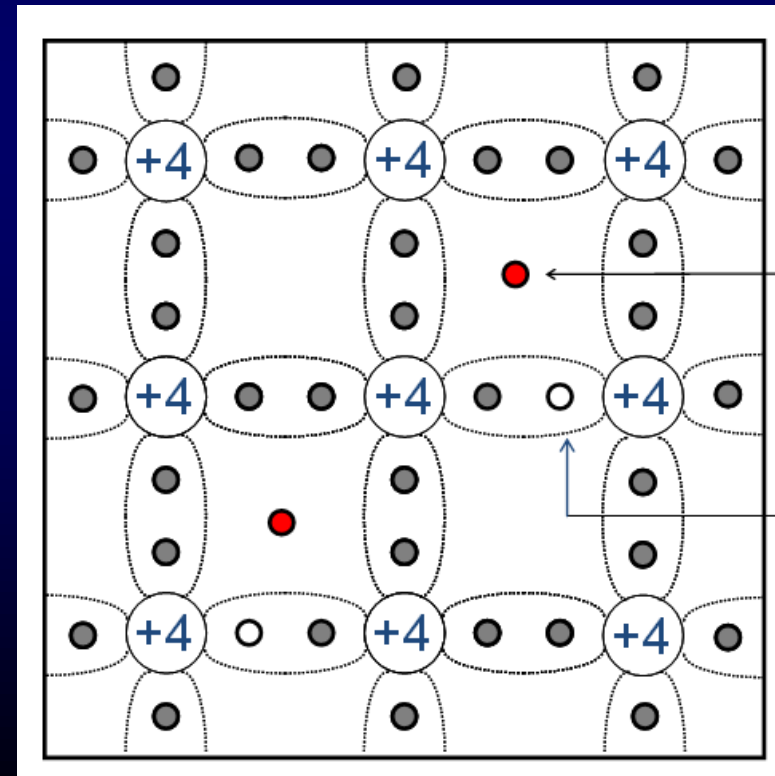


Semiconductor $T > 0$



A temperatura ambiente algunos electrones pueden absorber la energía necesaria para saltar a la banda de conducción dejando un hueco en la banda de valencia.

- La concentración de electrones (cargas negativas) es igual a la concentración de huecos (cargas positivas)



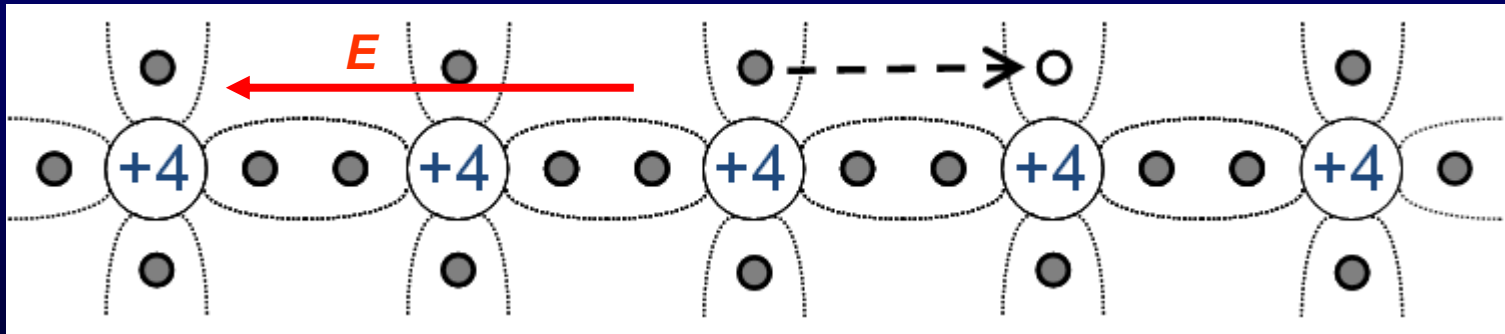
Semiconductor en un campo

Aplicando un campo eléctrico, se produce movimiento de carga (corriente eléctrica)

- Hay una contribución de electrones

- Hay una contribución de huecos

- Un hueco se comporta como una carga positiva



- La corriente tiene dos contribuciones $I = I_e + I_h$

Semiconductores dopados

En semiconductores intrínsecos hay solo un tipo de átomos.

- Son semiconductores puros.

- La concentración de electrones (cargas negativas) es igual a la concentración de huecos (cargas positivas)

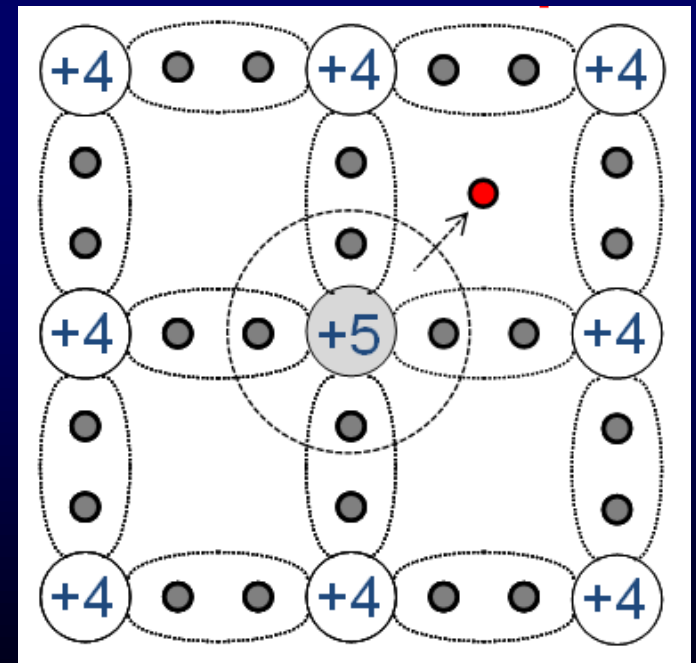
Si a un semiconductor intrínseco se le añade un pequeño porcentaje de impurezas, es decir, elementos trivalentes o pentavalentes, el semiconductor se denomina extrínseco, y se dice que está dopado.

Semiconductor tipo n

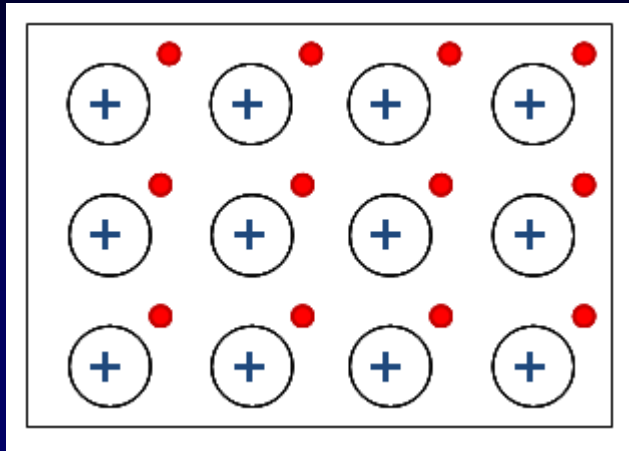
Un semiconductor tipo n se obtiene llevando a cabo un proceso de dopado, añadiendo un cierto tipo de átomos para poder aumentar el número de portadores de carga libres (en este caso negativos o electrones).

Un átomo de 5 electrones de valencia, como fósforo (P), se incorpora a la red cristalina en el lugar de un átomo de silicio (Si) .

Un electrón extra da como resultado la formación de "electrones libres"

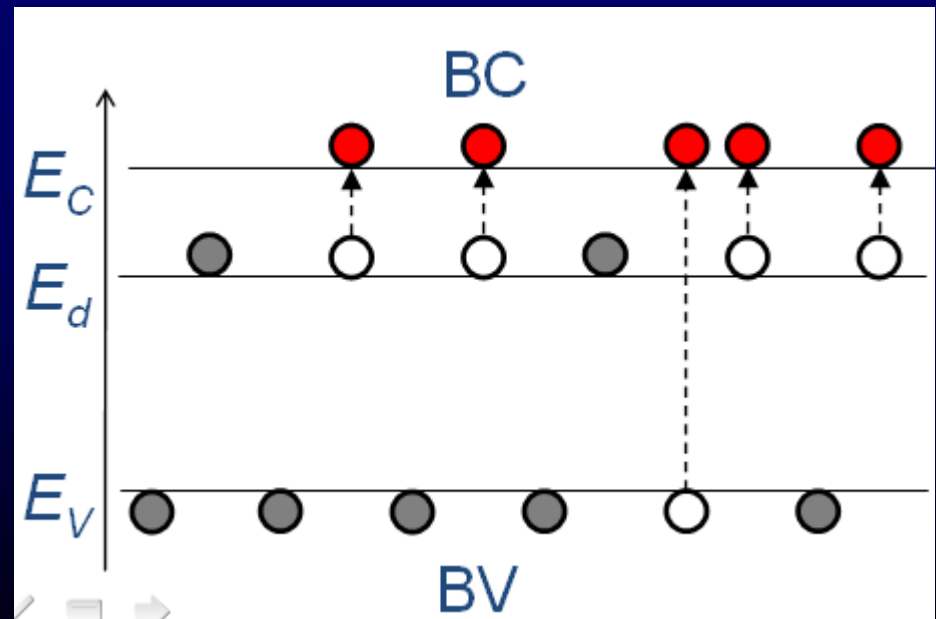


Semiconductor tipo *n*



- Los electrones son portadores mayoritarios de carga
- Los huecos son portadores minoritarios de carga

Prácticamente todos los átomos donadores aportan un electrón a la banda de conducción



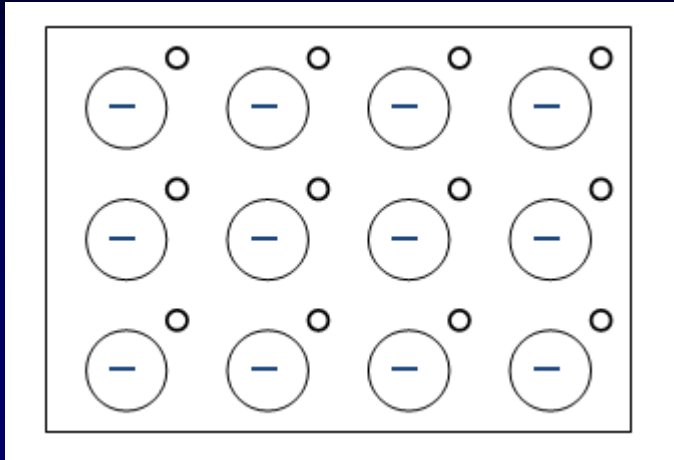
Semiconductor tipo *p*

El propósito del dopaje tipo *p* es el de crear abundancia de huecos.

-En el caso del silicio se le une un átomo con tres electrones de valencia (ej. *Al*, *Ga*, *B*, *In*),

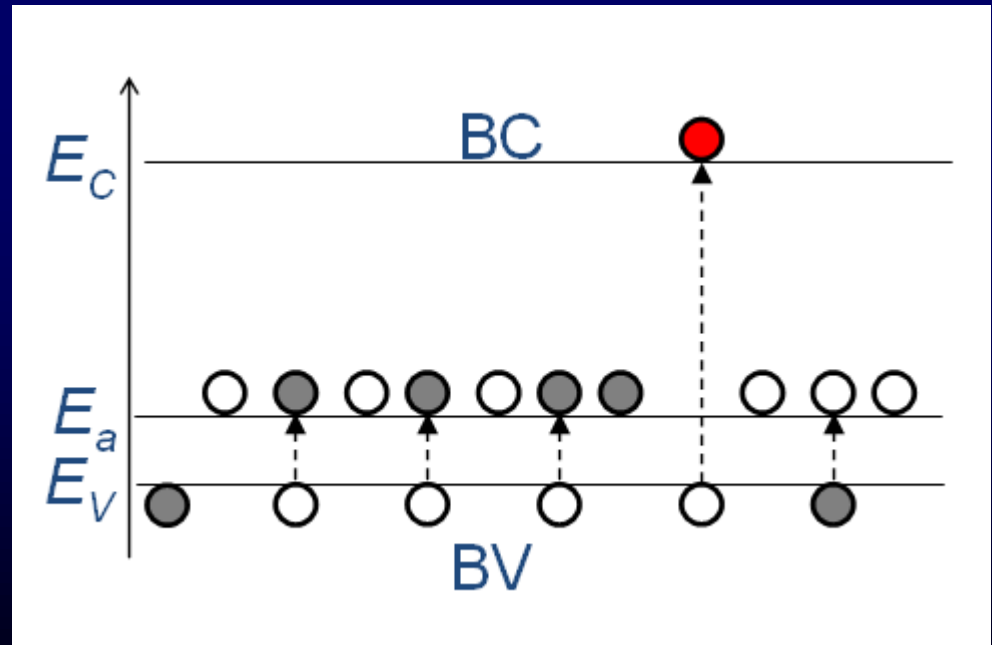
Ese átomo tendrá tres enlaces covalentes y un hueco producido que se encontrará en condición de aceptar un electrón libre.

Semiconductor tipo *p*



- Los electrones son portadores minoritarios de carga
- Los huecos son portadores mayoritarios de carga

Prácticamente todos los átomos donadores aportan un electrón a la banda de conducción



3.3 Diodo de unión p-n: rectificador de corriente y puertas lógicas.

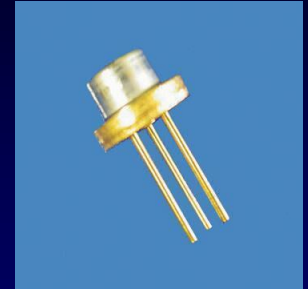
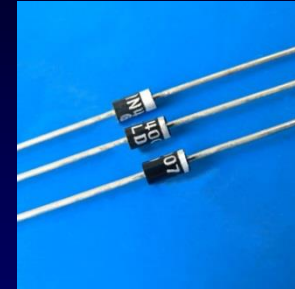
Unión p-n.

Polarización de un diodo: polarización inversa y directa.

Tipo de diodos.

Diodos semiconductores.

Invención del transistor en los laboratorios Bell en 1947.



En 1956 John Bardeen, William Shockley y Walter Brattain obtuvieron el premio Nobel de física por el descubrimiento del mismo.

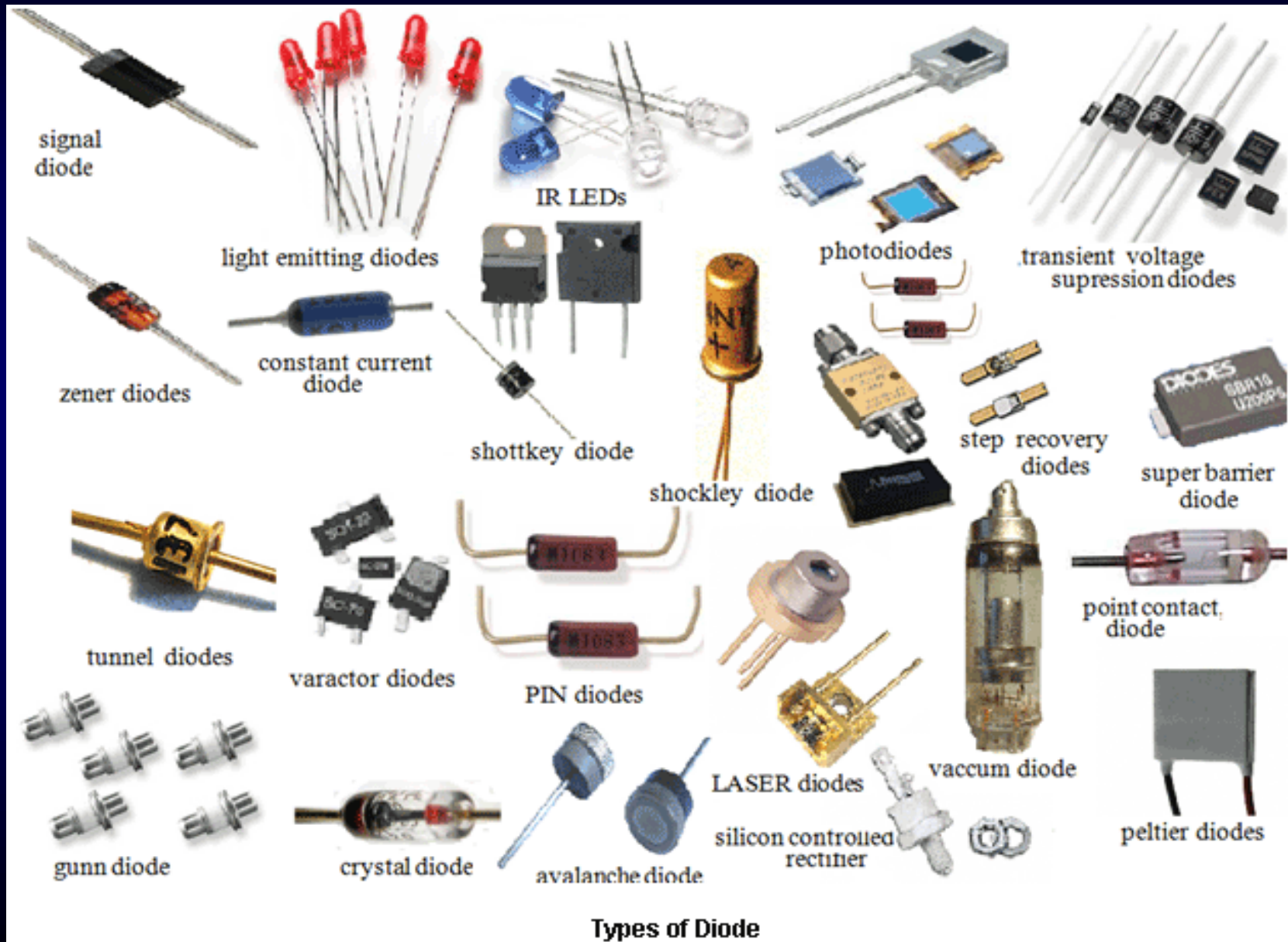


John Bardeen

Walter Houser Brattain

William Shockley

Tipos de diodos

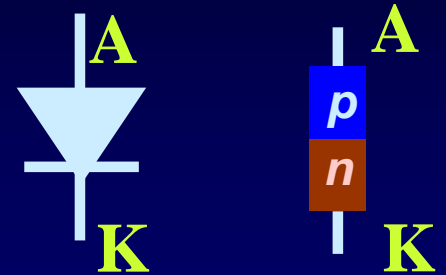


Diodos semiconductores.

- un cambio sumamente drástico en la industria electrónica después de la introducción del transistor en los años cuarenta.
- más pequeños y ligeros, no requieren calentamiento ni se producen pérdidas térmicas (lo que sí sucede en el caso de los tubos), una construcción más resistente y no necesitan un periodo de calentamiento.
- La miniaturización de los últimos años ha producido sistemas semiconductores tan pequeños que el propósito principal de su encapsulado es proporcionar simplemente algunos medios para el manejo del dispositivo y para asegurar que las conexiones permanezcan fijas a la oblea del semiconductor.

Diodo

Un diodo es un componente electrónico de dos terminales que permite la circulación de la corriente eléctrica a través de él en un sentido.



Símbolos electrónicos del diodo: **ánodo - cátodo**

Los primeros diodos eran válvulas o tubos de vacío, constituidos por dos electrodos rodeados de vacío en un tubo de cristal, con un aspecto similar al de las lámparas incandescentes.

El diodo semiconductor es más común en la actualidad; consta de una pieza de cristal semiconductor conectada a dos terminales eléctricos.

Unión p - n

Unión p - n : monocristal semiconductor dopado con impurezas dadoras y aceptoras.

- Zona p : semiconductor tipo p (impurezas aceptoras N_a ej. átomo con tres electrones de valencia)
- Zona n : semiconductor tipo n (impurezas dadoras N_d ej. átomo con cinco electrones de valencia)
- Zona de *transición*: semiconductor tipo n (impurezas dadoras) – donde se producen los fenómenos importantes



Portadores en unión *p-n*

Portadores ($T \approx 300$ K):

- Zona *p*:

portadores mayoritarios → huecos

Concentración $p_p \approx N_a$

portadores minoritarios → electrones

Concentración $n_p \approx 0$

- Zona *n*:

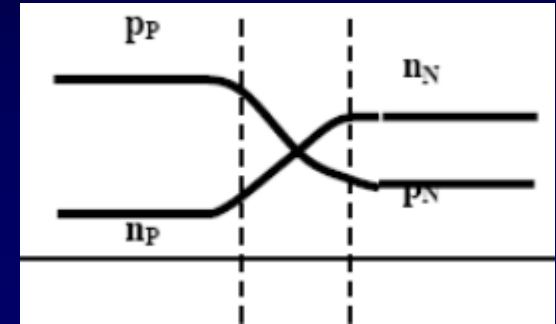
portadores mayoritarios → electrones

Concentración $n_n \approx N_d$

portadores minoritarios → huecos

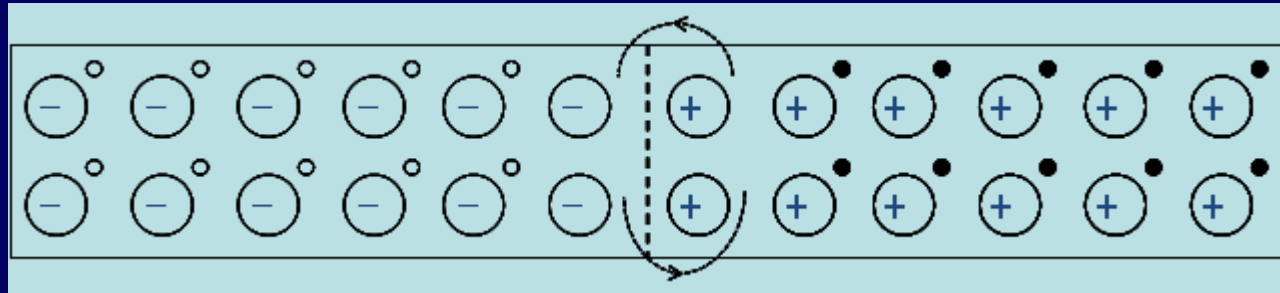
Concentración $p_n \approx 0$

- Zona de transición: los electrones que vienen de zona *n* recombinan con los huecos que vienen desde la zona *p*.

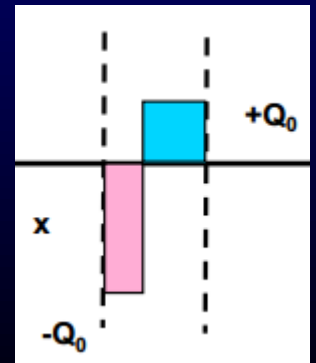


Corriente de difusión

- El exceso de concentración de portadores en una parte produce un desplazamiento de carga desde las zonas de mayor concentración a las de menor concentración, creando las corrientes de difusión.



- de huecos de p hacia a n (I_{dp})
- de electrones de p hacia a n (I_{dn})
- en la zona de transición quedan los iones
 - con carga negativa en la zona p ($-Q_0$)
 - con carga positiva en la zona n ($+Q_0$)



Corriente de arrastre

Por la separación de las cargas (Q_0 y $-Q_0$) aparece un campo eléctrico E dirigido desde la zona n hacia a la zona p . Valores típicos del campo: (10^3 - 10^5) V/m

- La fuerza que el campo eléctrico ejerce sobre iones provocará el movimiento de estos.

- De este modo se originará una corriente eléctrica - corriente de arrastre

- de huecos (I_{ap})

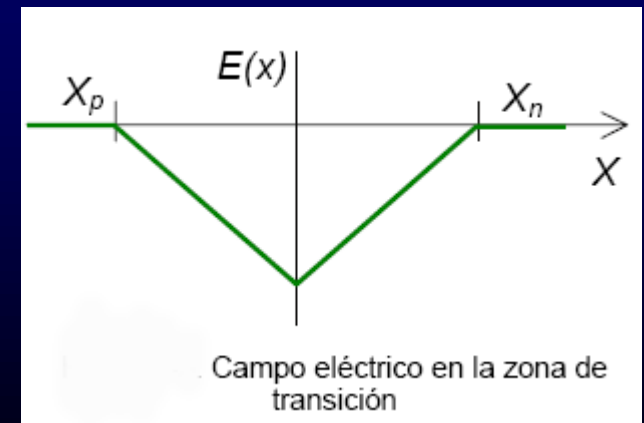
- de electrones (I_{an})

- Equilibrio dinámico: $I_d + I_a = 0$.

- Las corrientes se compensan:

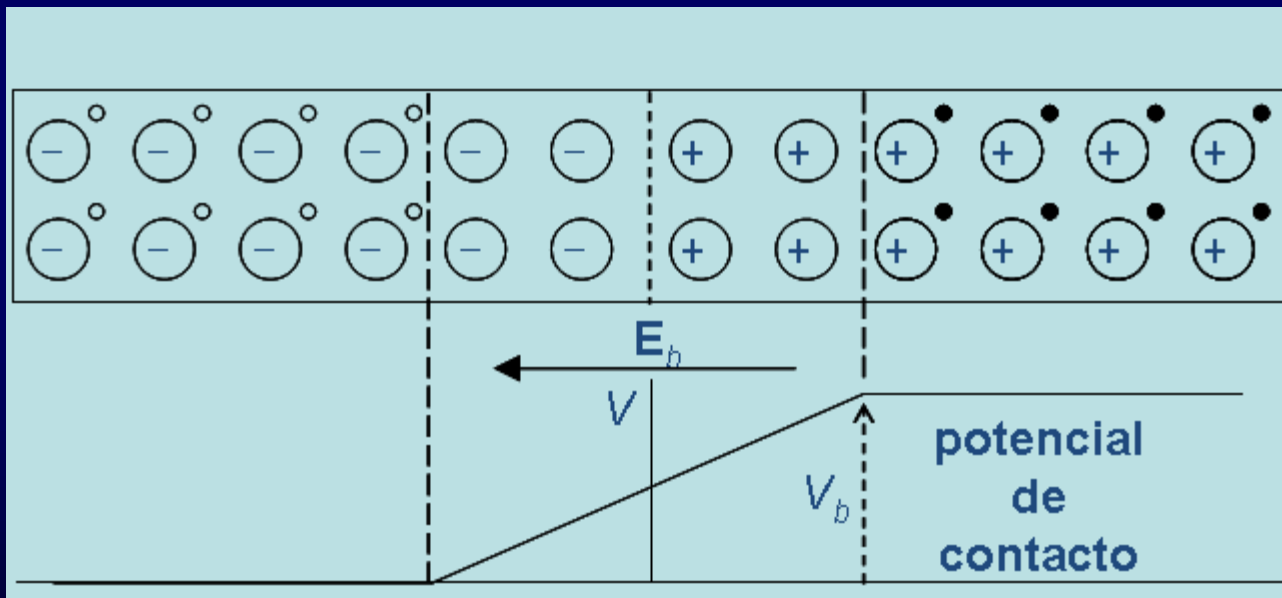
- huecos: $I_{dp} + I_{ap} = 0$

- electrones: $I_{dn} + I_{an} = 0$



Barrera de potencial

Potencial de contacto en la unión p - n en equilibrio, es la diferencia de potencial existente en la zona de transición

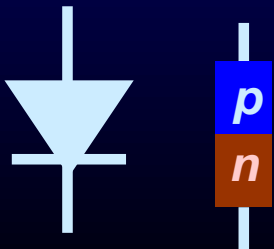


Unión polarizada

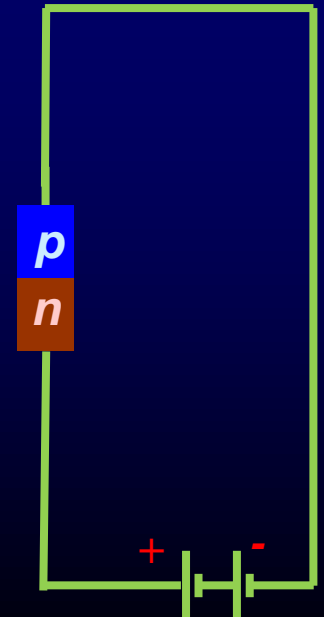
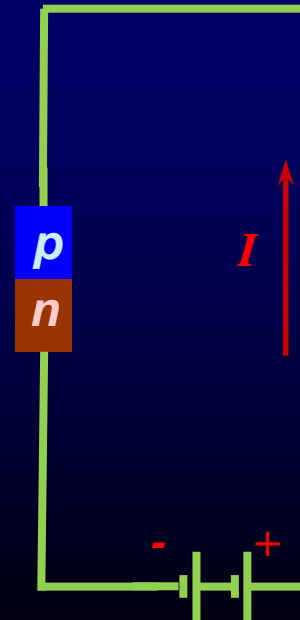
Polarización: aplicar ddp entre extremos

polarización directa:
se aplica una tensión
negativa (-) en la parte *n*.

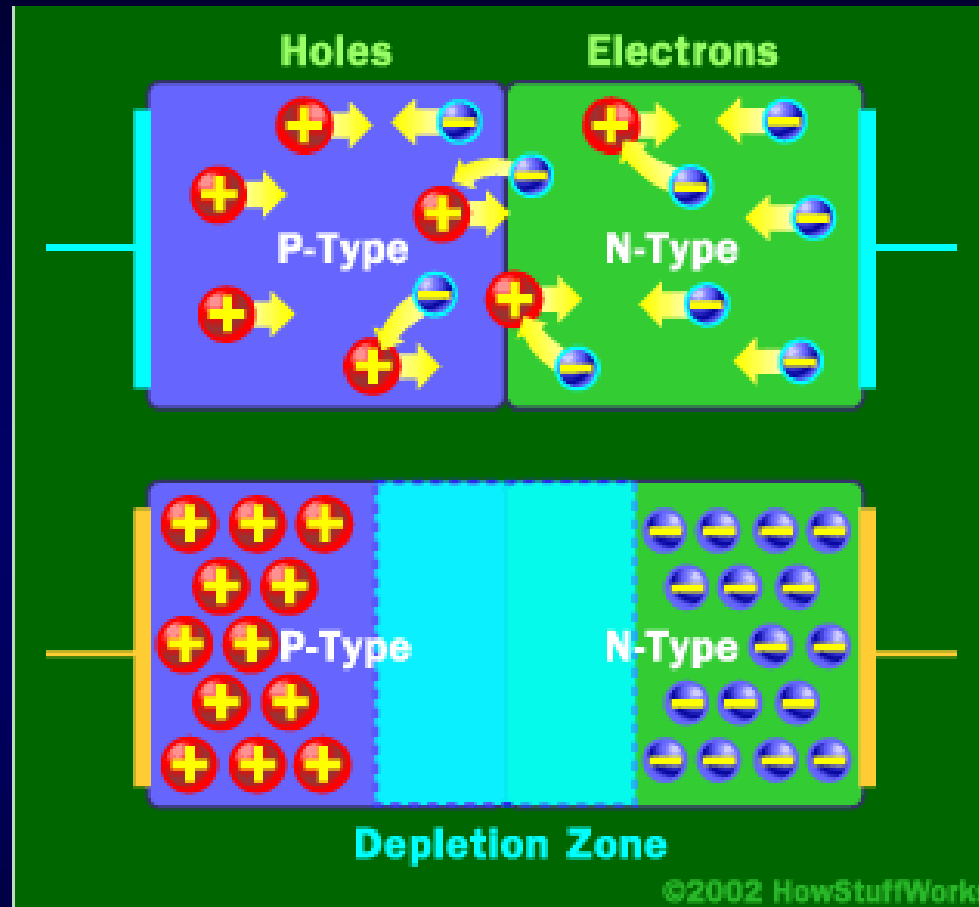
polarización indirecta (inversa):
se aplica una tensión
positiva (+) en la parte *n*.



Polarización directa Polarización indirecta

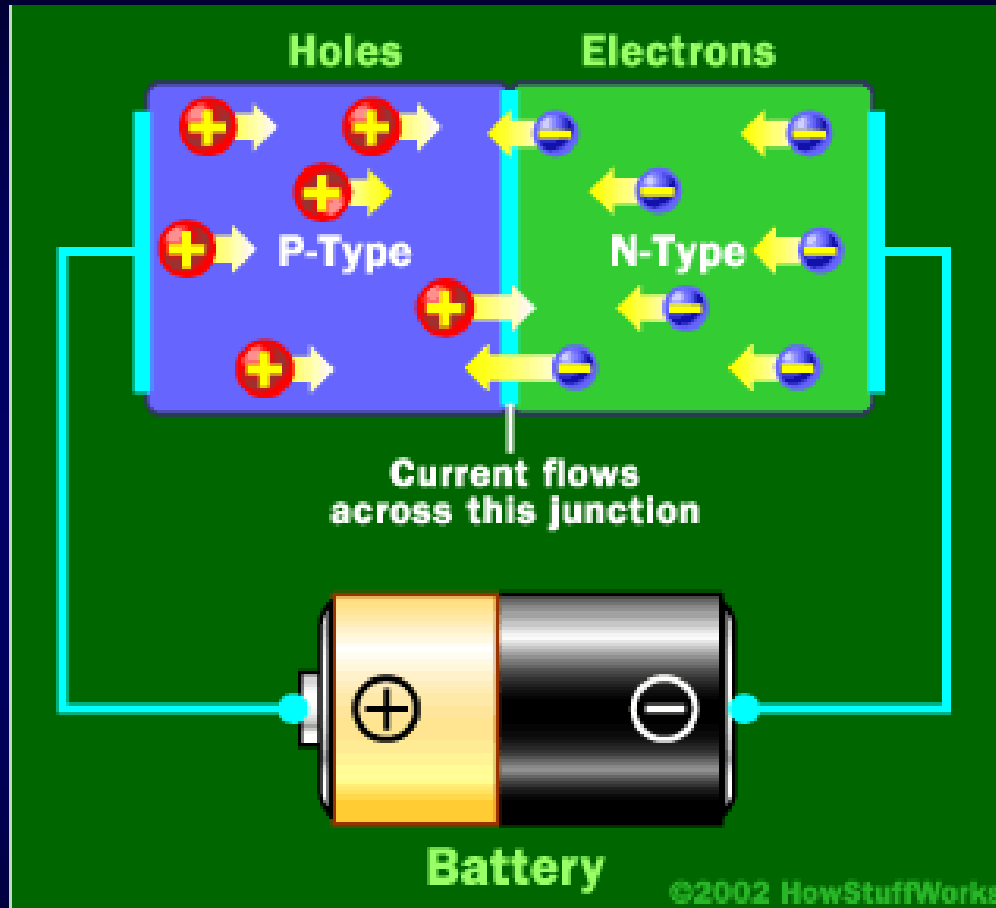


Unión p - n no polarizada



El tamaño típico de la zona de transición es de un micrón.

Polarización directa

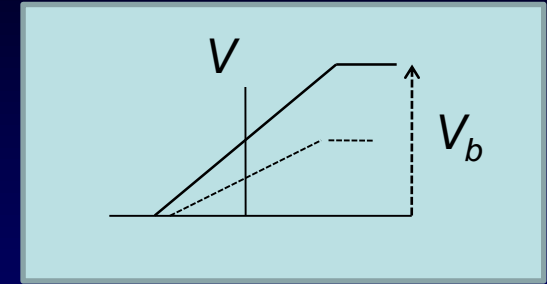


En conexión directa los electrones y los huecos empiezan a acercarse más y la zona de transición disminuye.

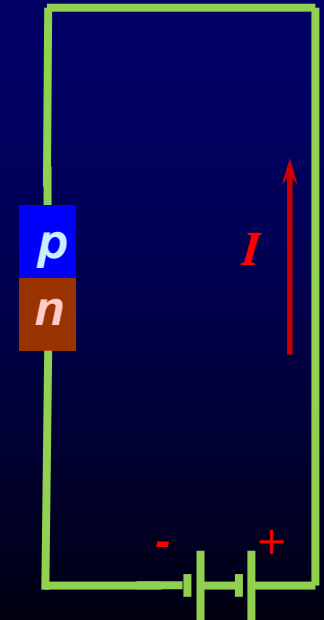
Polarización directa

La barrera de potencial V_b disminuye

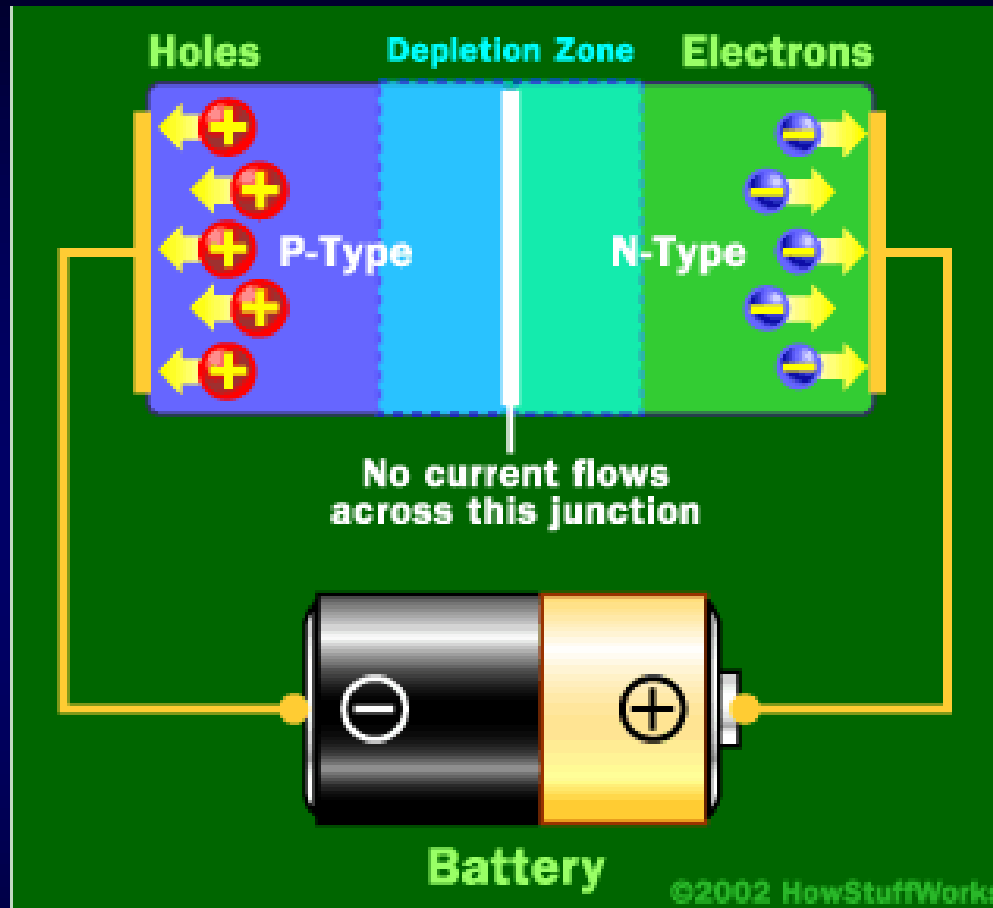
- la región de transición se estrecha
- corriente de difusión aumenta mucho (más portadores saltan la barrera)
- corriente de arrastre disminuye de poco
- a partir de una cierta tensión umbral V_γ la corriente puede circular sin apenas resistencia



Polarización directa



Polarización inversa



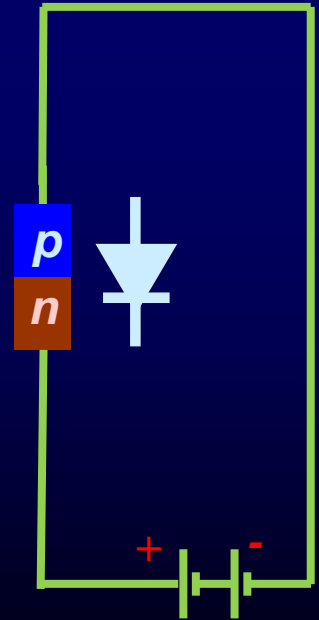
En conexión inversa los electrones libres se acumulan en un extremo del diodo y los agujeros de recoger por el otro. La zona de transición se hace más grande.

Polarización inversa

La barrera de potencial V_b aumenta

- la región de transición se expande
- corriente de difusión disminuye y la corriente prácticamente no circula
- el corriente de arrastre se mantiene, y circula una corriente muy pequeño llamado corriente inversa de saturación.

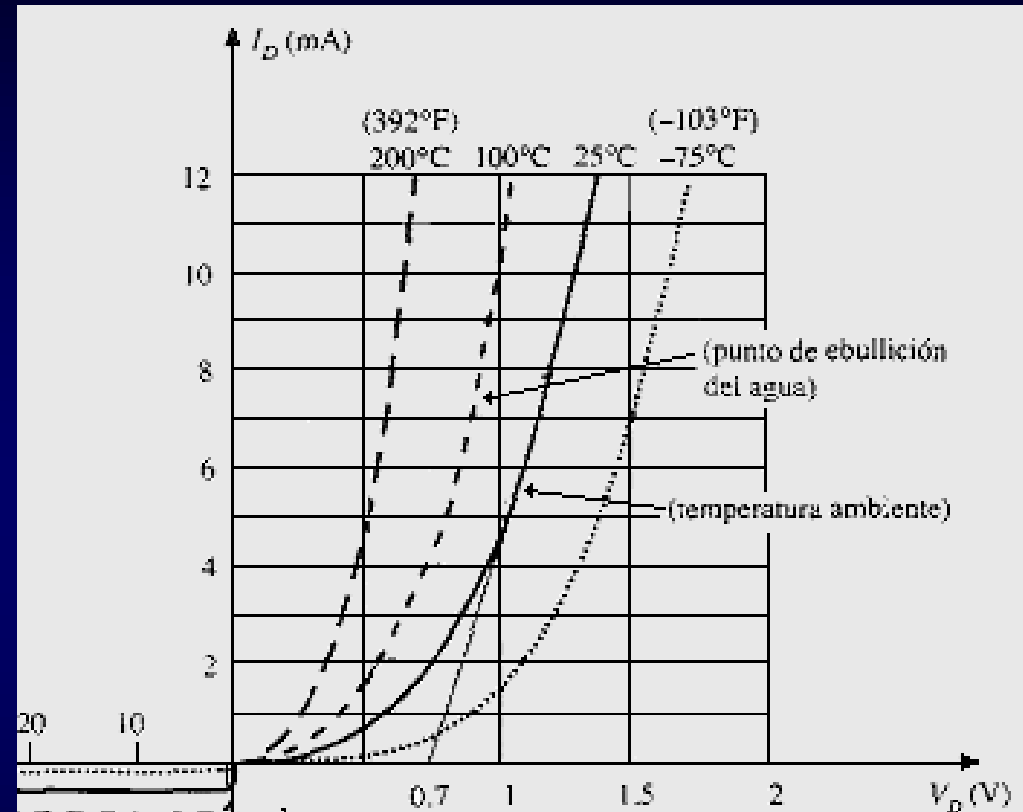
Polarización indirecta



Curva característica del diodo

- Para tensiones negativas (polarización inversa) la corriente es muy pequeña, del orden de microamperios.

- Para tensiones positivas (polarización directa), aparece una corriente en el diodo.



- La intensidad crece de forma exponencial. En la física del estado sólido se demuestra ecuación de Shockley: $I = I_0 (\exp\{V / \eta V_\tau\} - 1)$, donde es I_0 la corriente de la saturación inversa, $V_\tau = k_B T / e$ potencial equivalente, $\eta \approx 1$.

Modelo simplificado del diodo

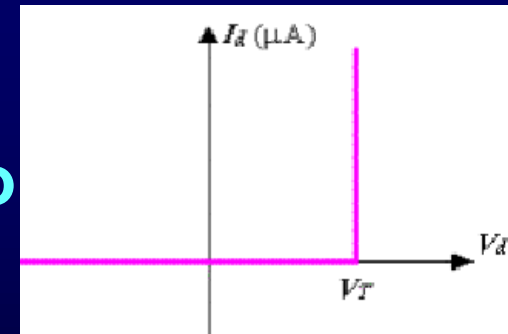
- En una manera aproximada se puede considerar que:

- El diodo no conduce cuando la diferencia de potencial entre sus bornes V es

- negativa (polarización inversa): $V < 0$

- positiva y menor de la tensión umbral $V < V_\gamma$

- Cuando el diodo conduce, la diferencia de potencial entre bornes no varia mucho y aproximadamente es de $V \approx V_\gamma$



- El valor de la tensión umbral está definido por los materiales usados y es de $V_\gamma = 0,7 \text{ V}$ en el caso del silicio a $T = 300 \text{ K}$.

Explicación interactiva

Explicación interactiva del funcionamiento interno de los diodos por David Holburn de la University of Cambridge.

<http://www-g.eng.cam.ac.uk/mmg/teaching/linearcircuits/diode.html>

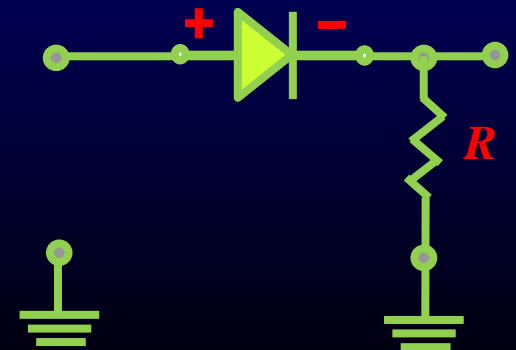
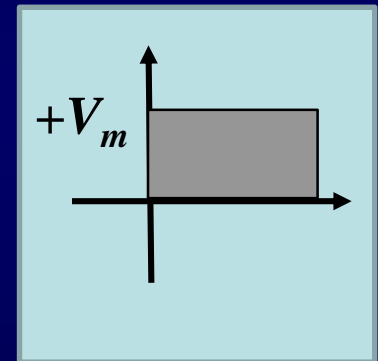
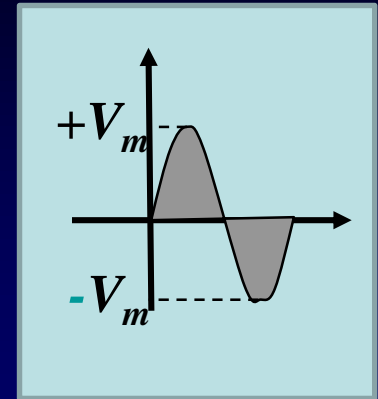
Rectificador de la corriente

La distribución de energía eléctrica se hace en corriente alterna, debido a la facilidad de adaptación de tensión por transformadores.

Pero en muchas aplicaciones, la carga alimentada requiere una tensión continua.

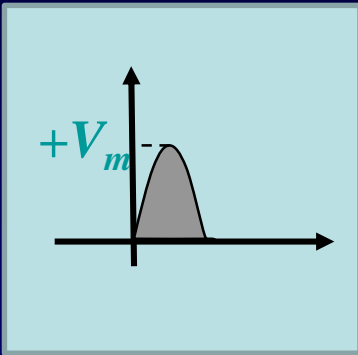
Un rectificador es el elemento o circuito que permite convertir la corriente alterna en corriente continua.

Ej: un diodo ideal y una resistencia, excitado con una señal sinusoidal.

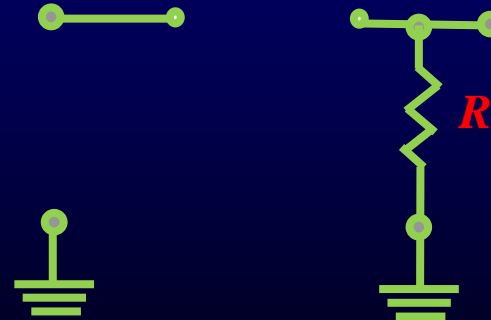
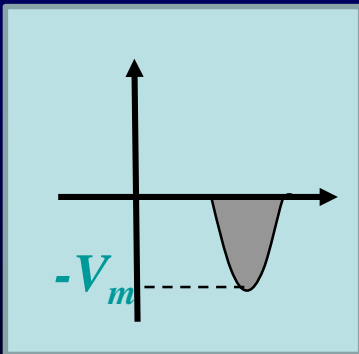


Rectificador de la corriente

Polarización directa: el diodo conduce sin resistencia



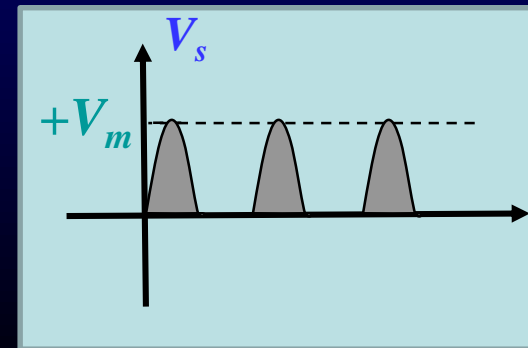
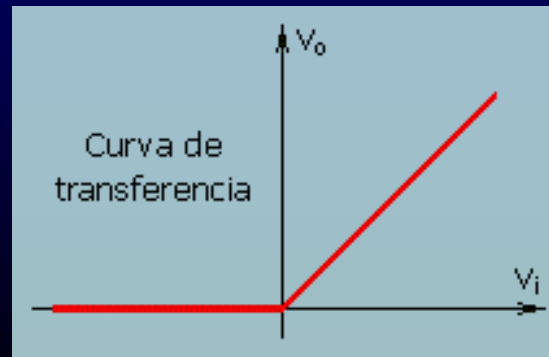
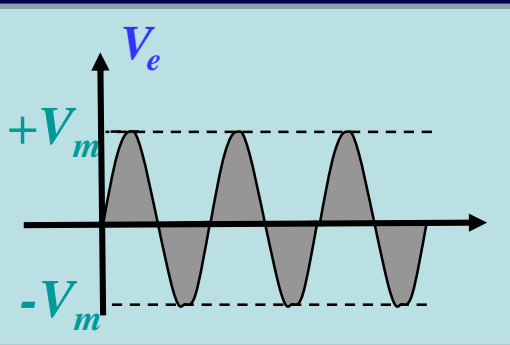
Polarización inversa: el diodo no conduce



Rectificador de media onda

Si el voltaje de entrada es sinusoidal, el voltaje de salida (tensión sobre la resistencia) tendrá la forma de una “media onda”.

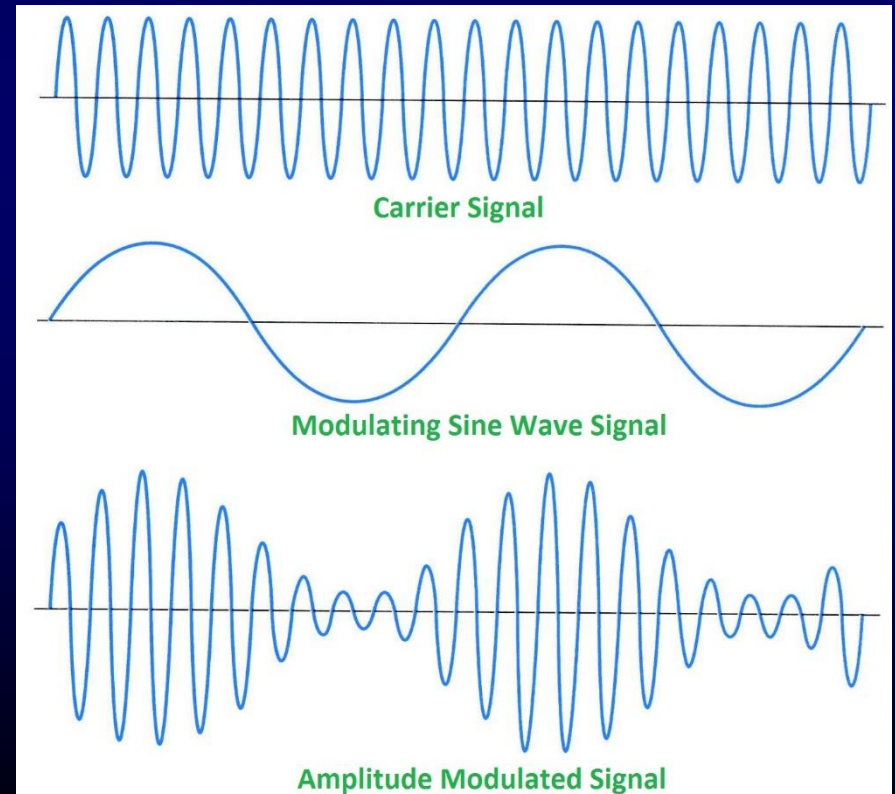
El circuito usado se conoce como “rectificador de media onda”.



Receptor de radio AM

La *modulación de amplitud* (AM) es una técnica utilizada en la comunicación electrónica, más comúnmente para la transmisión de información a través de una onda portadora de radio.

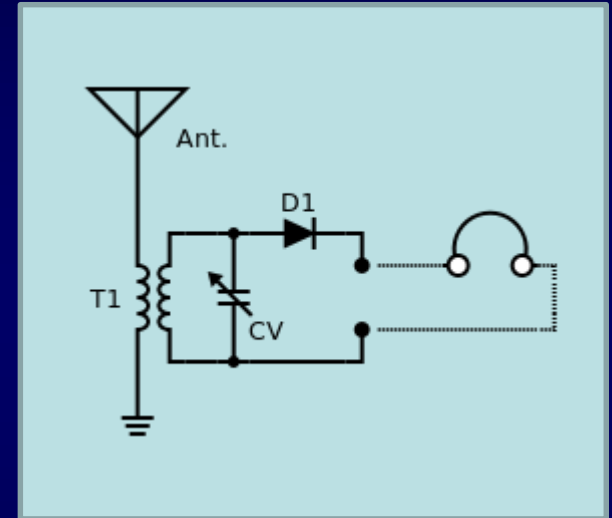
La modulación en amplitud (AM) funciona mediante la variación de la amplitud de la señal transmitida en relación con la información que se envía.



Receptor de radio AM

Las ondas electromagnéticas que alcanzan la antena generan en ésta, mediante el fenómeno de la inducción electromagnética.

A causa del fenómeno de resonancia se produce un máximo de tensión para la frecuencia de resonancia del circuito paralelo formado por el devanado secundario y el condensador variable.

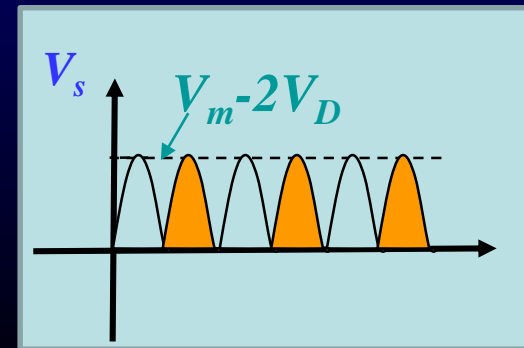
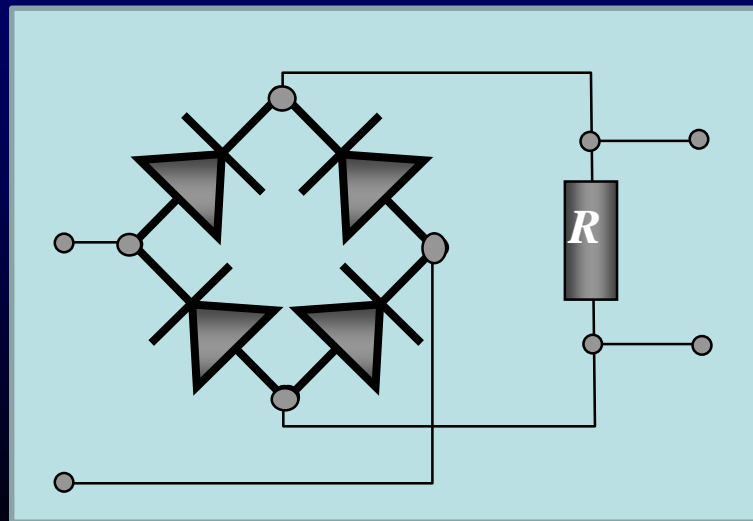
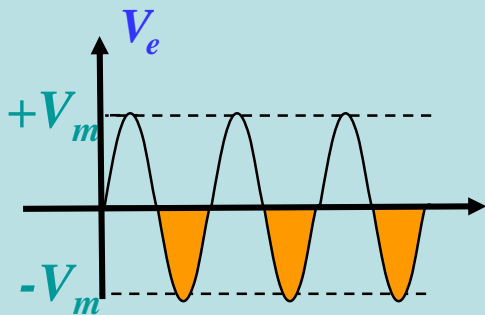


Las señales moduladas en amplitud (AM) del nivel de la onda portadora de alta frecuencia variará en función de la señal moduladora (voz, música, etc) que se transmite. A la salida del diodo se observa una tensión que varia de la misma forma que la moduladora, y se oye en los auriculares.

Rectificador de onda completa

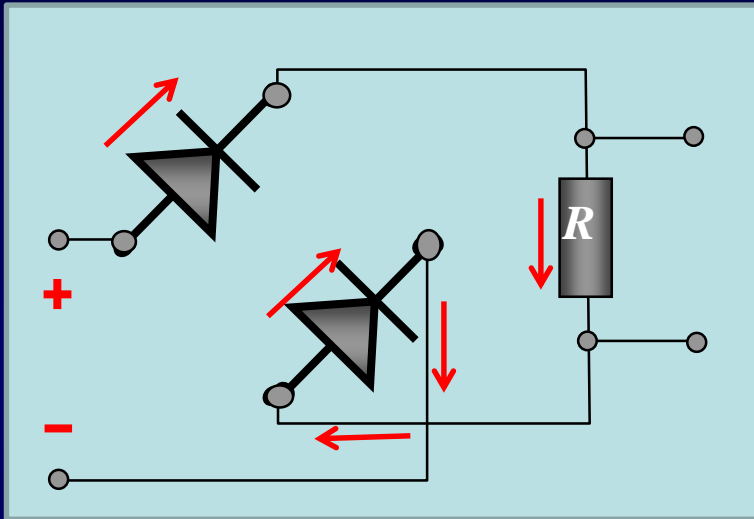
Aunque la onda resultante de un rectificador de media onda es continua (no cambia de signo), dista mucho de ser un valor constante, como interesa tener en un circuito eléctrico de CC.

Una forma de mejorar la “calidad” de la onda continua resultante es a través del “rectificador de onda completa”:

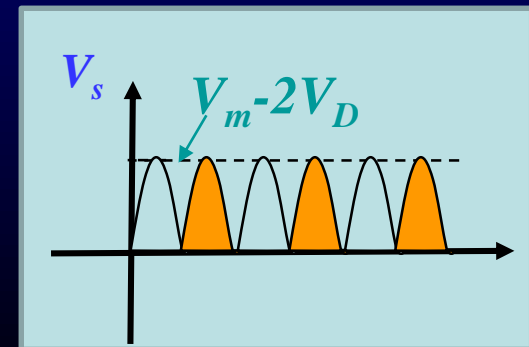
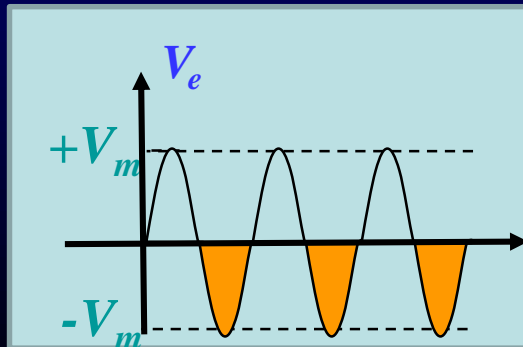
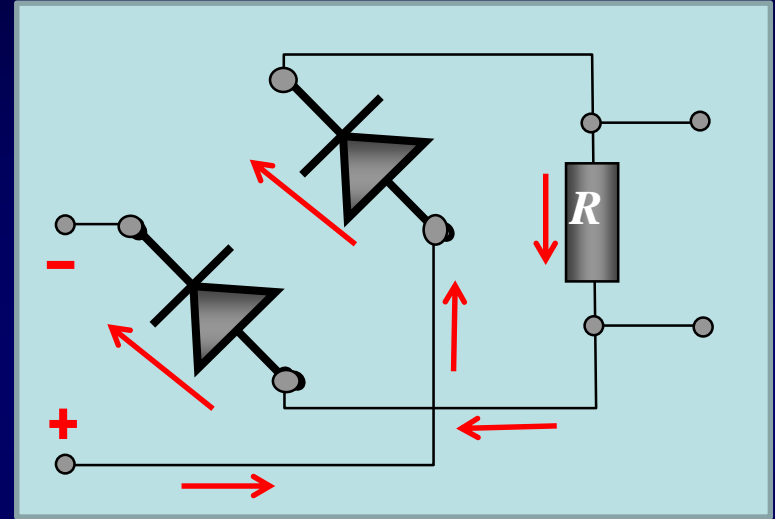


Rectificador de onda completa

Potencial positivo:

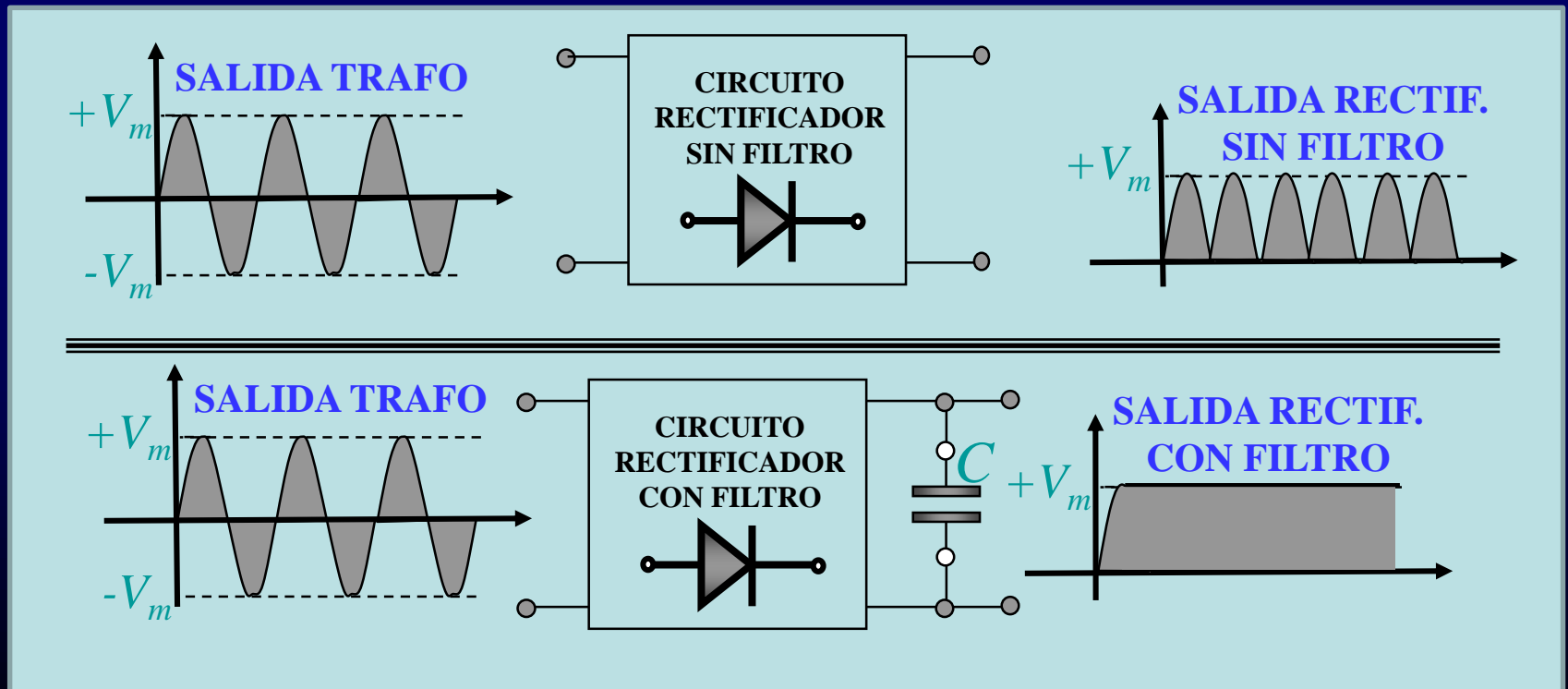


Potencial negativo:



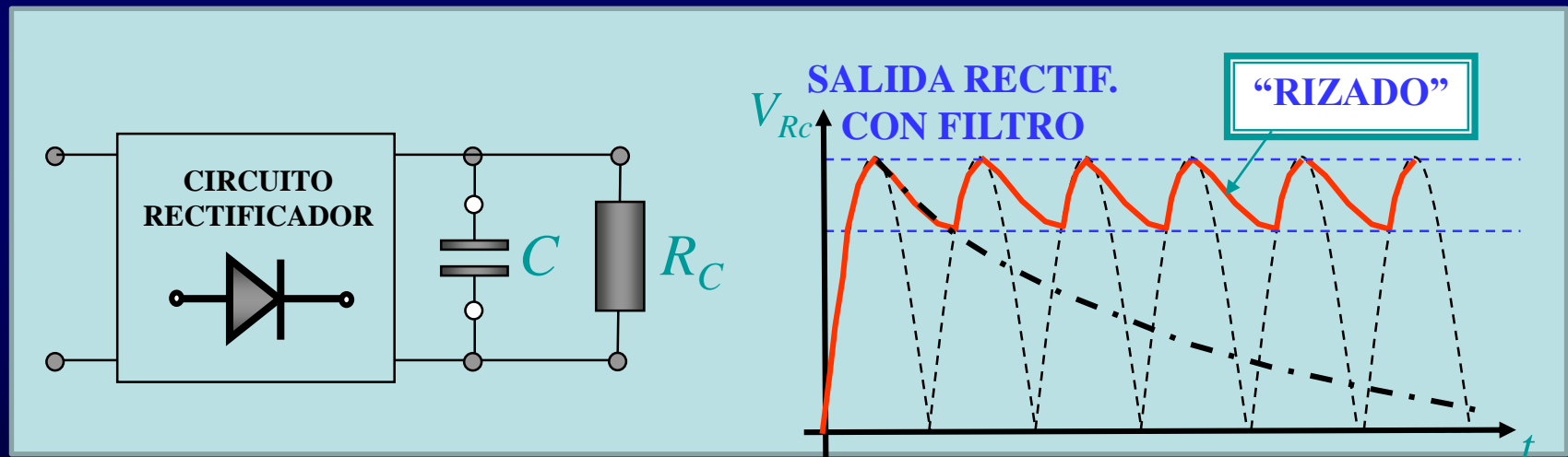
Filtrado

El “suavizamiento” de la señal que sale del circuito rectificador se conoce como “filtrado”. Esto puede lograrse colocando un capacitor a la salida del rectificador.



Filtrado

Cuando se conecta una carga al circuito, la condición cambia. Para comprender lo que sucede con el circuito puede colocarse una resistencia, R_C , como carga del sistema:



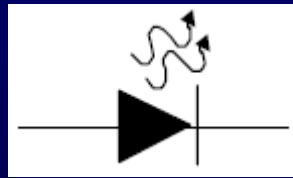
La tensión sobre la carga no es constante sino que varía con el tiempo, lo que se conoce como “rizado”

Problemas 1-2-3

3.4. Diodo emisor de luz (LED).

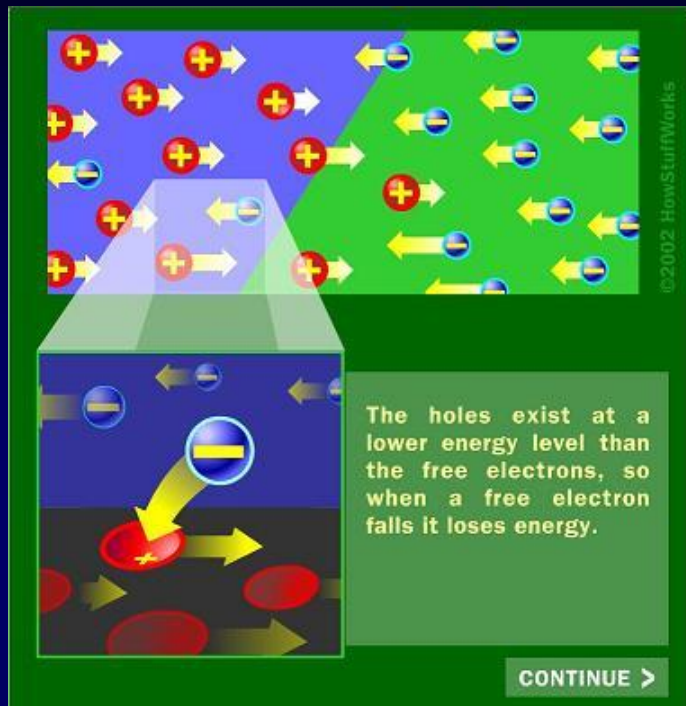
Los diodos luminiscentes (LED, del inglés Light Emitting Diode) se comportan del mismo modo que los diodos rectificadores (no permiten el paso de la corriente en un sentido, y sí en el contrario).

Además presentan una característica singular de gran aplicación tecnológica: la emisión de luz.



En los circuitos eléctricos, estos diodos se representan mediante el símbolo de la figura.

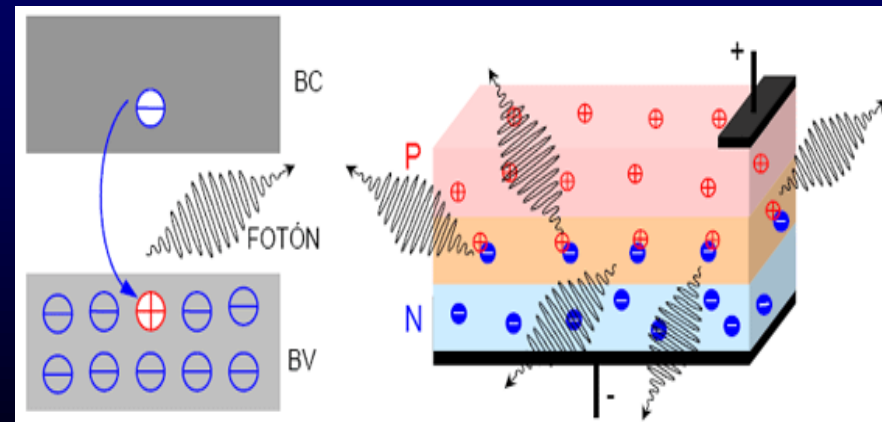
Electroluminiscencia



- Algunos electrones procedentes de la zona n se recombinan con huecos de la zona p , eliminándose mutuamente y desprendiendo una cantidad de energía igual a la energía de la banda prohibida.

- En los diodos de silicio y germanio esta energía es mayoritariamente en forma de calor.

- En los de fosfuro y arseniuro de galio (**GaAsP**) y fosfuro de galio (**GaP**) es en forma de luz visible, por lo que el diodo al ser polarizado de forma directa, emitirá luz, fenómeno denominado electroluminiscencia.



Diodo emisor de luz

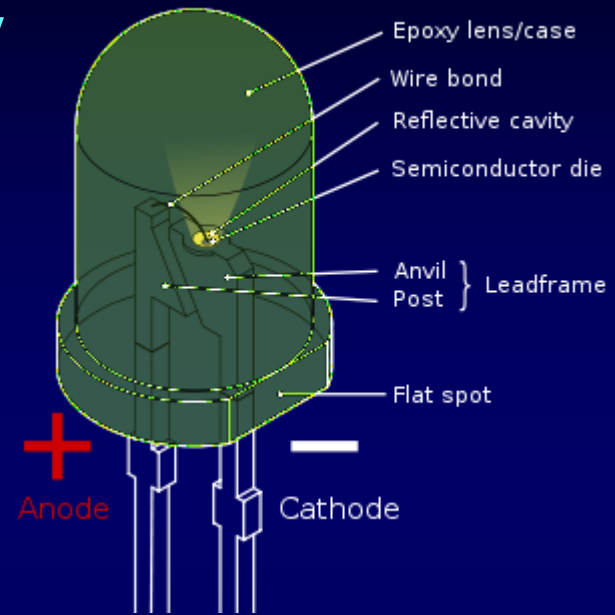
La energía de los fotones emitidos, y por lo tanto el color de la luz, depende de la diferencia de energía entre la banda de conducción y la banda de valencia.

- es decir, de la anchura de la banda prohibida, por lo que dependiendo del semiconductor y el material dopante utilizados, el diodo emitirá luz de diferente color.

$$E = h \nu$$

ν la frecuencia

$h = 6.62 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ constante de Planck



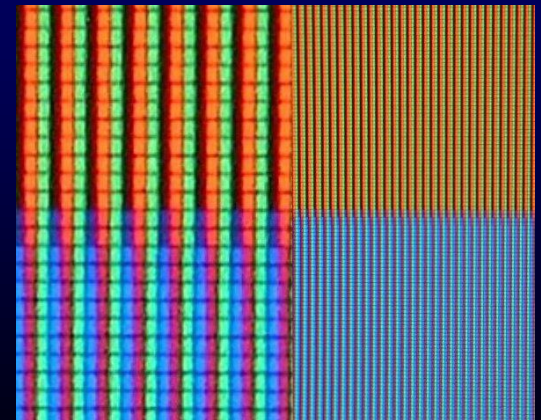
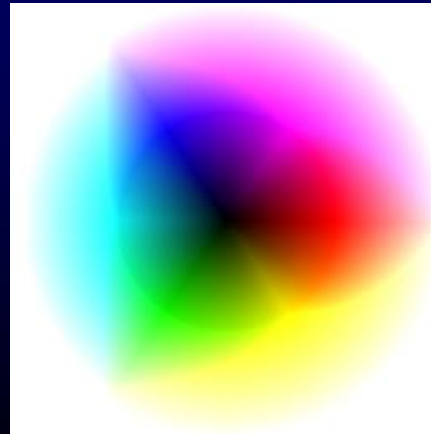
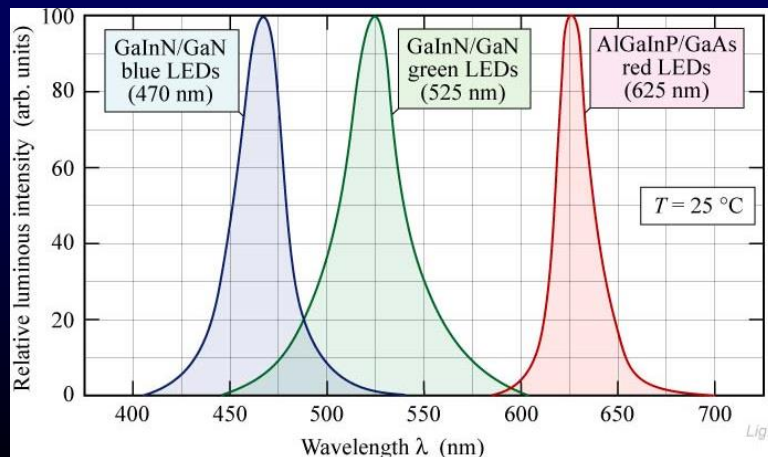
	Color	Wavelength [nm]	Voltage drop [ΔV]	Semiconductor material
	Infrared	$\lambda > 760$	$\Delta V < 1.9$	Gallium arsenide (GaAs) Aluminium gallium arsenide (AlGaAs)
	Red	$610 < \lambda < 760$	$1.63 < \Delta V < 2.03$	Aluminium gallium arsenide (AlGaAs) Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
	Orange	$590 < \lambda < 610$	$2.03 < \Delta V < 2.10$	Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
	Yellow	$570 < \lambda < 590$	$2.10 < \Delta V < 2.18$	Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
	Green	$500 < \lambda < 570$	$1.9^{[53]} < \Delta V < 4.0$	Indium gallium nitride (InGaN) / Gallium(III) nitride (GaN) Gallium(III) phosphide (GaP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Aluminium gallium phosphide (AlGaP)
	Blue	$450 < \lambda < 500$	$2.48 < \Delta V < 3.7$	Zinc selenide (ZnSe) Indium gallium nitride (InGaN) Silicon carbide (SiC) as substrate Silicon (Si) as substrate – (under development)
	Violet	$400 < \lambda < 450$	$2.76 < \Delta V < 4.0$	Indium gallium nitride (InGaN)
	Purple	multiple types	$2.48 < \Delta V < 3.7$	Dual blue/red LEDs, blue with red phosphor, or white with purple plastic
	Ultraviolet	$\lambda < 400$	$3.1 < \Delta V < 4.4$	Diamond (235 nm) ^[54] Boron nitride (215 nm) ^{[55][56]} Aluminium nitride (AlN) (210 nm) ^[57] Aluminium gallium nitride (AlGaInN) Aluminium gallium indium nitride (AlGaInN) – (down to 210 nm) ^[58]
	Pink	multiple types	$\Delta V \sim 3.3^{[59]}$	Blue with one or two phosphor layers: yellow with red, orange or pink phosphor added afterwards, or white with pink pigment or dye. ^[60]
	White	Broad spectrum	$\Delta V = 3.5$	Blue/UV diode with yellow phosphor

RGB

La descripción RGB (del inglés Red, Green, Blue; "rojo, verde, azul") de un color hace referencia a la composición del color en términos de la intensidad de los colores primarios con que se forma.

Es un modelo de color basado en la síntesis aditiva, con el que es posible representar un color mediante la mezcla por adición de los tres colores luz primarios

- Se usa en pantallas de ordenadores, móviles, etc.

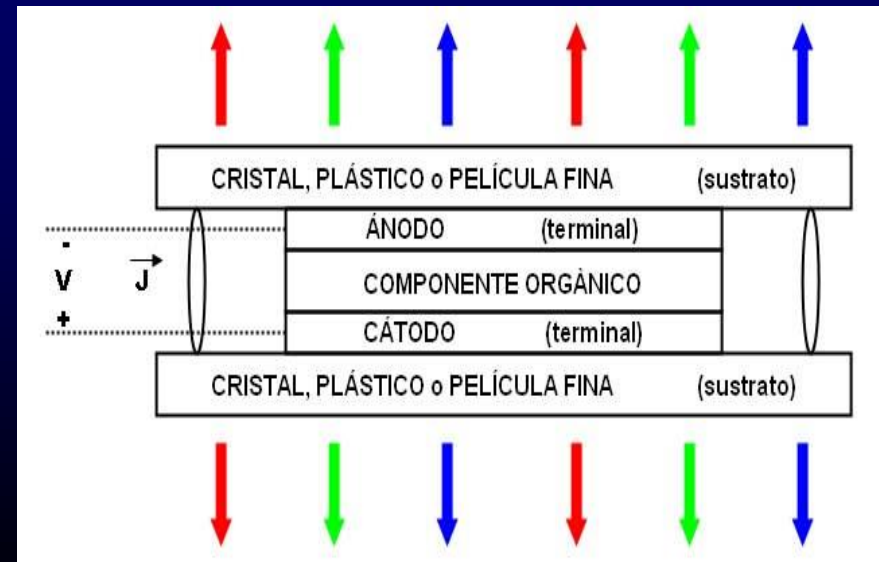


Diodo orgánico de emisión de luz

- también conocido como OLED (del inglés, organic LED).
- Un OLED está compuesto por dos finas capas orgánicas: de emisión y de conducción, que a la vez están comprendidas entre una fina película que hace de terminal ánodo y otra igual que hace de cátodo.
- En general estas capas están hechas de moléculas o polímeros que conducen la electricidad.



Sus niveles de conductividad eléctrica se encuentra entre el nivel de un aisladore y el de un conductor, y por ello se los llama semiconductores orgánicos

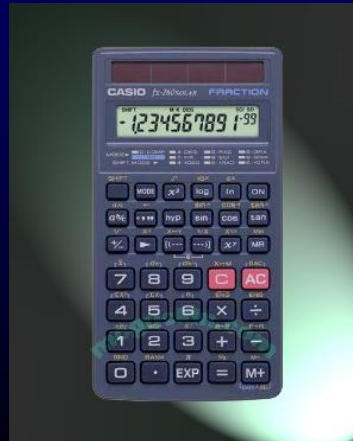
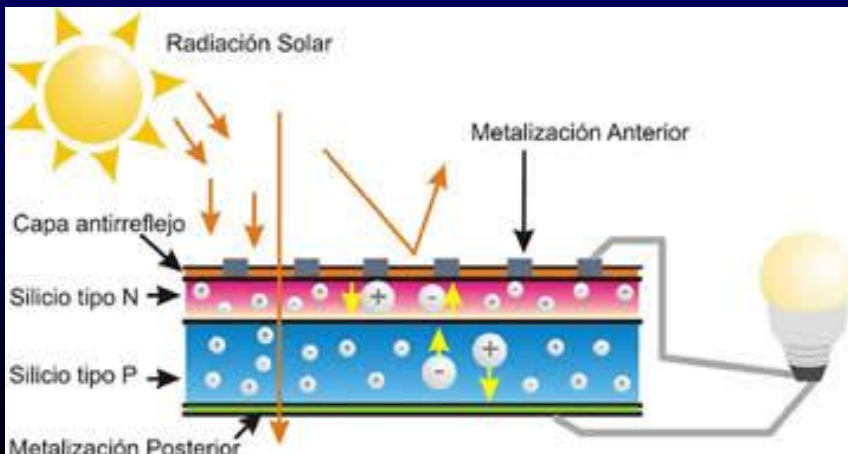
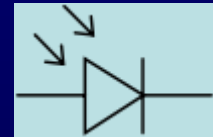


Celda fotovoltaica

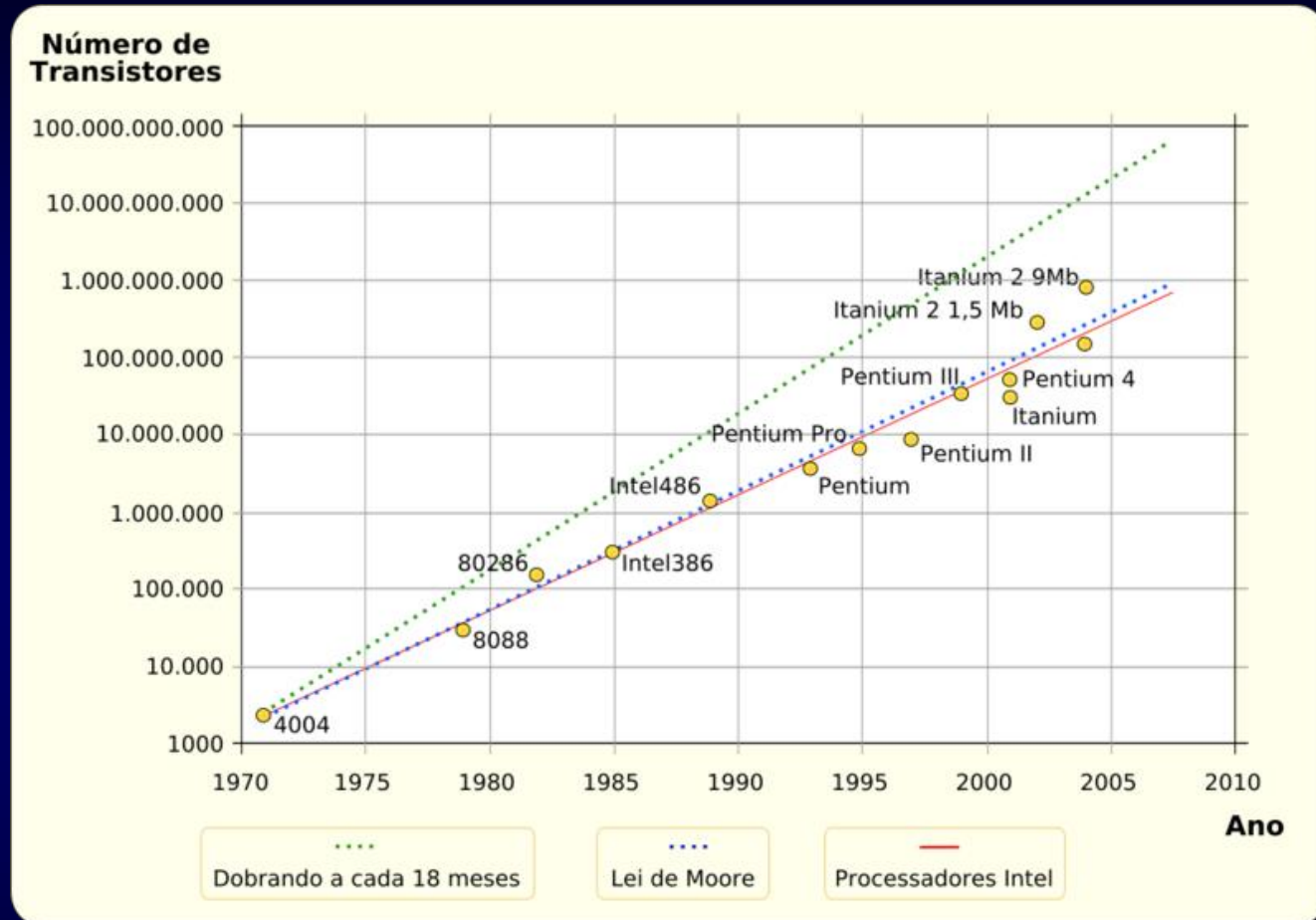
El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones por un metal cuando se hace incidir sobre él una radiación electromagnética (luz visible o ultravioleta)

Efecto fotovoltaico: transformación parcial de la energía luminosa en energía eléctrica.

- Las celdas fotovoltaicas son dispositivos que transforman la luz solar en electricidad.

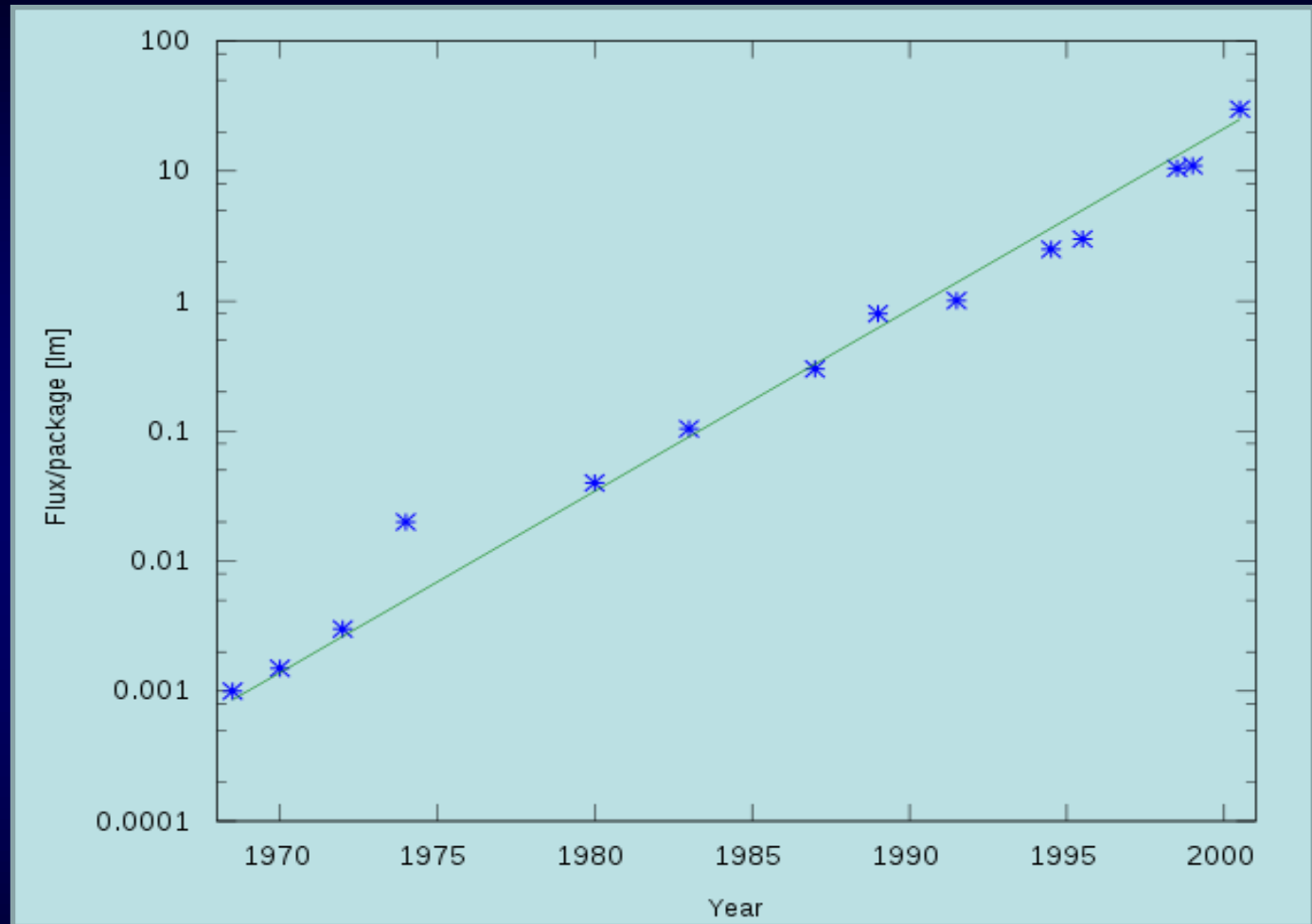


Desarrollo de transistores



Ley de Moore expresa que aproximadamente cada 18 meses se duplica el número de transistores en un circuito integrado. Se trata de una ley empírica, formulada por el co-fundador de Intel, Gordon E. Moore el 19 de abril de 1965.

Desarrollo de transistores




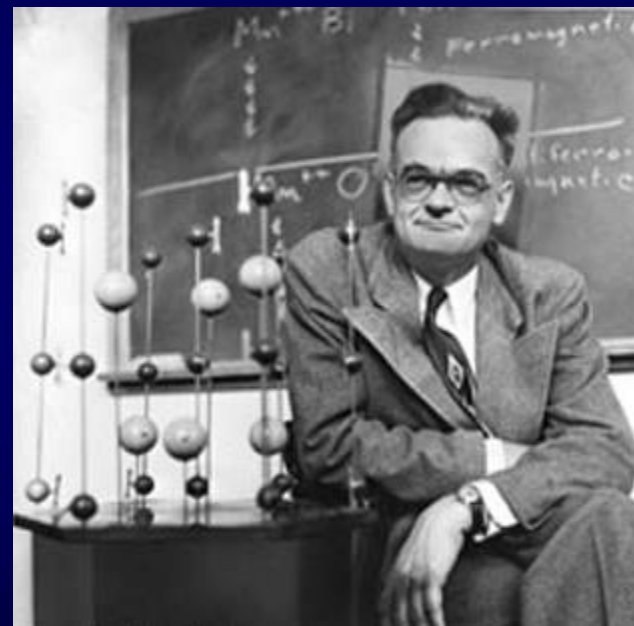
Una ilustración de la ley de Haitz.
La salida de luz en LEDs como una función del tiempo en escala semilogarítmica.

Problema 5

3.5. Diodo Zener: limitador de tensión

El diodo Zener es un diodo de silicio que se ha construido para que funcione en las zonas de rupturas, recibe ese nombre por su inventor, Clarence Zener.

- El símbolo electrónico es 
- El diodo Zener es la parte esencial de los reguladores de tensión casi constantes con independencia de que se presenten grandes variaciones de la tensión de red, de la resistencia de carga y temperatura.



Clarence Melvin Zener
(1905 - 1993)

- se polariza inversamente, respecto al diodo convencional

Características del diodo Zener

- Se aprovecha de la tensión inversa de ruptura mediante el control de los niveles de dopado. Se consiguen tensiones de ruptura de $(2 - 200)V$ y potencias máximas de entre 0.5 W y 50 W .

Efecto Zener.

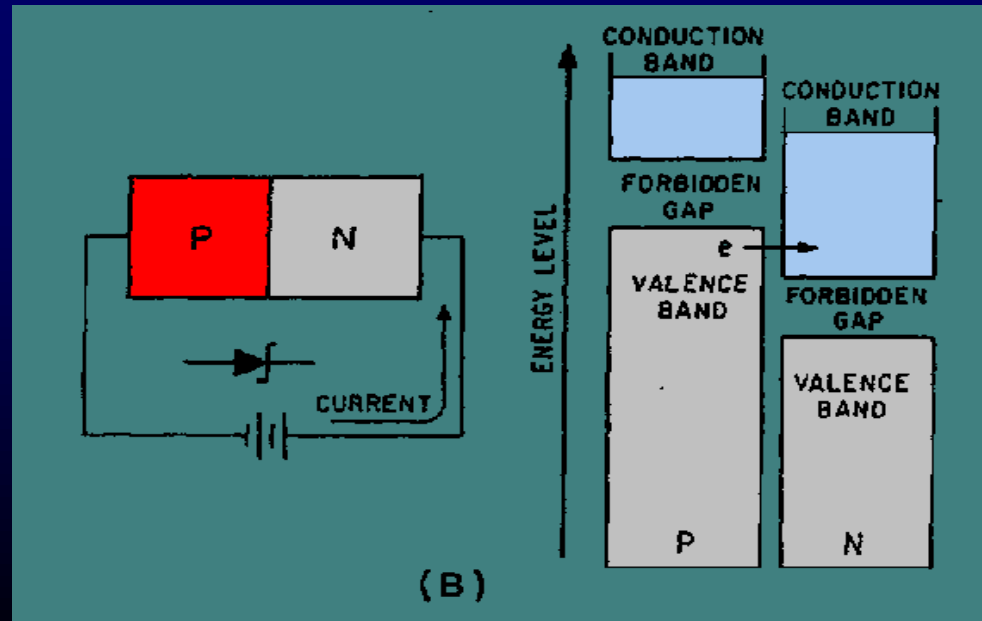
Se produce este efecto cuando la intensidad del campo eléctrico es lo suficientemente elevada y extrae electrones de valencia en un diodo polarizado inversamente.

Efecto Zener

- La polarización inversa hace que la banda de valencia del material p corresponde al nivel de energía de la banda de conducción en el material n .

Bajo esta condición, los electrones de valencia del material p pueden cruzar la región de unión sin adquirir ninguna energía adicional. Esta acción se denomina túnel.

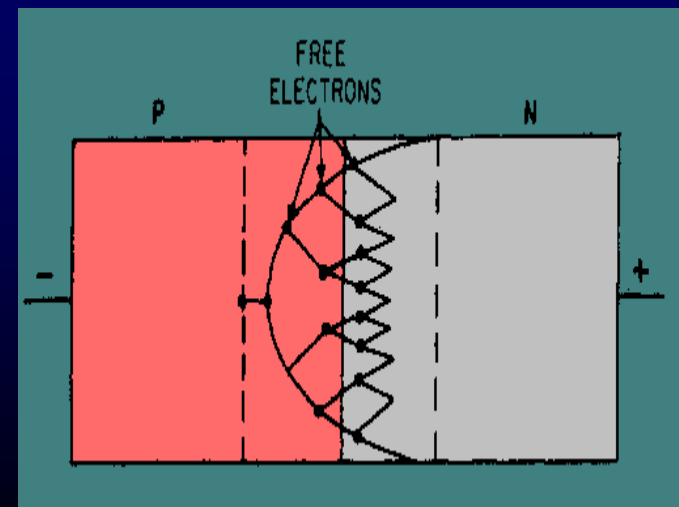
El fenómeno de efecto túnel sólo tiene lugar en los diodos muy dopados, como los diodos Zener.



Efecto avalancha

Cuando la tensión en polarización inversa alcanza el valor de la tensión de ruptura, los electrones que han saltado a la banda de conducción por efecto de la temperatura se aceleran debido al campo eléctrico incrementando su energía cinética, de forma que al colisionar con electrones de valencia los liberan;

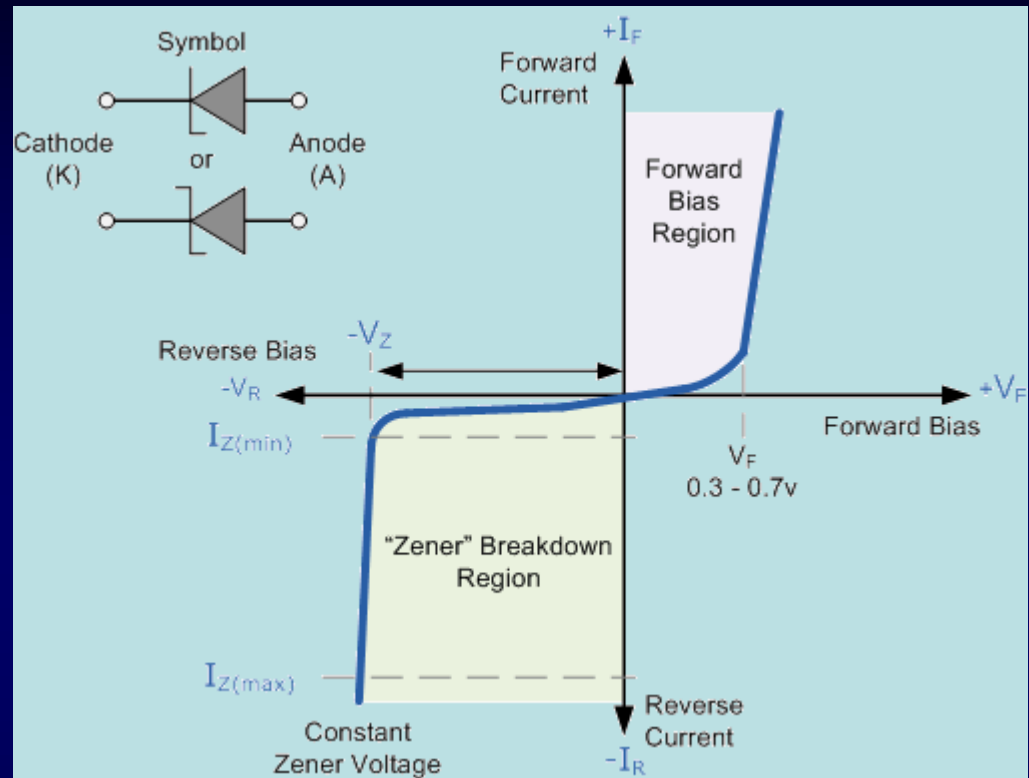
éstos a su vez, se aceleran y colisionan con otros electrones de valencia liberándolos también, produciéndose una avalancha de electrones cuyo efecto es incrementar la corriente conducida por el diodo sin apenas incremento de la tensión.



Característica I-V del diodo Zener

1) La corriente en polarización inversa es mucho más intensa que en polarización directa.

2) V_γ – tensión umbral



3) I_{max} – Intensidad máxima que puede circular sin que el diodo se estropee por efecto Joule

4) $I_{max, z}$ - Intensidad máxima en polarización inversa

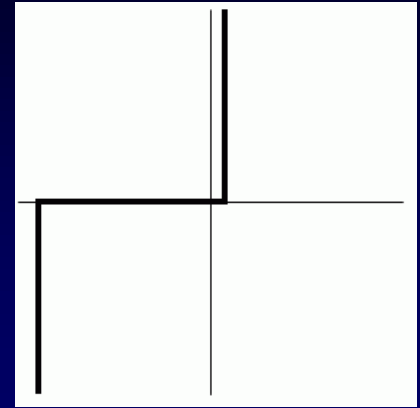
5) V_Z - Tensión Zener. Su valor varía con el grado de dopaje y puede valer entre 2 y 200 V.

Diodo Zener ideal

Modelo simplificado del diodo Zener:

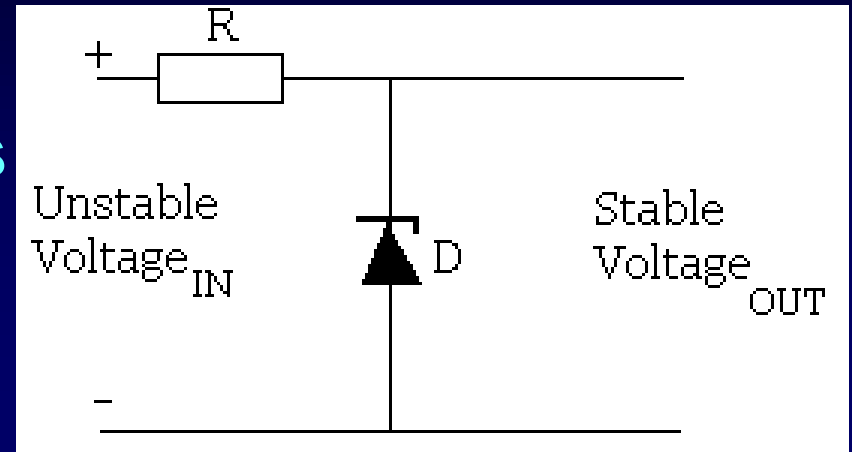
1) El diodo conduce en polarización Directa cuando la diferencia de potencial en sus extremos es mayor que V_γ . El valor de la diferencia de potencial se mantiene constante en V_γ por cualquier valor de la intensidad.

2) El diodo conduce en polarización inversa cuando la diferencia de potencial en sus extremos es mayor que V_Z . El valor de la diferencia de potencial se mantiene constante en V_Z para cualquier valor de la intensidad.



Limitador de tensión

- **Aplicaciones:** Como en polarización inversa la diferencia de potencial en los extremos del diodo Zener es muy estable, su principal aplicación es como limitador de tensión.



Es decir elemento que protege de sobretensiones un circuito o una parte de un circuito.

Para ello se conecta el diodo Zener en paralelo al circuito o la parte del circuito a proteger.

Problemas 6,8,9

Puertas lógicas

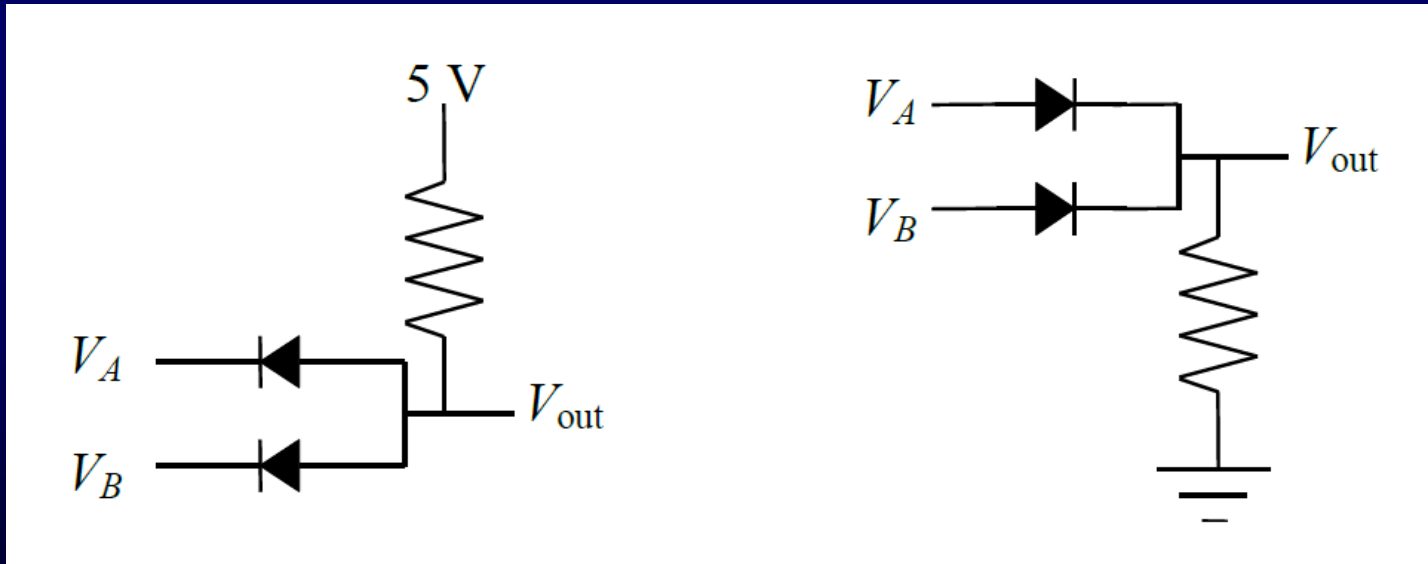
- Una **puerta lógica** es un dispositivo electrónico con una función **booleana**.
- Se pueden aplicar a tecnología electrónica, eléctrica, mecánica, hidráulica y neumática
- Álgebra de Boole es una estructura algebraica que esquematiza las operaciones lógicas Y, O, NO y SI (AND, OR, NOT, IF), así como el conjunto de operaciones unión, intersección y complemento.

El diodo como interruptor

La puerta lógica SÍ o “buffer” realiza la función booleana igualdad. Puede ser utilizada como un interruptor o un amplificador de corriente .

Compuertas lógicas

- En este tipo de compuertas hay dos entradas (A y B) y una salida (*out*). Las entradas pueden estar
 - a un “1” lógico (5 voltios) o
 - a un “0” lógico (0 voltios)



(Problema 10)

3.6. Transistores MOSFET de enriquecimiento. Puertas lógicas

- El transistor es un dispositivo electrónico semiconductor que cumple funciones de amplificador, oscilador, conmutador o rectificador.
- El término «transistor» es la contracción en inglés de *transfer resistor*
- El transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor o MOSFET (en inglés *Metal-oxide-semiconductor Field-effect transistor*) es un transistor utilizado para amplificar o conmutar señales electrónicas.
- MOSFET es el transistor más utilizado en la industria microelectrónica

Ventajas de transistores.

Los transistores tienen varias ventajas sobre los tubos al vacío:

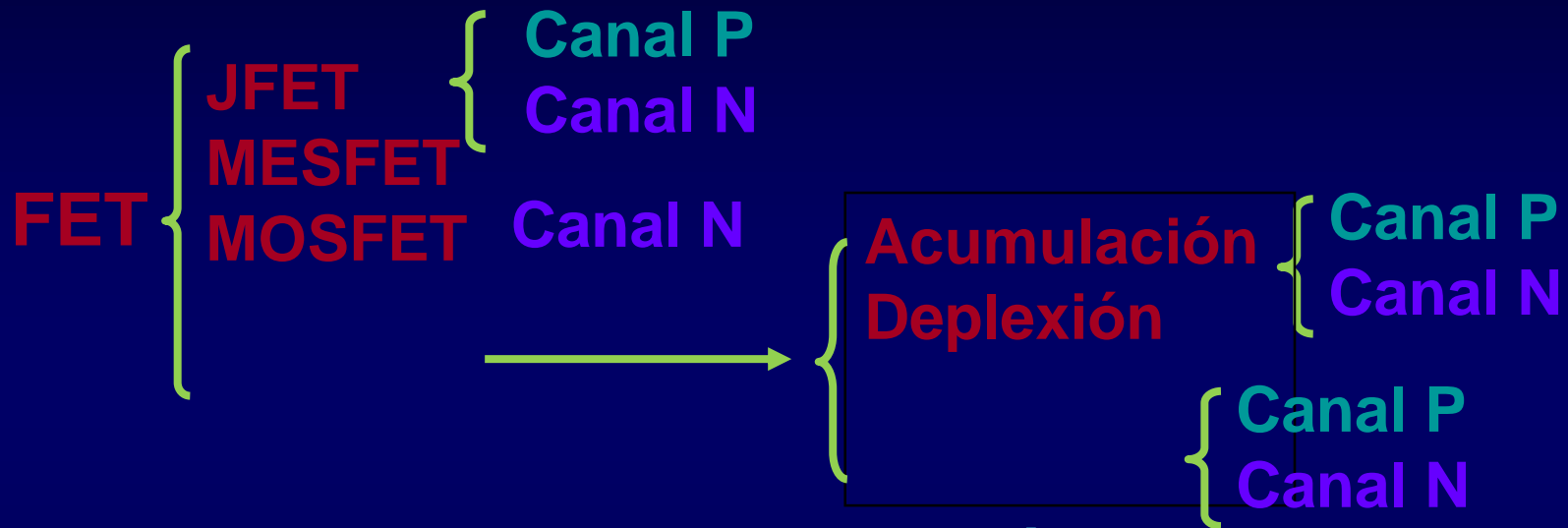
- Cualquier aparato que use tubos al vacío no funciona inmediatamente después de haberse conectado. El transistor no requiere calentamiento.
- El uso de un transistor en lugar de tubos al vacío ahorra mucha energía, y por tanto, resulta más económico.
- La respuesta del transistor a señales de frecuencias muy altas es muy efectiva, lo cual no ocurre con los tubos al vacío.

Uso de transistores.

Es el componente fundamental de la moderna electrónica, tanto digital como analógica.

- En los circuitos digitales se usan como interruptores, y disposiciones especiales de transistores configuran las puertas lógicas, memorias RAM y otros dispositivos
- En los circuitos analógicos se usan principalmente como amplificadores.
- Los MOSFET de enriquecimiento han revolucionado la industria de los ordenadores, ya que son ideales como dispositivos de conmutación por su tensión de umbral.

Tipos de transistores



BJT: Transistores bipolares de unión.

FET: Transistores de efecto de campo.

JFET: Transistores de efecto de campo de unión.

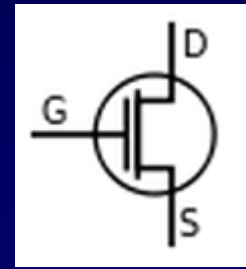
MESFET: Transistores de efecto de campo de metal semiconductor.

MOSFET: Transistores de efecto de campo de metal-oxido-semiconductor.

MOSFET de enriquecimiento

Un transistor de unión bipolar está formado por dos uniones *pn* en un solo cristal semiconductor, separados por una región muy estrecha.

De esta manera quedan formadas tres regiones:

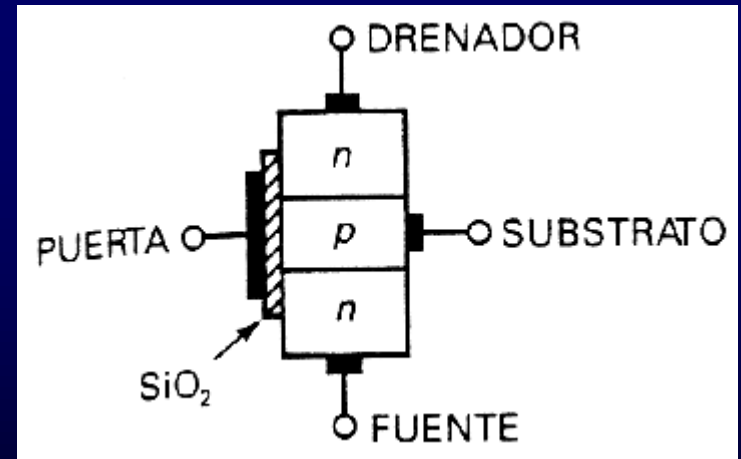


Fuente / Surtidor (S - *source*), que se diferencia de las otras dos por estar fuertemente dopada, funciona como emisor de portadores de carga.

Puerta (G - *gate*), la intermedia, muy estrecha, que separa el emisor del Drenador (D).

MOSFET de enriquecimiento

- El término **enriquecimiento** hace referencia al incremento de la conductividad eléctrica debido a un aumento de la cantidad de portadores de carga en la región correspondiente al canal.
- El canal puede formarse con un incremento en la concentración de
 - electrones (NMOS)
 - huecos (PMOS)



- De este modo un transistor NMOS se construye con un sustrato tipo *p* y tiene un canal de tipo *n*.

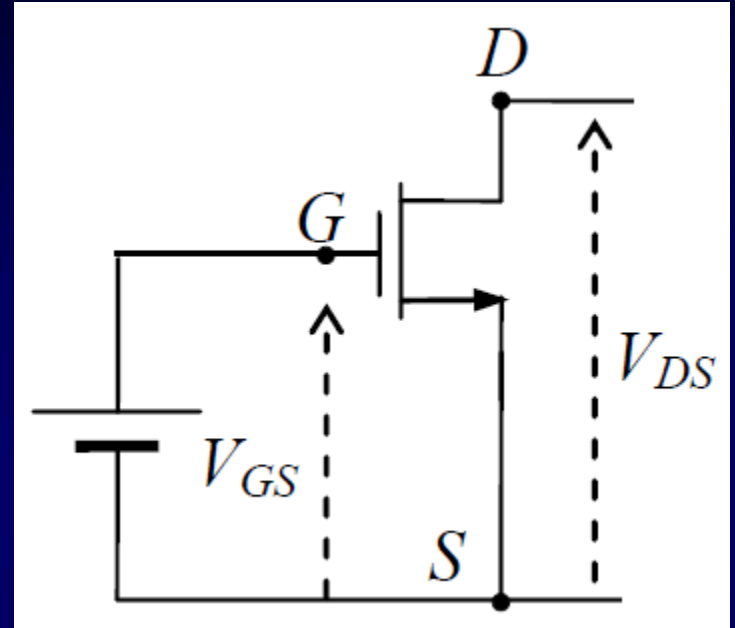
Regiones operativas

Los transistores de unión bipolar tienen diferentes regiones operativas, definidas principalmente por la forma en que son polarizados

- Región de corte
- Región lineal (óhmica)
- Región de saturación

Región de corte

- Cuando $V_{GS} < V_T$
- no existe un canal entre la fuente y el drenador
- el MOSFET se comporta como un interruptor abierto.
- el dispositivo se encuentra apagado.



Región lineal (óhmica)

- Cuando $V_{GS} > V_T$ y $V_{DS} < (V_{GS} - V_T)$
- El transistor se comporta como una resistencia controlada por la tensión de compuerta.

La corriente entre el drenador y la fuente es modelada por medio de la ecuación:

$$I_D = \beta [(V_{GS} - V_T) V_{DS} - V_{DS}^2 / 2]$$

donde β es un parámetro característico del transistor, con unidades A/V^2

R. lineal: Resistencia del canal

- En el limite de V_{DS} pequeño

$$I_D = \beta [(V_{GS} - V_T) V_{DS} - V_{DS}^2 / 2] \approx \beta (V_{GS} - V_T) V_{DS}$$

es decir, hay relación lineal entre la intensidad I_D y V_{DS}

y la resistencia del canal se puede aproximar con

$$r_{DS} = V_{DS} / I_D = 1 / [\beta (V_{GS} - V_T)]$$

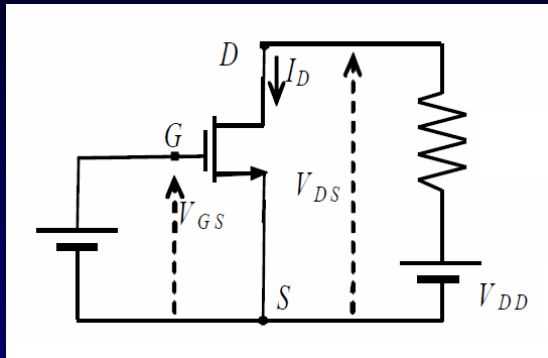
Región de saturación

- Cuando $V_{GS} > V_T$ y $V_{DS} > (V_{GS} - V_T)$
- La corriente entre fuente y drenador se hace independiente de la diferencia de potencial entre ambos terminales.

En esta región la corriente de drenador se modela con la siguiente ecuación

$$I_D = \beta / 2 \times (V_{GS} - V_T)^2$$

Resumen: transistor NMOS



**Voltaje GS vs
tensión umbral**

$$¿V_{GS} > V_T ?$$

sí

no

abierto

cerrado

Voltaje DS vs GT

$$V_{DS} > (V_{GS} - V_T)$$

zona de corte

$$I_D = 0$$

sí

no

zona de saturación

$$I_D = \beta / 2 \times (V_{GS} - V_T)^2$$

zona lineal (óhmica)

$$I_D = \beta [(V_{GS} - V_T) V_{DS} - V_{DS}^2 / 2]$$

Problemas 11,13,14,16, 26

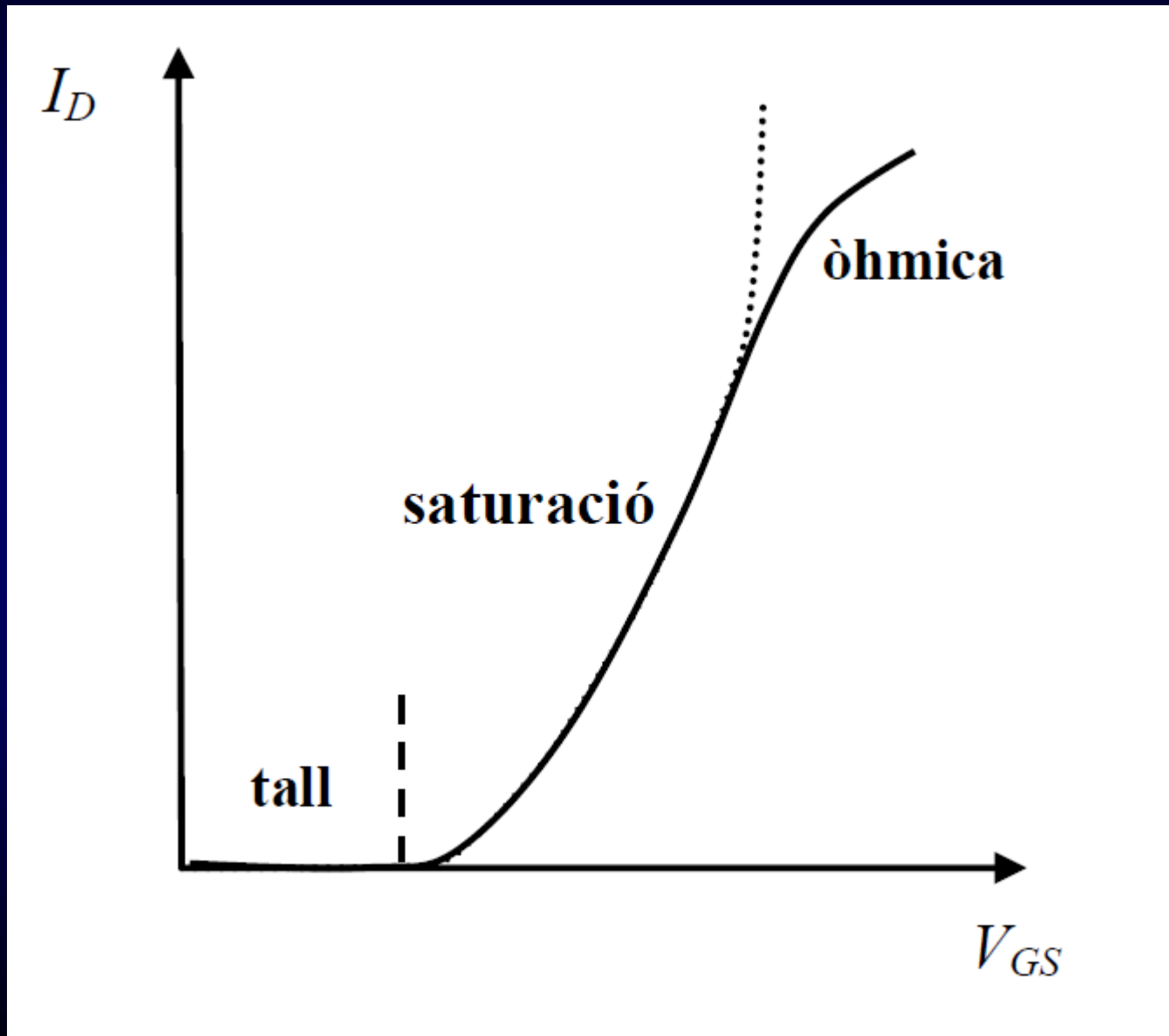
Curva característica

- Cuando $V_{GS} > V_T$ y $V_{DS} > (V_{GS} - V_T)$
- La corriente entre fuente y drenador se hace independiente de la diferencia de potencial entre ambos terminales.

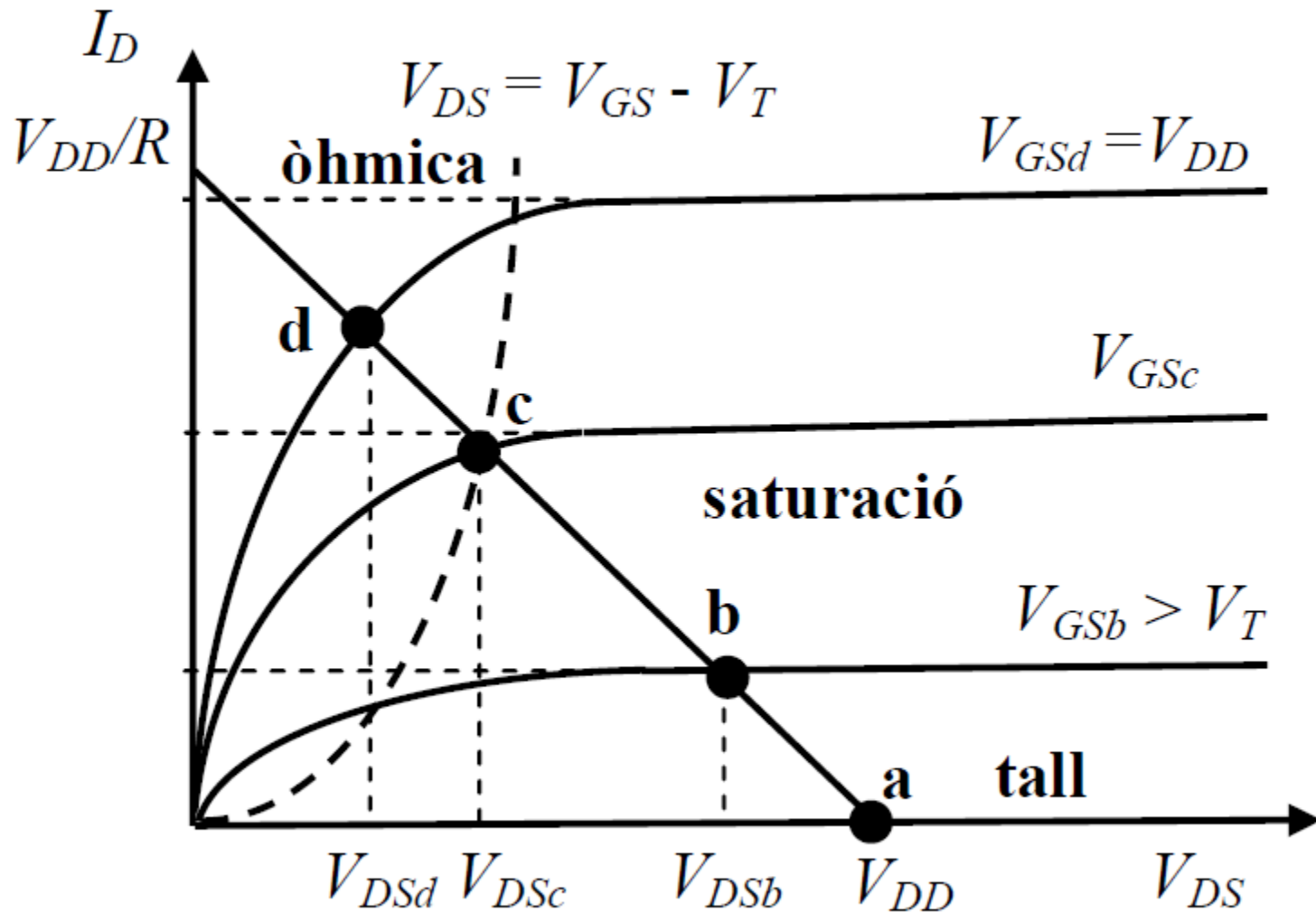
En esta región la corriente de drenador se modela con la siguiente ecuación

$$I_D = \beta / 2 \times (V_{GS} - V_T)^2$$

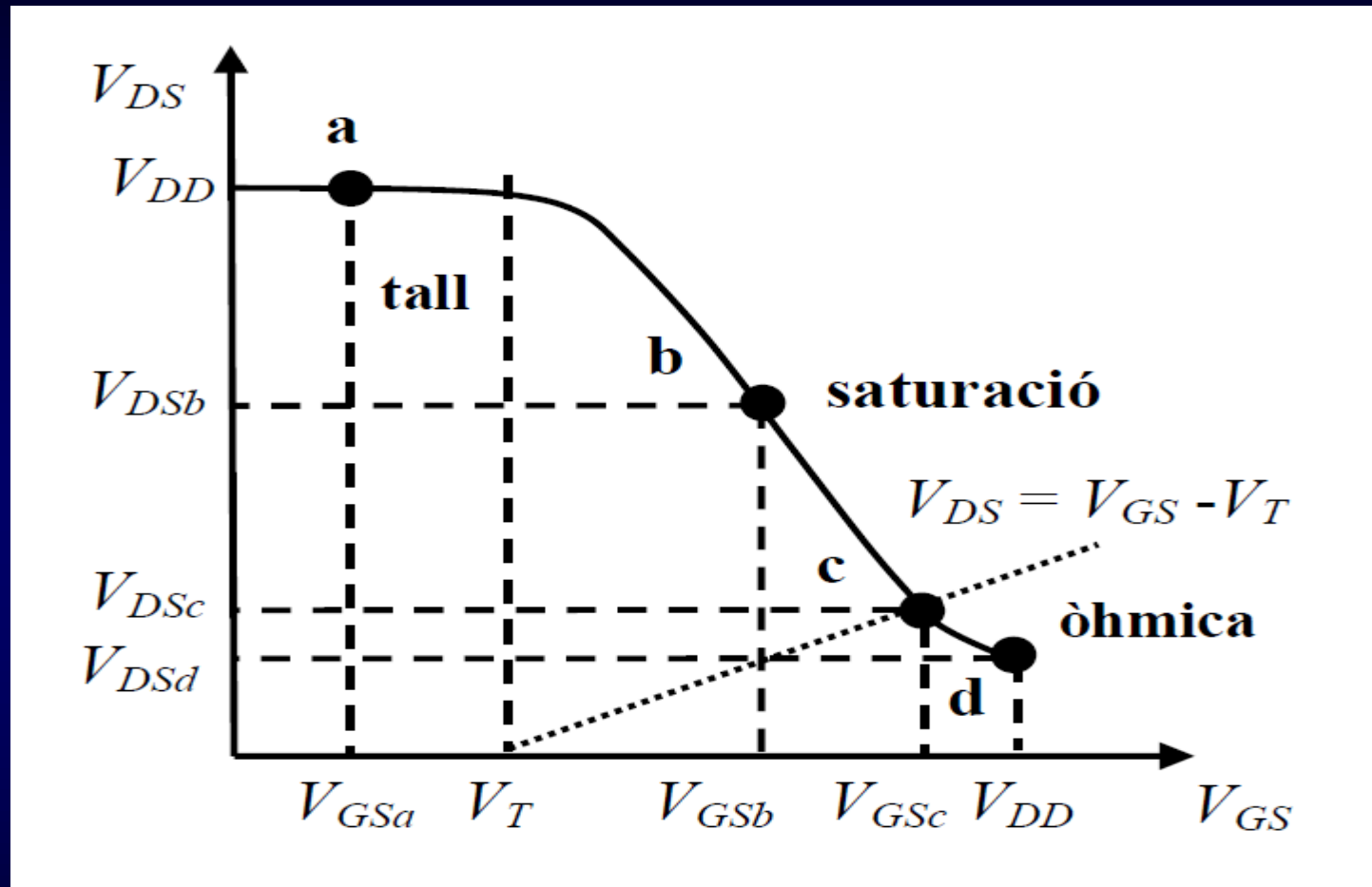
Curva característica I_D V_{GS}



Curva característica I_D V_{DS}



Característica de transferencia (V_{DS} , V_{GS})



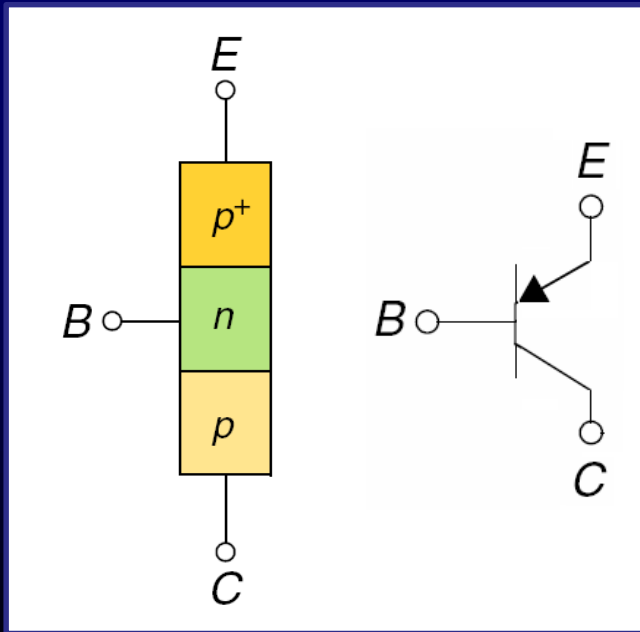
puede ser utilizado como

- amplificador (zona óhmica)
- inversora (zonas óhmica/corte)

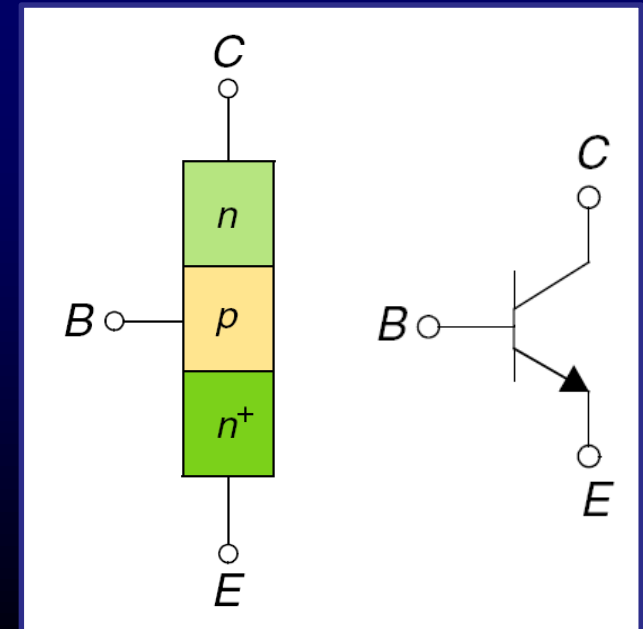
Transistores bipolares de unión

- Un transistor *npn* puede ser considerado como dos diodos con la región del ánodo compartida.
- En una operación típica, la unión base-emisor está polarizada en directa y la unión base-colector está polarizada en inversa.

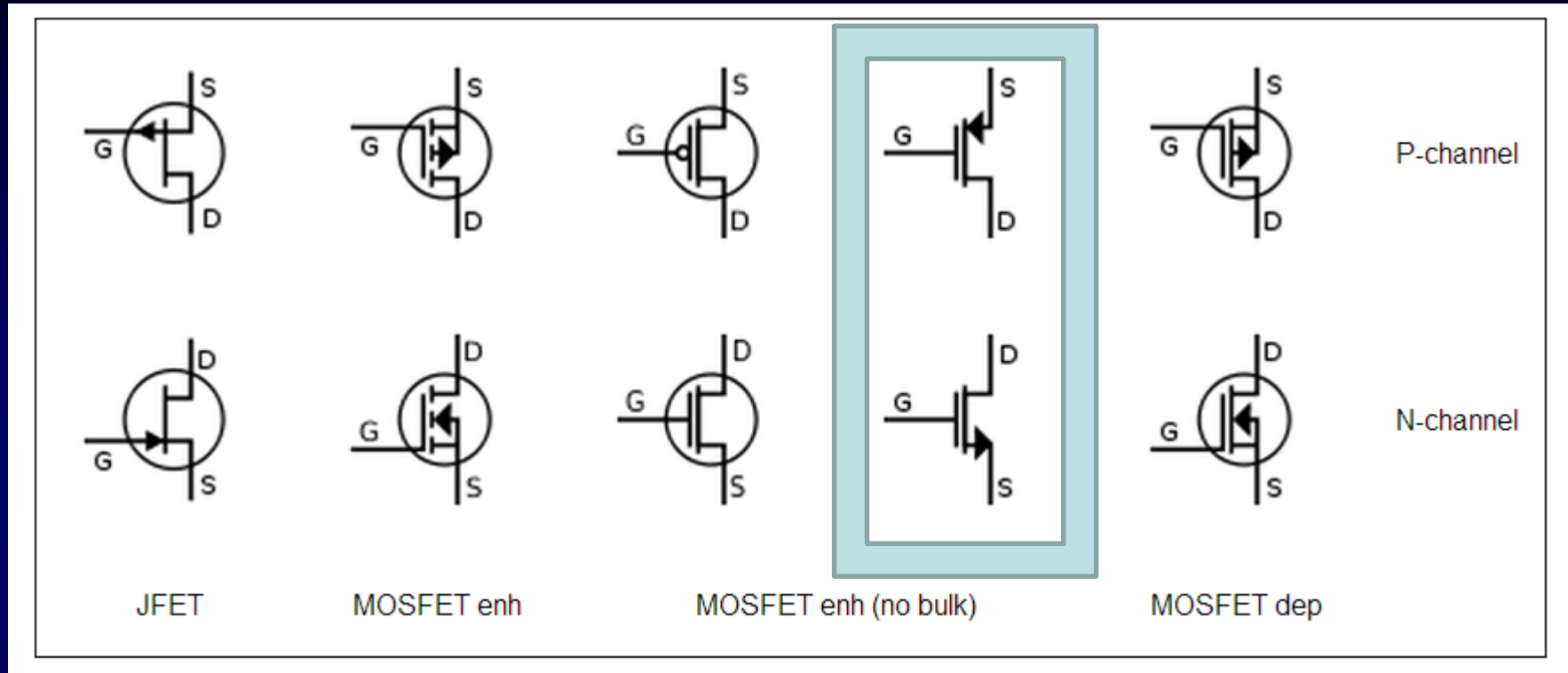
pnp



npn

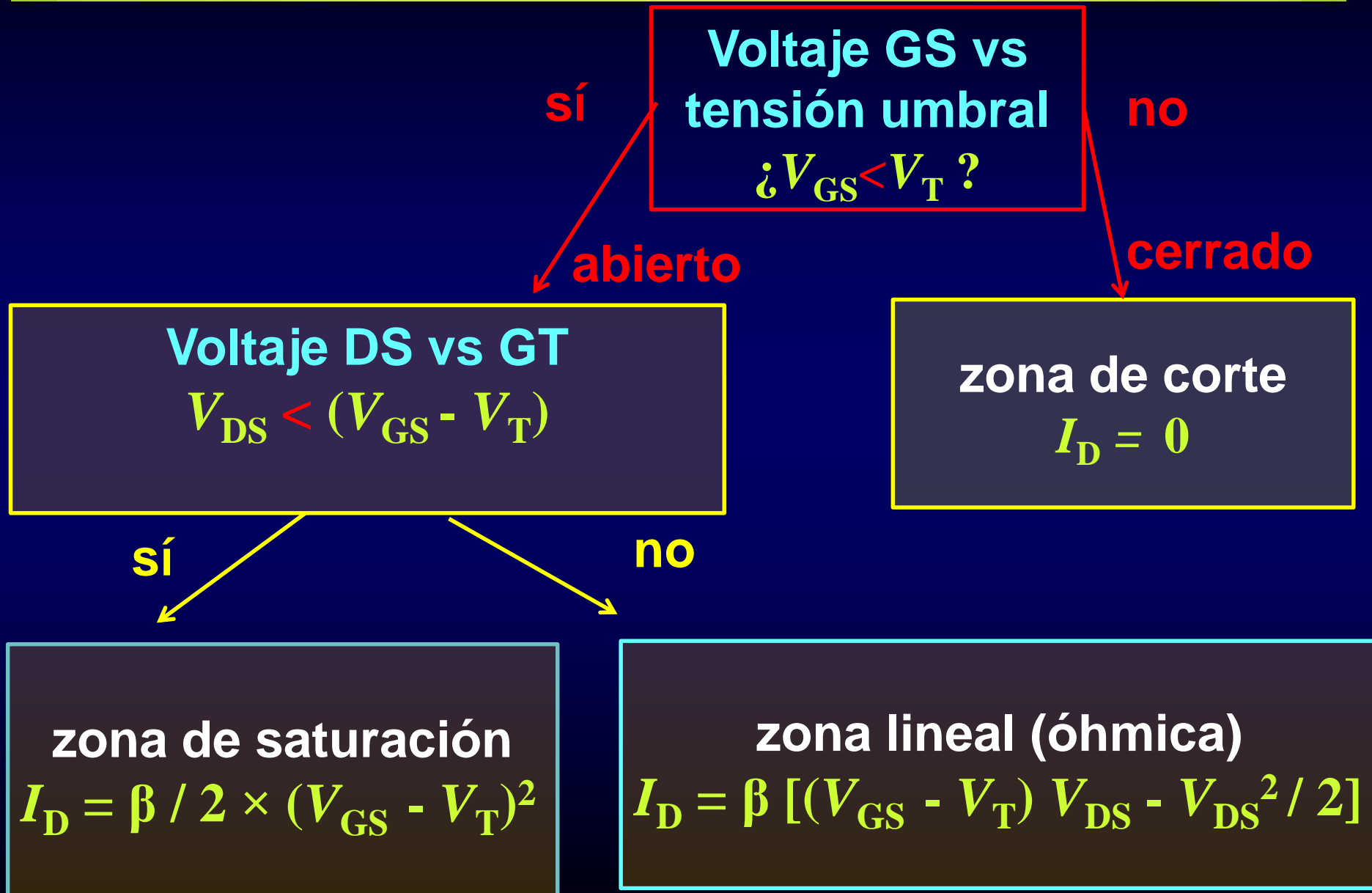


PMOS



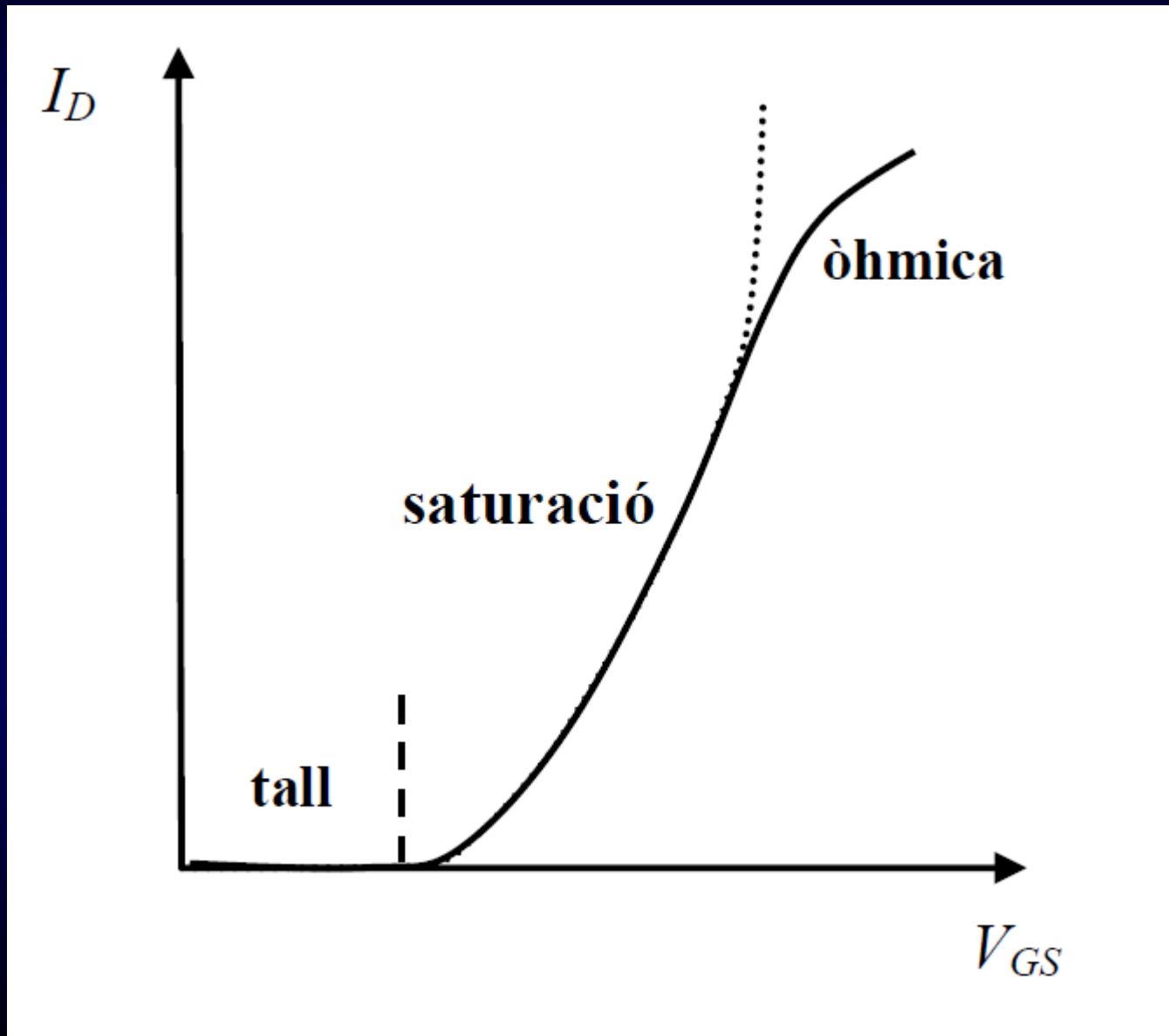
El canal se forma con un incremento de electrones en un nMOSFET (NMOS), o huecos en un pMOSFET (PMOS). De este modo un transistor NMOS se construye con un sustrato tipo p y tiene un canal de tipo n, mientras que un transistor PMOS se construye con un sustrato tipo n y tiene un canal de tipo p.

Resumen: transistor PMOS

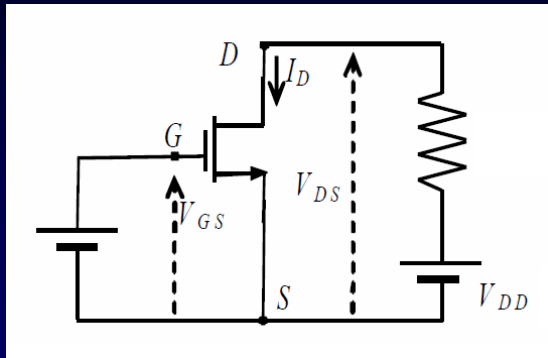


Problemas 27,28,30

Curva característica I_D V_{GS}



METODO GRÁFICO: NMOS



**Voltaje GS vs
tensión umbral**

$$¿V_{GS} > V_T ?$$

sí

no

abierto

cerrado

Voltaje DS vs GT

$$V_{DS} > (V_{GS} - V_T)$$

zona de corte

$$I_D = 0$$

sí

no

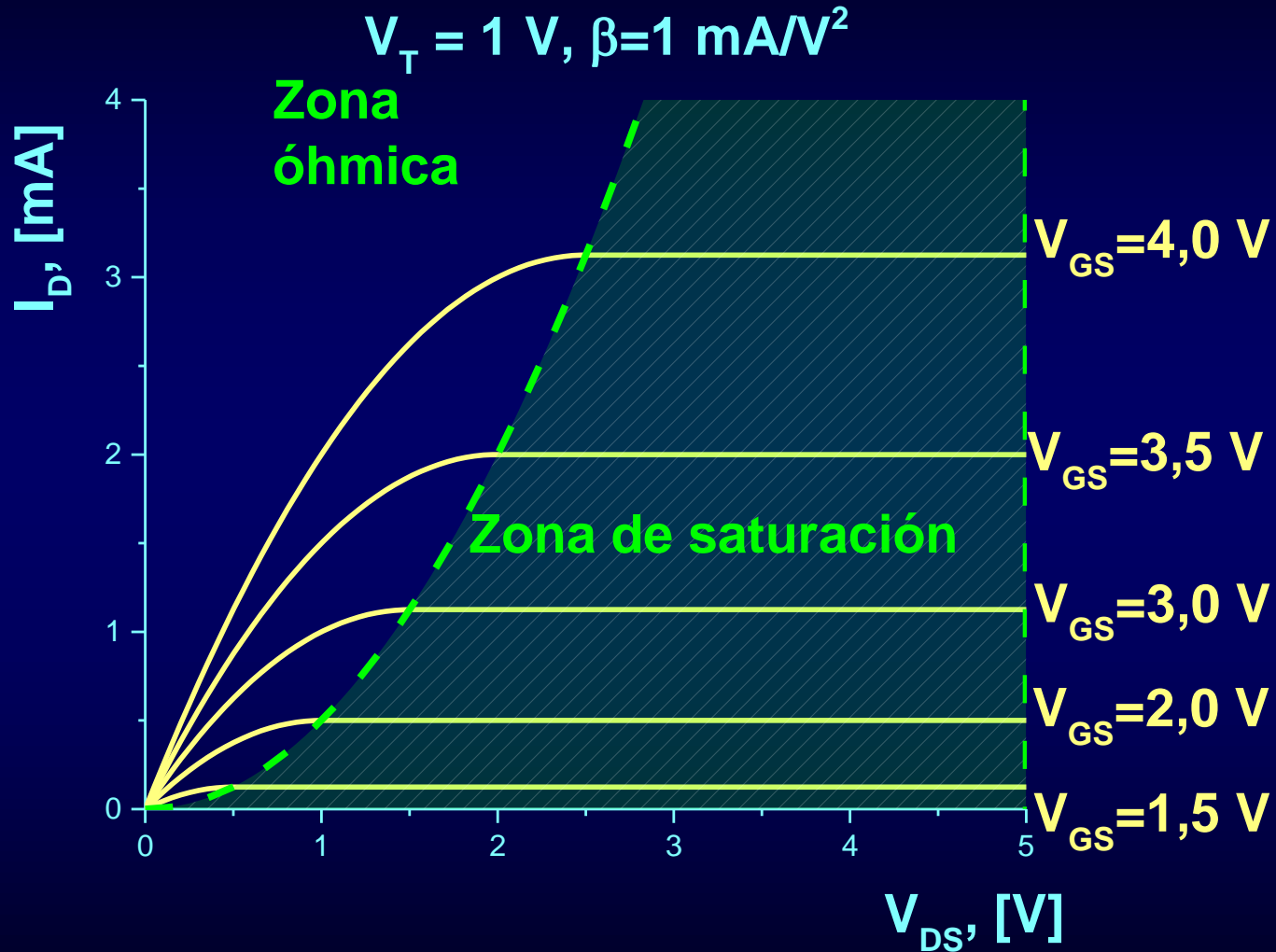
zona de saturación

$$I_D = \beta / 2 \times (V_{GS} - V_T)^2$$

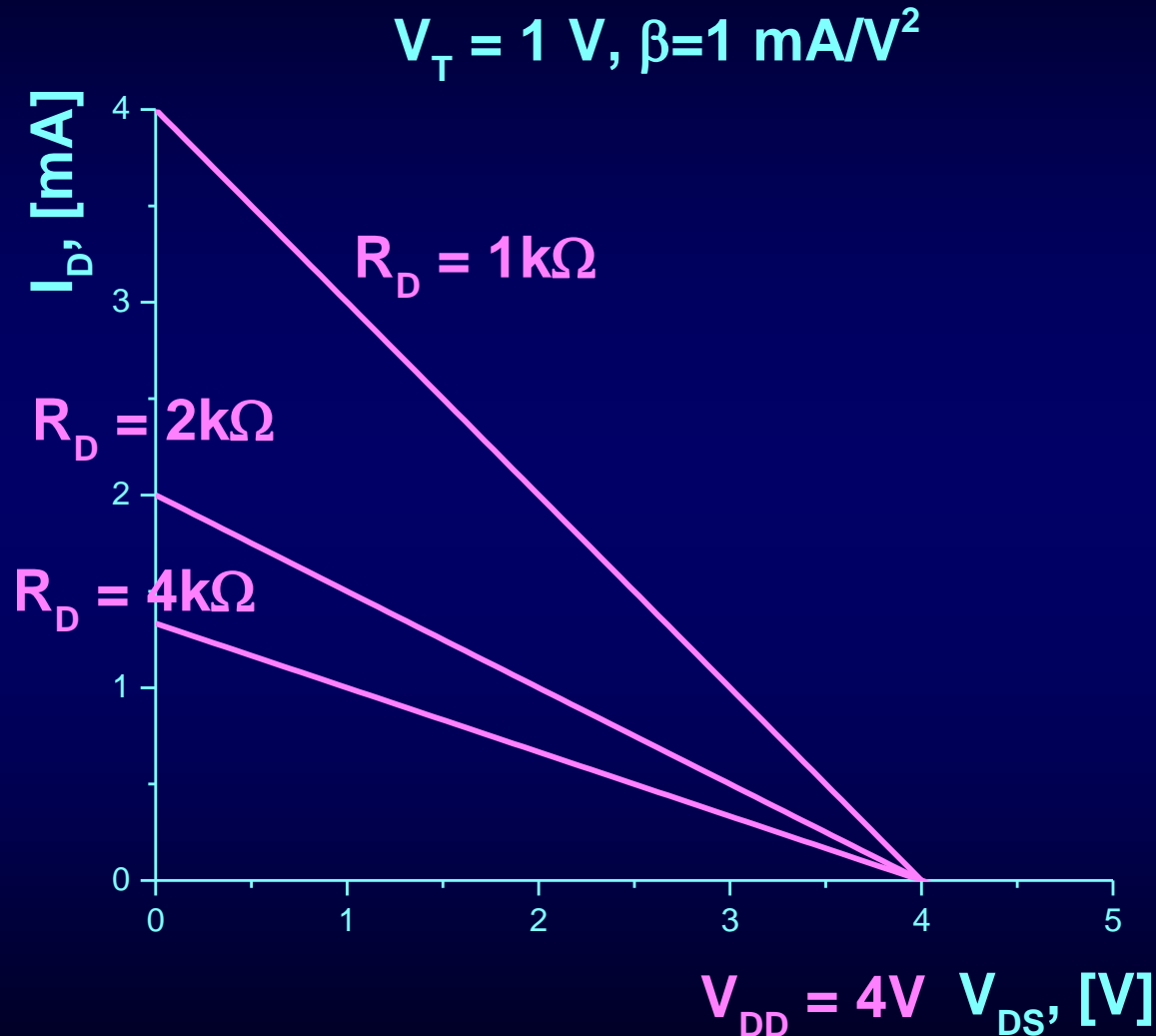
zona lineal (óhmica)

$$I_D = \beta [(V_{GS} - V_T) V_{DS} - V_{DS}^2 / 2]$$

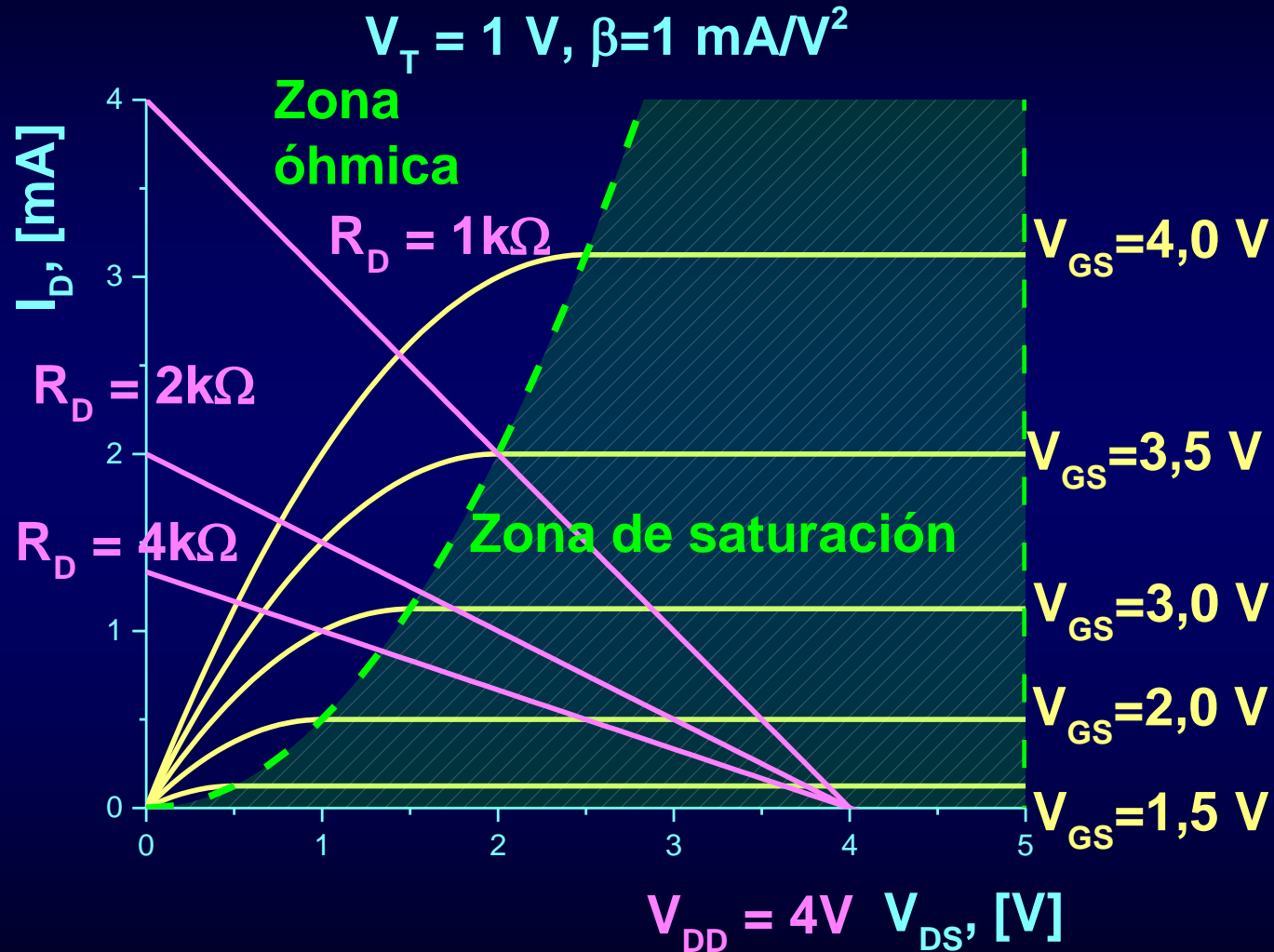
Curva característica I_D V_{DS}



Curva característica I_D V_{DS}



Curva característica I_D V_{DS}



Exam 26 de nov de 2015, T4

3.8 Retraso y potencia en circuitos digitales.

La “velocidad de cambio” describe cuantas veces por segundo un inversor NOT puede cambiar el estado de TRUE a FALSE.

En circuitos digitales hay disipación de energía debido a cambios del voltaje desde bajo ($V_{\text{LOW}} = 0 \text{ V}$) a voltaje alto (típicamente, $V_{\text{HIGH}} = 5 \text{ V}$) y, también, a carga o descarga una capacidades parásitas.

Potencia dinámica

Examinamos un interruptor, el cual carga y descarga una capacidad representativa C ($\sim 1\mu\text{F}$) con tensión de alimentación V_{DD} .

La potencia dinámica de carga,

$$P_{dinamica} = f_c C V_{DD}^2,$$

donde f_c es la frecuencia de reloj (clock).

Si la probabilidad de conmutación es p , también denominada relación de actividad, la potencia disipada es

$$P = p f_c C V_{DD}^2.$$

Potencia estática

Examinamos un interruptor, el cual carga y descarga una capacidad representativa C ($\sim 1\mu\text{F}$) con tensión de alimentación V_{DD} y corriente I .

La corriente de fuga introduce una contribución estática en la potencia disipada

$$P_{estatica} = I \cdot V_{DD},$$

La potencia total disipada es

$$P = P_{dinamica} + P_{estatica} = p f_c C V_{DD}^2 + I \cdot V_{DD}.$$

Una otra medida de consumo es la energía de conmutación

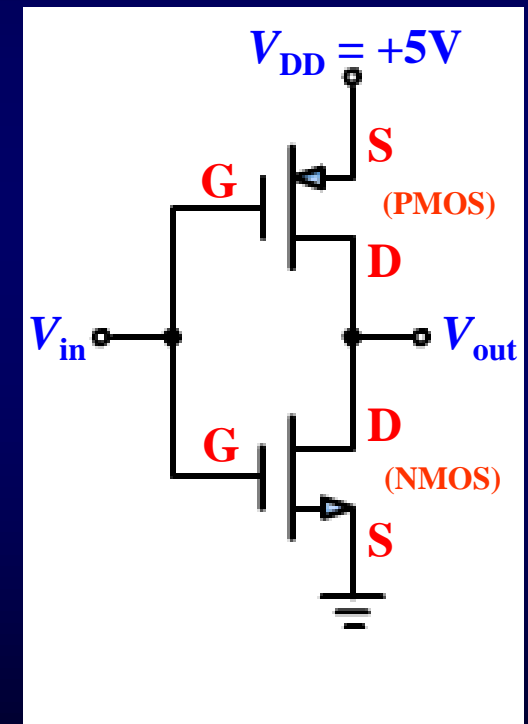
$$E = C V_{DD}^2 + I \cdot V_{DD} / (p f_c).$$

Problemas 31,32

3.7 Inversor CMOS

CMOS es un dispositivo formado por un NMOS y un PMOS realizados sobre la misma oblea (*complementary MOS*).

- es posible diseñar un circuito inversor cuya disipación de potencia en corriente continua sea prácticamente nula.
- solo consume potencia en los transitorios que representan cambios de estado a la salida
- Ej.: las memorias RAM



Inversor CMOS: tabla de verdad

CMOS es un dispositivo formado por un NMOS y un PMOS realizados sobre la misma oblea (*complementary MOS*).

A (in)	NMOS (pull down)	PMOS (pull up)	Y (out)
0	OFF	ON	0
1	ON	OFF	1

- Puerta NOT (inversor)

- $Y = \bar{A}$

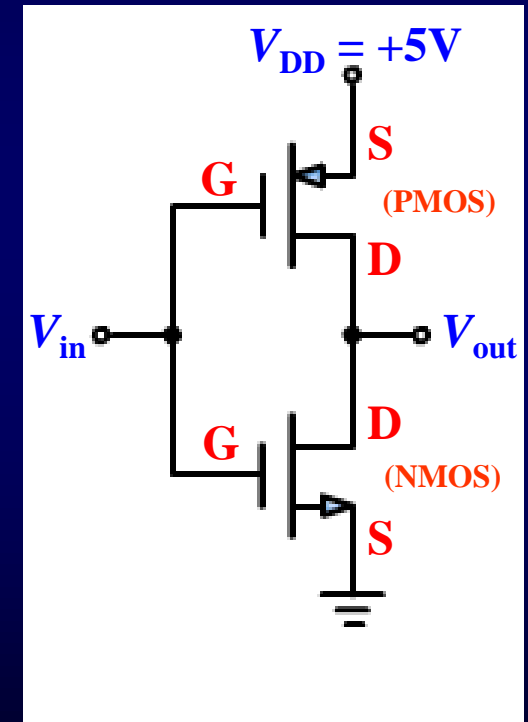
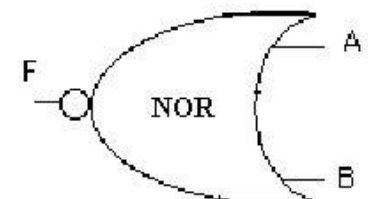
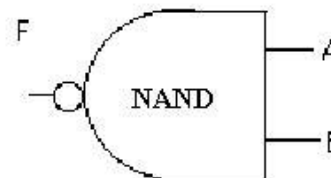
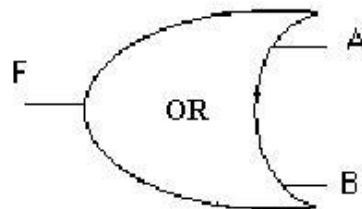
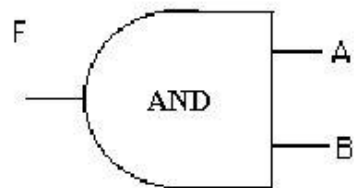


Tabla de verdad

ENTRADAS

A	B	AND	NAND	OR	NOR	XOR
0	0	0	1	0	1	0
0	1	0	1	1	0	1
1	0	0	1	1	0	1
1	1	1	0	1	0	0
funciones		$A \cdot B$	$\overline{A \cdot B}$	$A + B$	$\overline{A + B}$	$A \oplus B$

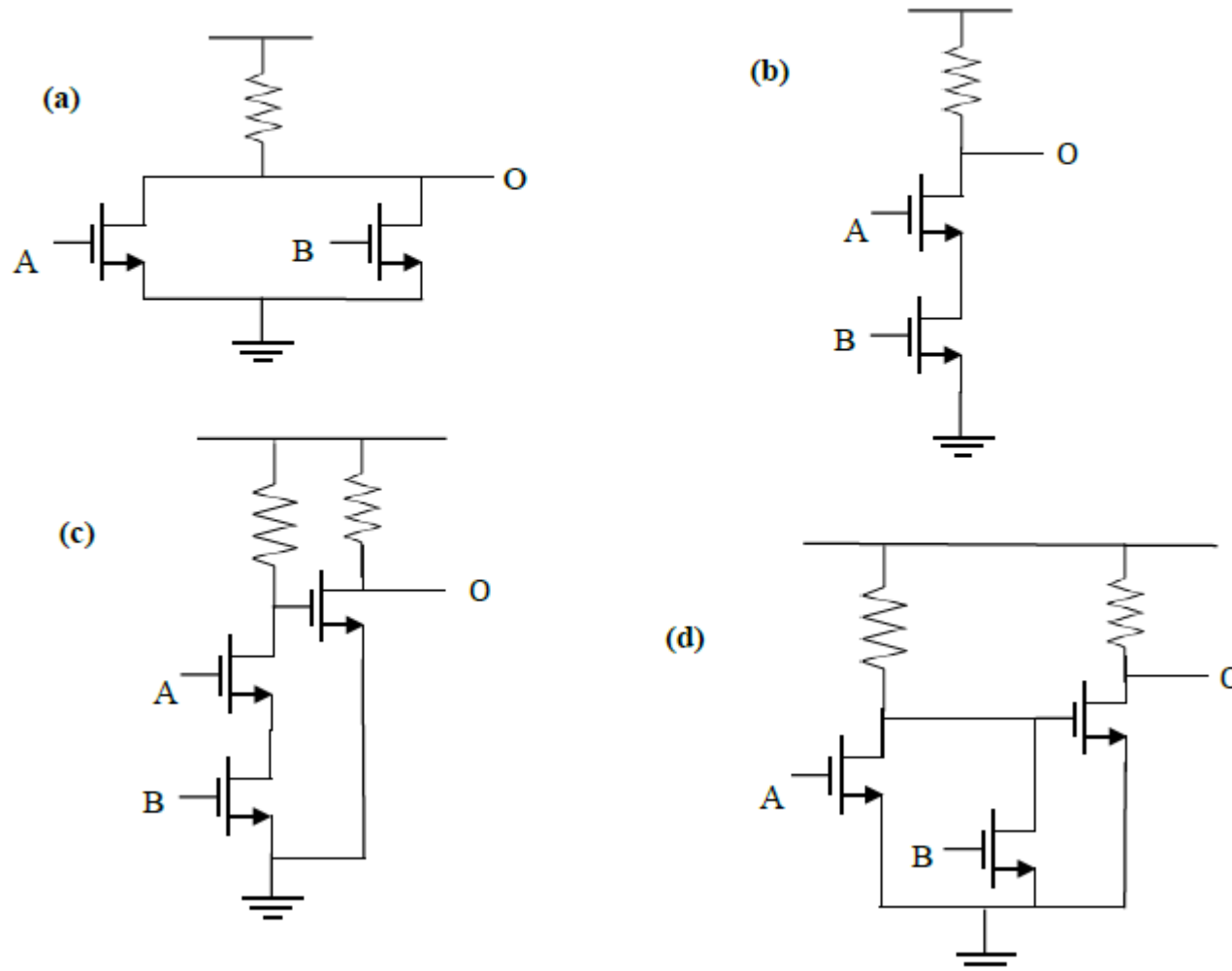


Puertas lógicas

- Una puerta lógica es un dispositivo electrónico con una función booleana.
- Se pueden aplicar a tecnología electrónica, eléctrica, mecánica, hidráulica y neumática
- Álgebra de Boole es una estructura algebraica que esquematiza las operaciones lógicas Y, O, NO y SI (AND, OR, NOT, IF), así como el conjunto de operaciones unión, intersección y complemento.

Puertas lógicas

34. Determineu quines són les següents portes fetes amb NMOS. Construïu per cada cas una taula amb les entrades (V_A , V_B), l'estat de cada transistor (ON/OFF), les intensitats de drenador (0, $\neq 0$), i la sortida (V_O).



LEYES DE DE MORGAN

La negación de la conjunción es la disyunción de las negaciones.

La negación de la disyunción es la conjunción de las negaciones.

$ABC = (AB)C = A(BC)$, $A+B+C = (A+B)+C = A+(B+C)$: AND, OR are **associative**.

$AB = BA$, $A+B = B+A$: AND and OR operations are **commutative**.

$A + BC = (A+B)(A+C)$, $A(B+C) = AB + AC$: forms of the **distributive property**.

$\overline{A + B} = \overline{A} \overline{B}$: a form of **DeMorgan's Theorem**.

$\overline{AB} = \overline{A} + \overline{B}$: a form of **DeMorgan's Theorem**.

$AA = A$, $A+A = A$, $A + \overline{A} = 1$, $A\overline{A} = 0$, $A = \overline{\overline{A}}$: **Single Variable Theorems**.

$A + AB = A$, $A + \overline{A}B = A+B$: More **two-variable** theorems.

$A1 = A$, $A + 1 = 1$, $A + 0 = A$, $A0=0$, $\overline{1}=0$, $\overline{0}=1$: **Identity and Null** operations.

PULL-UP, PULL-DOWN

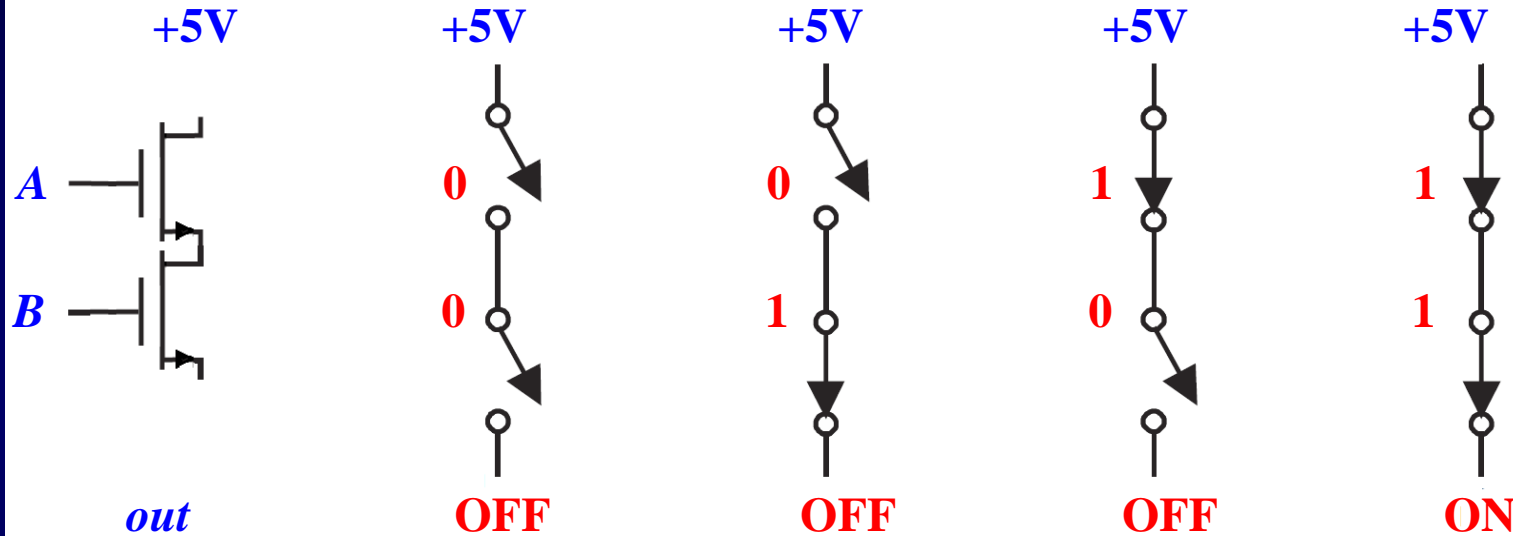
Pull-up - un circuito que proporciona un camino de baja resistencia a voltaje HIGH cuando la salida es "1" lógico y proporciona una alta resistencia de otra manera.

Pull-down – un circuito que proporciona un camino de baja resistencia a GND cuando la salida es "0" lógico y proporciona una alta resistencia a GND lo contrario.

Los transistores PMOS y NMOS están trabajando, creando un camino entre drenaje y la fuente, cuando el voltaje de la puerta está satisfecho:

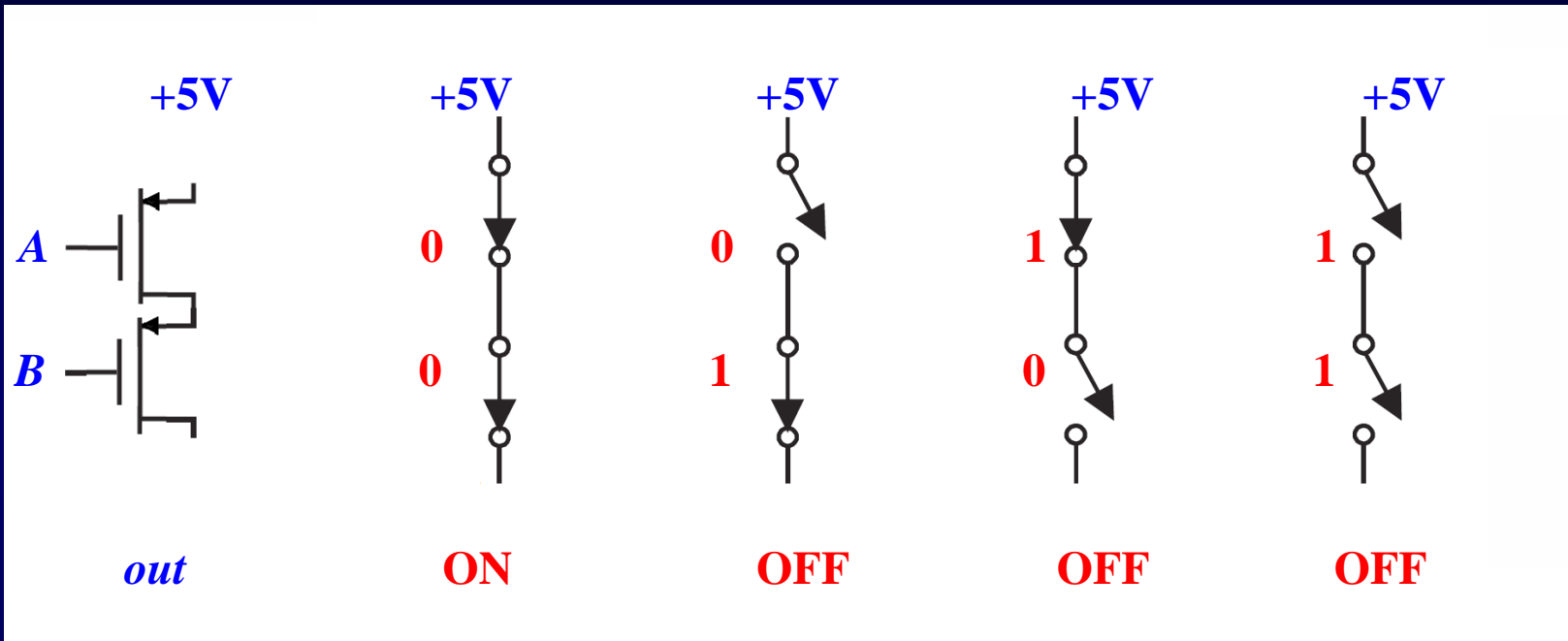
- para NMOS voltaje en puerta G es alto
- para PMOS voltaje en puerta G es bajo

NMOS en serie



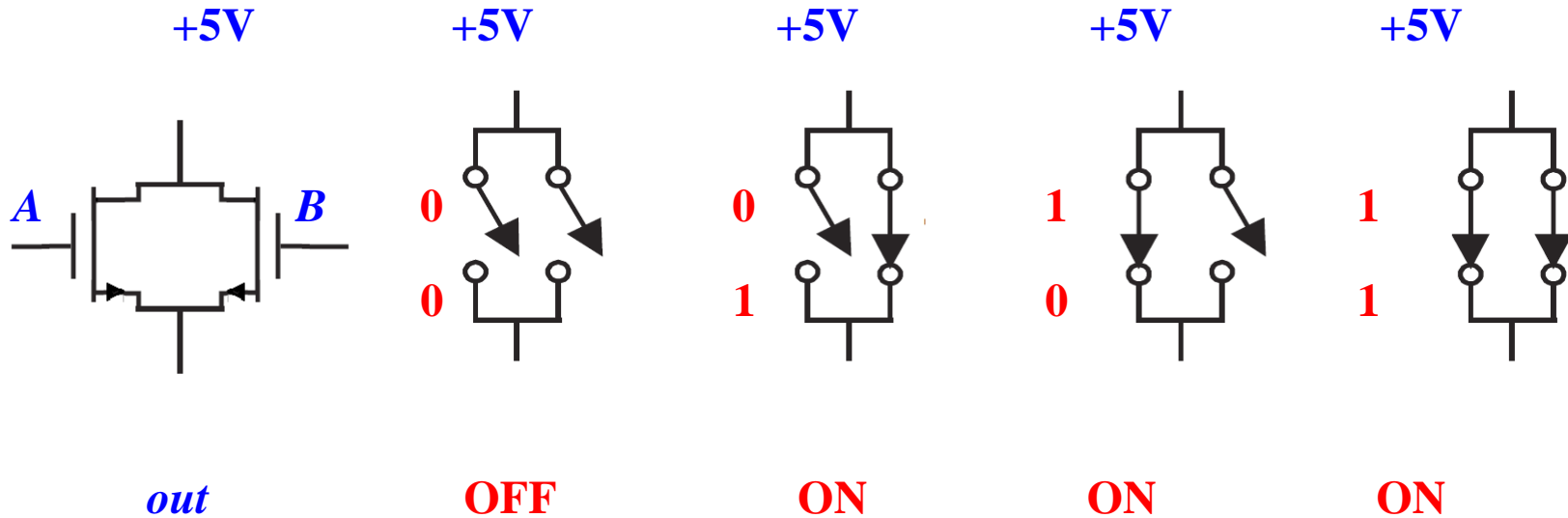
- funcionamiento AND
- $Y = A \cdot B$
- Se puede hacer con 3 y más entradas

PMOS en serie



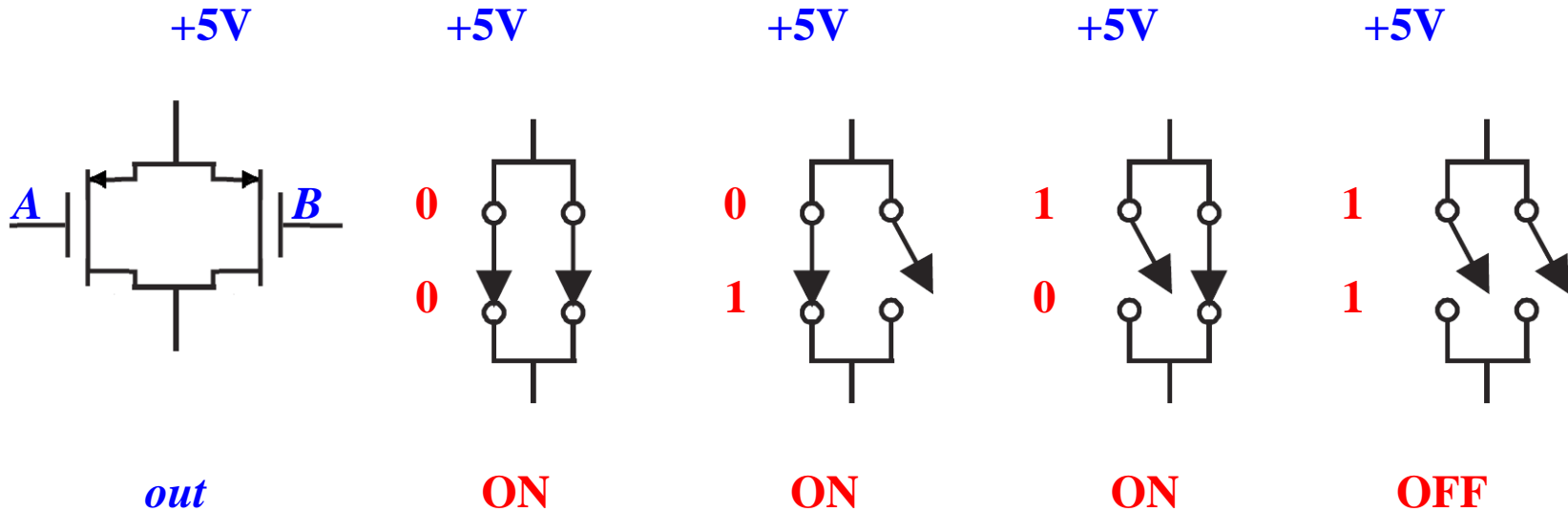
- funcionamiento NOR
- $Y = \overline{A + B}$
- Se puede hacer con 3 y más entradas

NMOS en paralelo



- funcionamiento OR
- $Y = A + B$
- Se puede hacer con 3 y más entradas

PMOS en paralelo

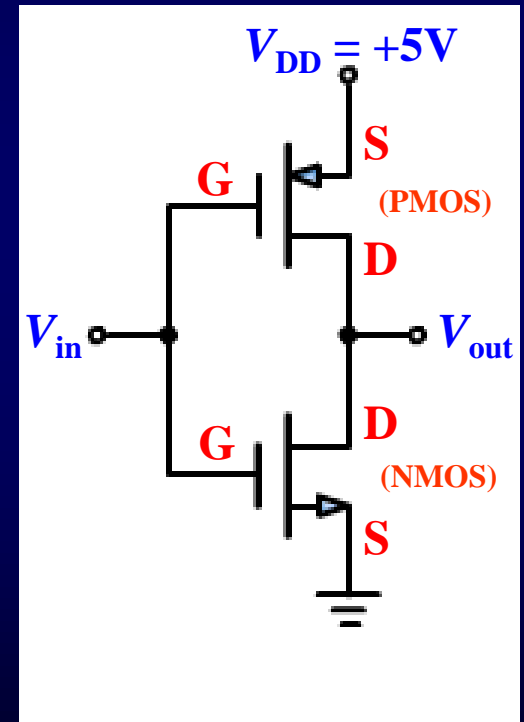


- funcionamiento NAND
- $Y = \overline{A \cdot B}$

3.9 Lógica CMOS

CMOS es un dispositivo formado por un NMOS y un PMOS realizados sobre la misma oblea (*complementary MOS*).

- es posible diseñar un circuito inversor cuya disipación de potencia en corriente continua sea prácticamente nula.
- solo consume potencia en los transitorios que representan cambios de estado a la salida
- Ej.: las memorias RAM



Lógica CMOS

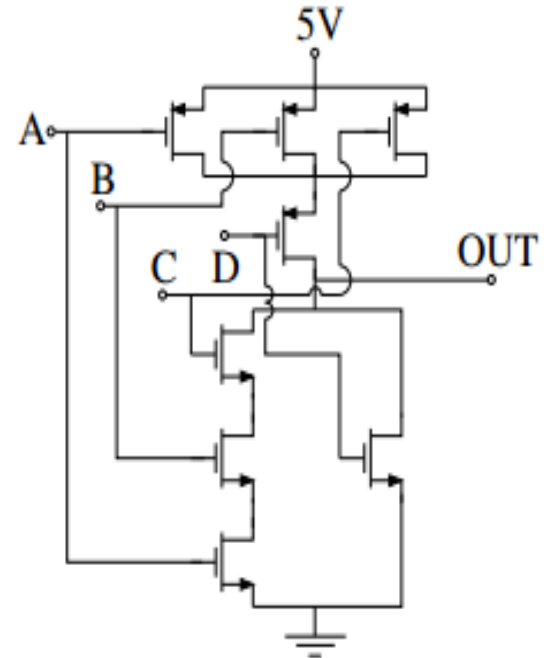
Indiqueu quina de les portes lògiques següents implementa el circuit de la figura adjunta

a) $\overline{A + B + C + D}$.

b) $\overline{(A + B + C) \cdot D}$.

c) $A \cdot B \cdot C + D$.

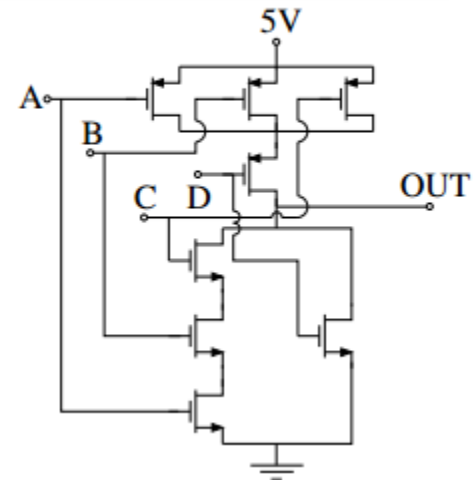
d) $\overline{A \cdot B \cdot C} + D$.



Lógica CMOS

Indiqueu quina de les portes lògiques següents implementa el circuit de la figura adjunta

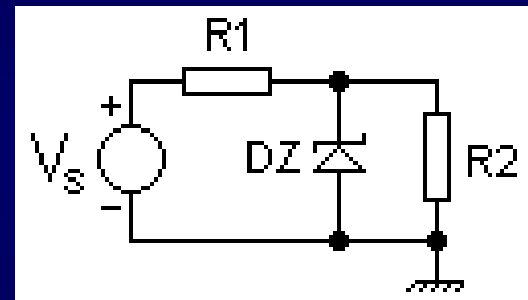
- a) $\overline{A + B + C + D}$. b) $\overline{(A + B + C) \cdot D}$.
c) $A \cdot B \cdot C + D$. d) $\overline{A \cdot B \cdot C + D}$.



Es tracta d'un disseny CMOS, on la part PULL-UP i la part PULL-DOWN realitzen la mateixa funció lògica amb diferents implementacions. Per esbrinar de quina funció lògica es tracta, ens podem fixar per exemple en la part PULL-UP, formada pels transistors PMOS que hi ha des de la tensió de referència de 5V fins a la línia de sortida OUT. La part superior del PULL-UP, formada pels transistors A, B i C implementa la funció lògica $\bar{A} + \bar{B} + \bar{C}$, mentre que la actuació amb el transistor D fa que el resultat sigui la AND de la funció anterior amb \bar{D} . Així s'obté $(\bar{A} + \bar{B} + \bar{C}) \cdot \bar{D}$. Aplicant les lleis de Morgan aquest resultat és equivalent a $\overline{A \cdot B \cdot C + D}$.

Título

- $h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$



Material adicional

LED <http://jmas.webs.upv.es/ffi/Lec6/aptdo43.htm>

LED

http://wikis.lib.ncsu.edu/index.php/Diode's_and_LED's

Vgamma

http://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting_diode

Tipos de diodos

<http://www.engineersgarage.com/tutorials/diodes?page=3>

<http://www.tpub.com/neets/book7/26.htm> Diode Zener

Diodo animación

<http://phet.colorado.edu/en/simulation/semiconductor>

Transistores

<http://html.rincondelvago.com/transistor.html>

Material adicional 2

Inversor CMOS

<http://dc253.4shared.com/doc/euh0oAXA/preview.html>

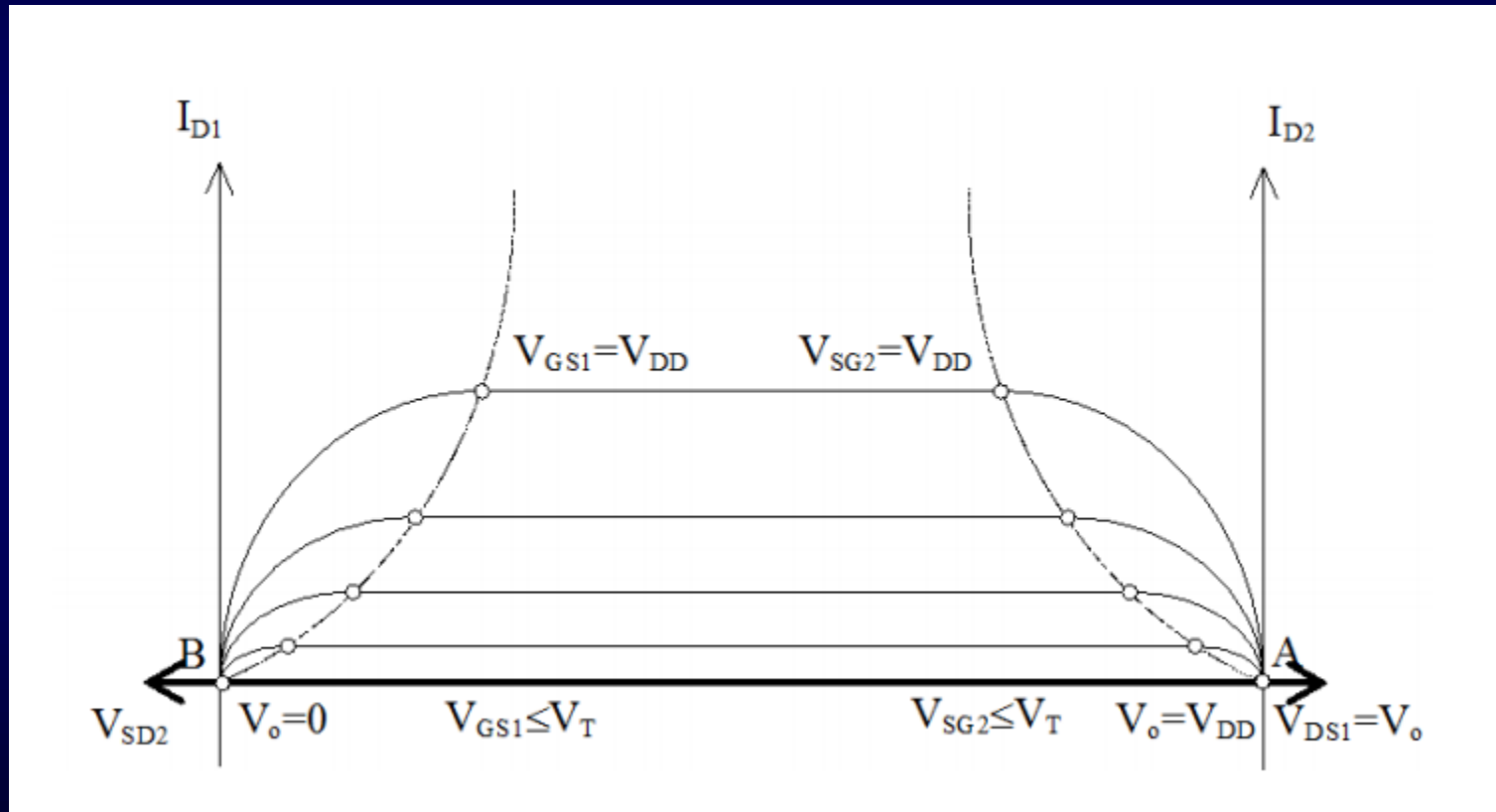
http://quegrande.org/apuntes/grado/1G/TEG/teoria/10-11/tema_9_-_familias_logicas_cmos.pdf

<http://ocw.uab.cat/enginyeries/disseny-de-circuits-integrats-i/CAPITULO-1.pdf>

Retraso y potencia

<http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/schrom/diss.html>

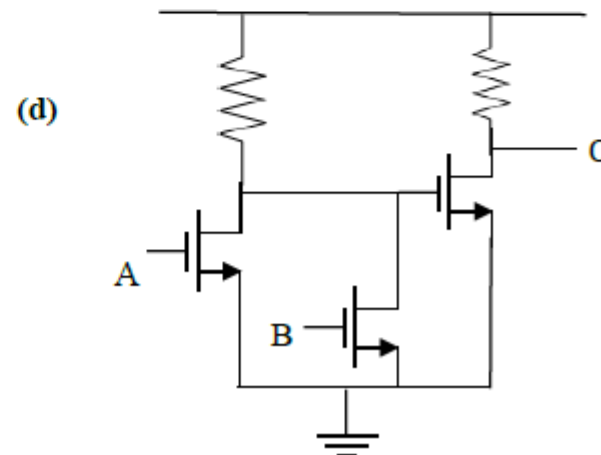
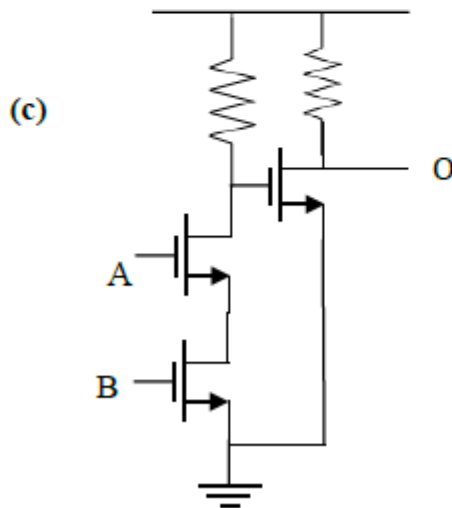
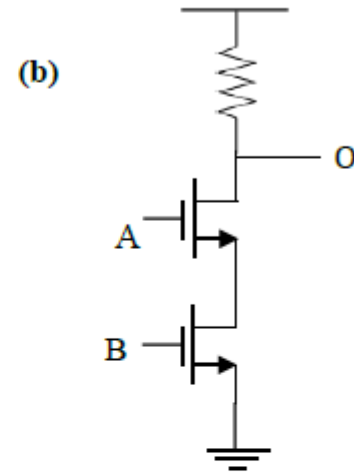
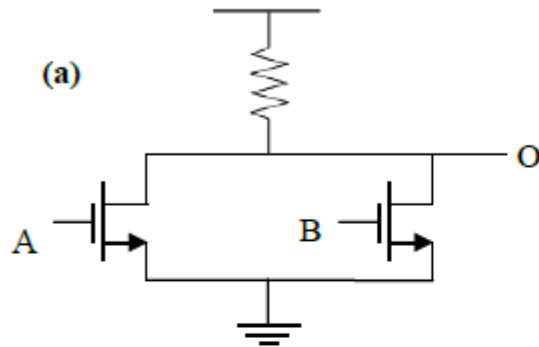
Inversor CMOS



Funcionamiento básico del inversor CMOS

Puertas lógicas con transistores

34. Determineu quines són les següents portes fetes amb NMOS. Construïu per cada cas una taula amb les entrades (V_A , V_B), l'estat de cada transistor (ON/OFF), les intensitats de drenador (0, $\neq 0$), i la sortida (V_O).



Material adicional

LED <http://jmas.webs.upv.es/ffi/Lec6/aptdo43.htm>

LED

http://wikis.lib.ncsu.edu/index.php/Diode's_and_LED's

Vgamma

http://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting_diode

Tipos de diodos

<http://www.engineersgarage.com/tutorials/diodes?page=3>

<http://www.tpub.com/neets/book7/26.htm> Diode Zener

Diodo animación

<http://phet.colorado.edu/en/simulation/semiconductor>

Transistores

<http://html.rincondelvago.com/transistor.html>