



Universidad
de Oviedo

El DIODO





Semiconductores elementales:

Germanio (Ge) y Silicio (Si)

Son materiales de conductividad intermedia entre la de los metales y la de los aislantes, que se modifica en gran medida por la temperatura, la excitación óptica y las impurezas.



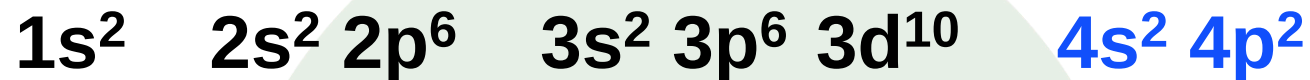
- Estructura atómica del Carbono (6 electrones)



- Estructura atómica del Silicio (14 electrones)



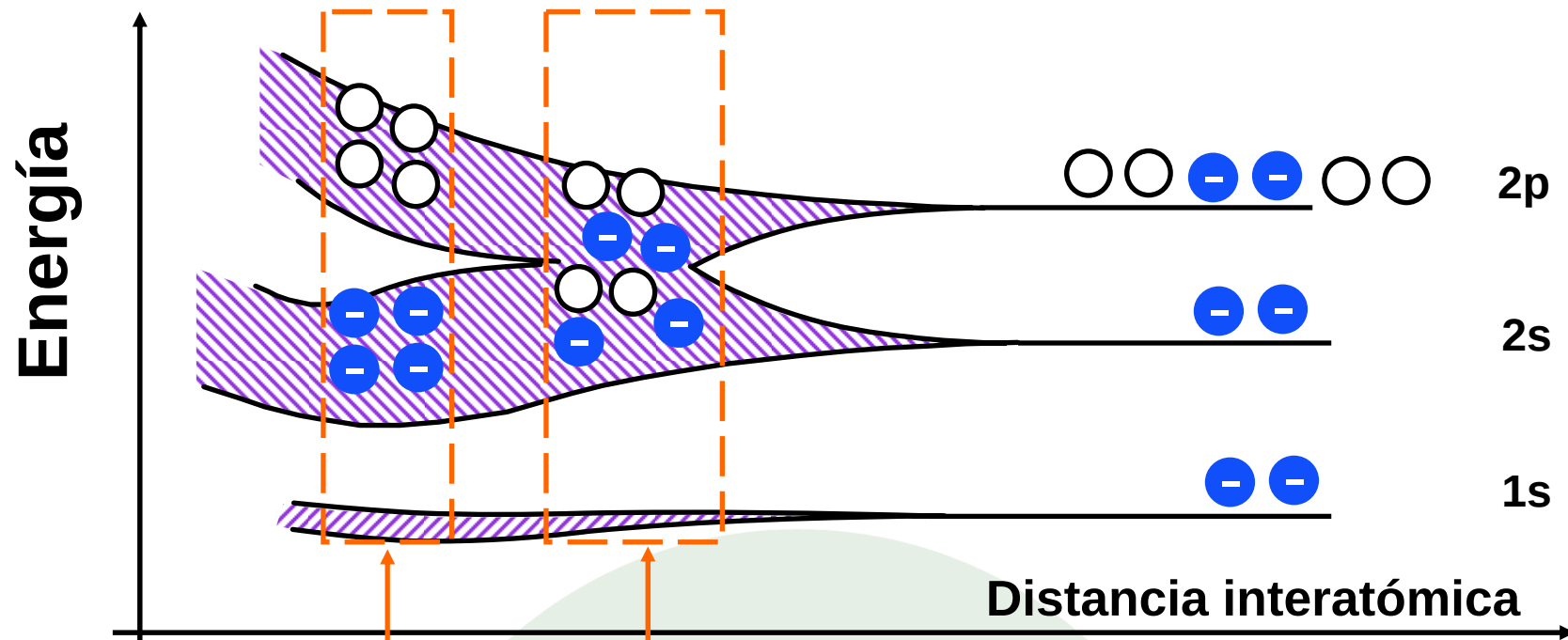
- Estructura atómica del Germanio (32 electrones)



4 electrones en la última capa



Reducción de la distancia interatómica del Carbono



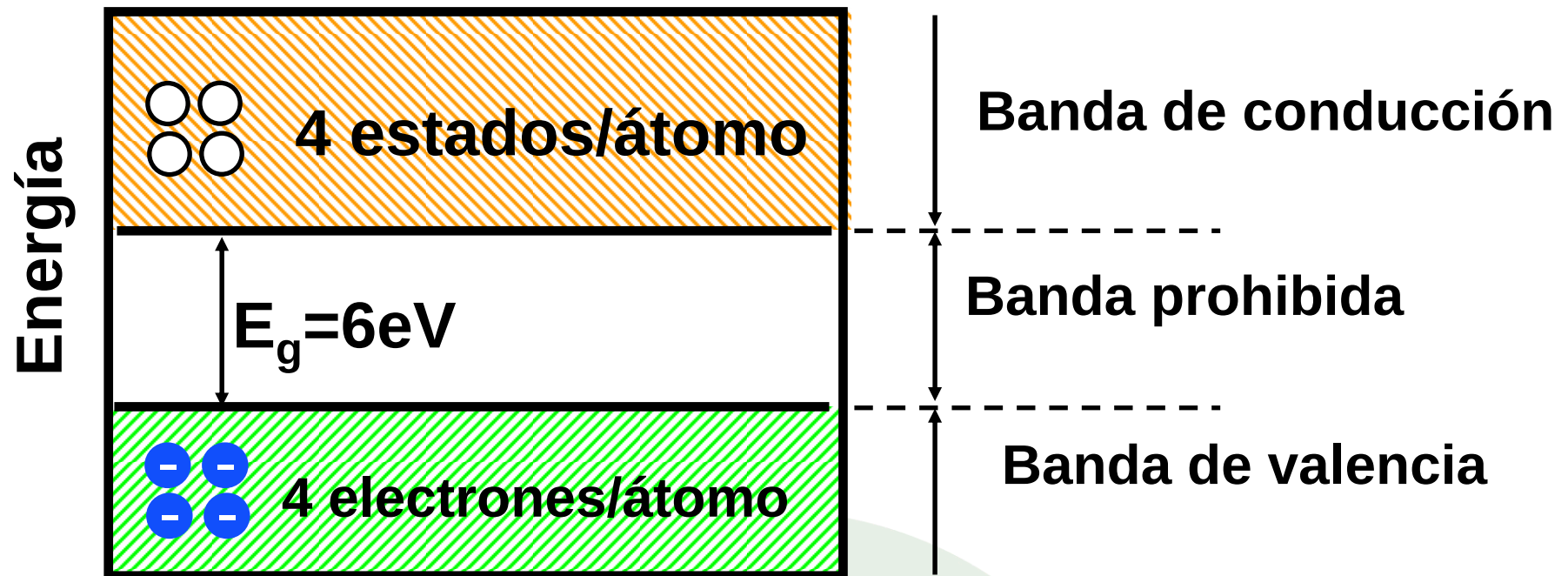
Diamante:
Cúbico, transparente,
duro y aislante

Grafito:
Hexagonal, negro,
blando y conductor



Diagramas de bandas

Diagrama de bandas del Carbono: diamante

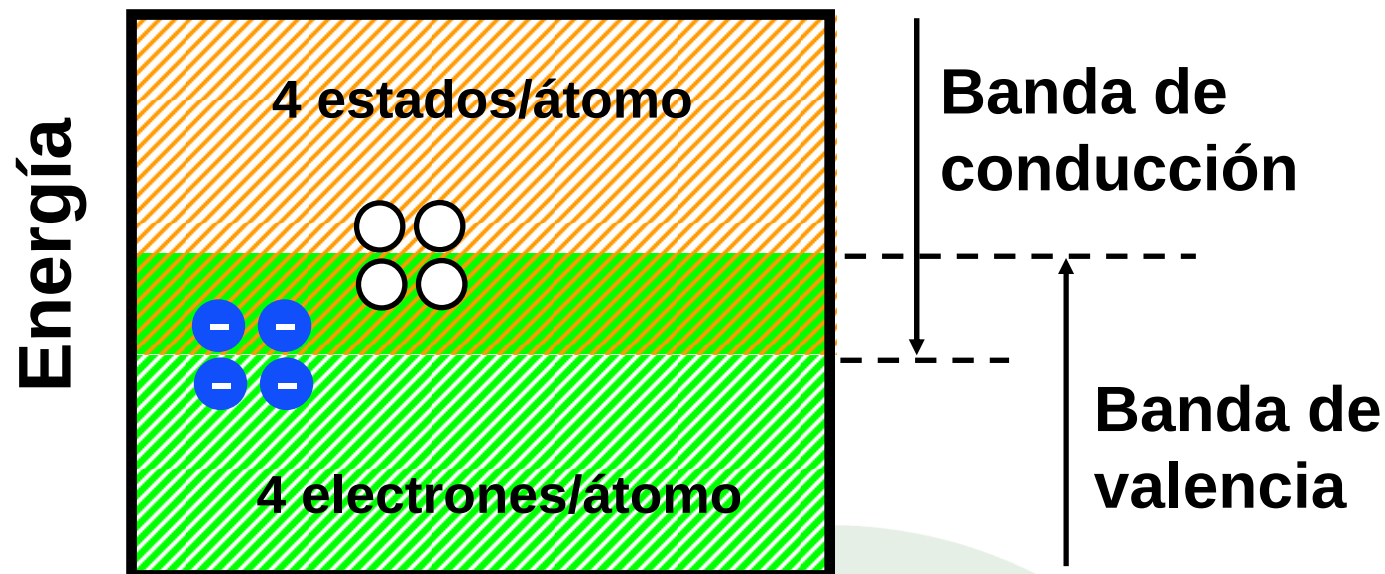


A temperatura ambiente casi ningún electrón tiene esta energía para saltar a la banda de conducción y moverse por ella.

Es un aislante.



Diagrama de bandas del Carbono: grafito

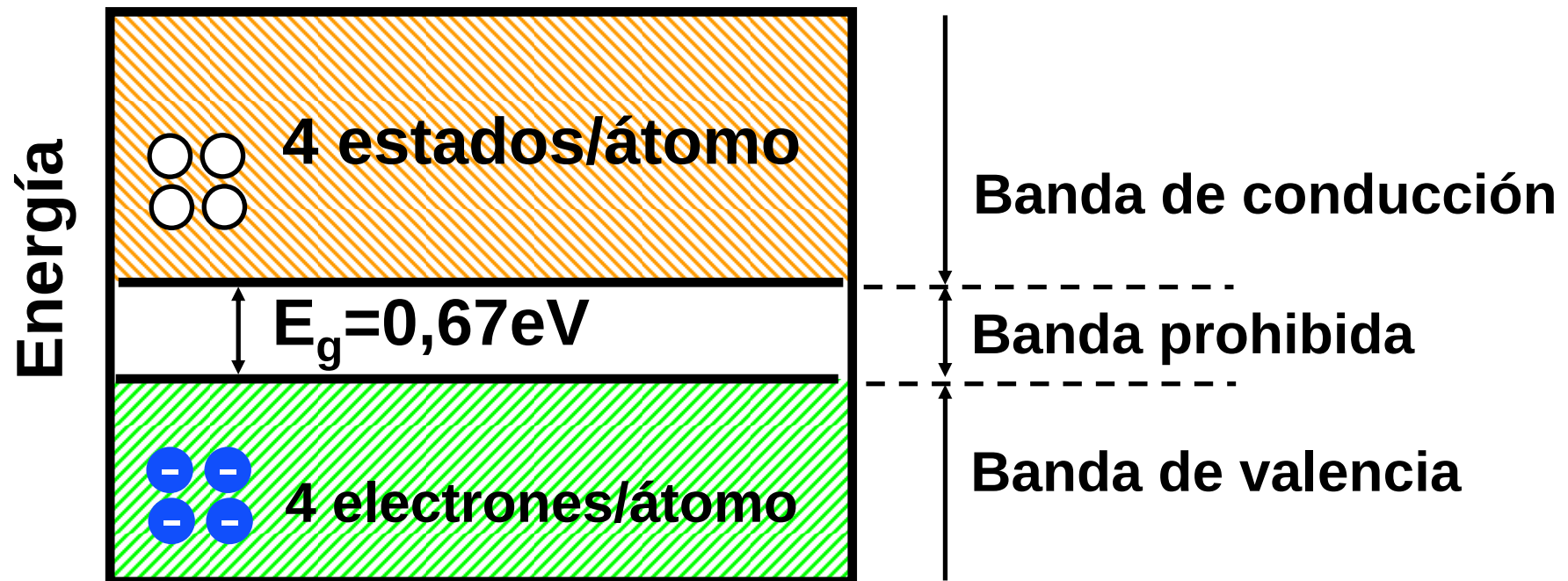


No hay banda prohibida. Los electrones de la banda de valencia tienen la misma energía que los estados vacíos de la banda de conducción, por lo que pueden moverse generando corriente eléctrica. A temperatura ambiente es un buen conductor.



Diagramas de bandas

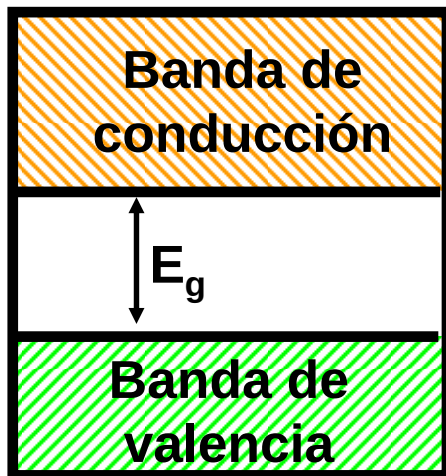
Diagrama de bandas del Ge



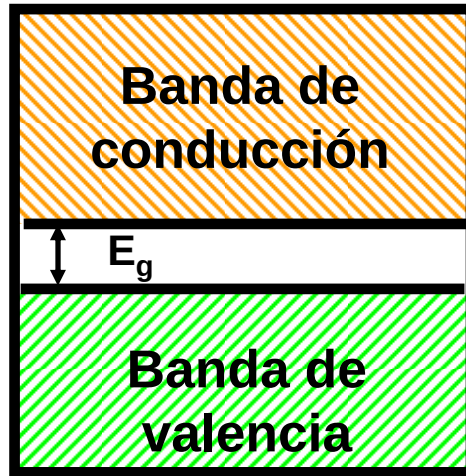
A temperatura ambiente algunos electrones tienen energía suficiente para saltar a la banda de conducción y moverse por ella generando corriente eléctrica. Es un semiconductor.



Diagramas de bandas



Aislante
 $E_g = 5-10\text{eV}$



Semiconductor
 $E_g = 0,5-2\text{eV}$



Conductor
No hay E_g

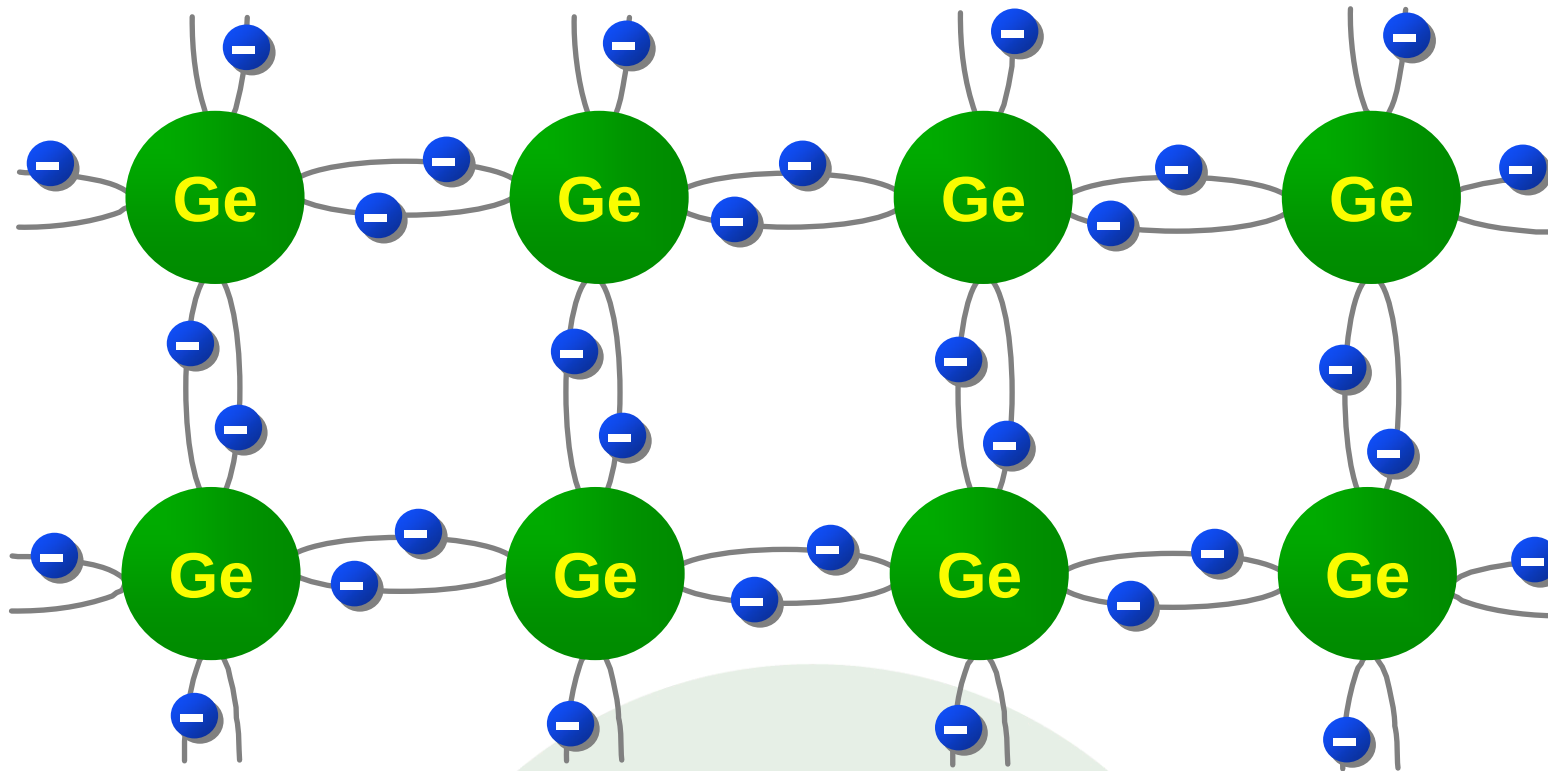
A 0°K , tanto los aislantes como los semiconductores no conducen, ya que ningún electrón tiene energía suficiente para pasar de la banda de valencia a la de conducción. A 300°K , algunos electrones de los semiconductores alcanzan este nivel. Al aumentar la temperatura aumenta la conducción en los semiconductores (al contrario que en los metales).



Universidad
de Oviedo

SEMICONDUCTORE INTRÍNSECO

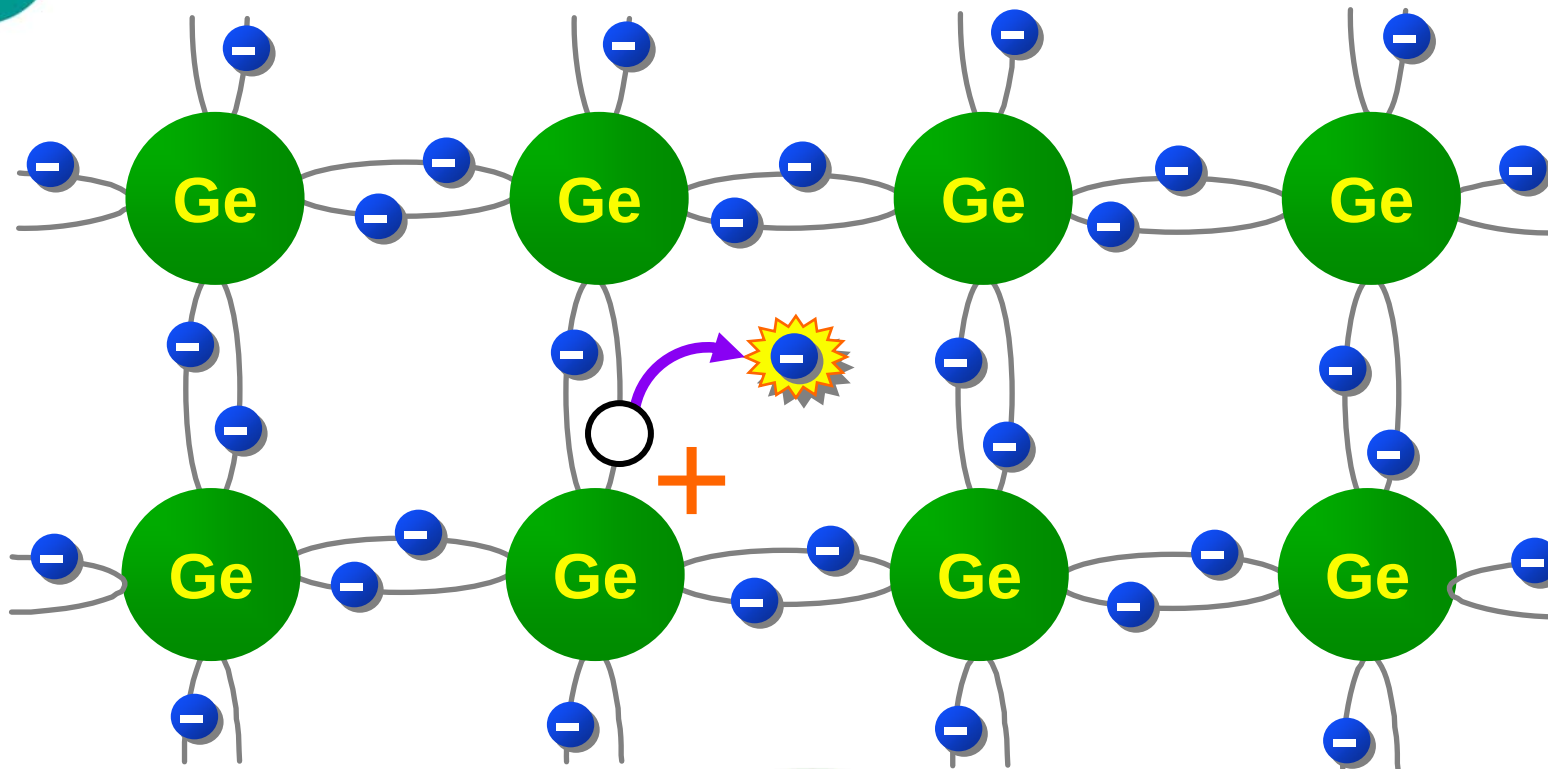
Representación plana del Germanio a 0° K



No hay enlaces covalentes rotos. Esto equivale a que los electrones de la banda de valencia no pueden saltar a la banda de conducción.



Situación del Ge a 300°K

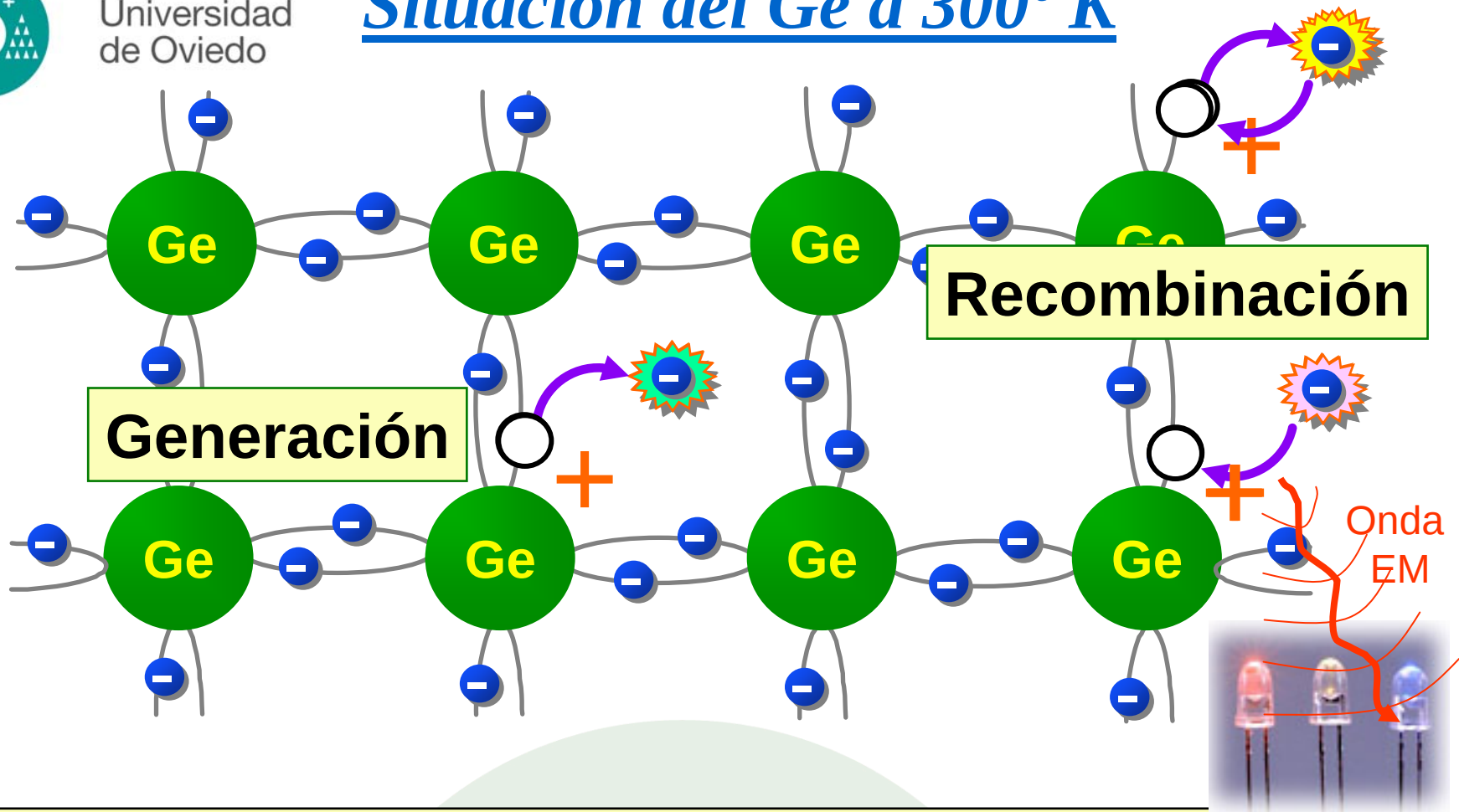


- Hay **1** enlace roto por cada **$1,7 \cdot 10^9$ átomos**.
- Un electrón “libre” y una carga “+” por cada enlace roto.



Universidad
de Oviedo

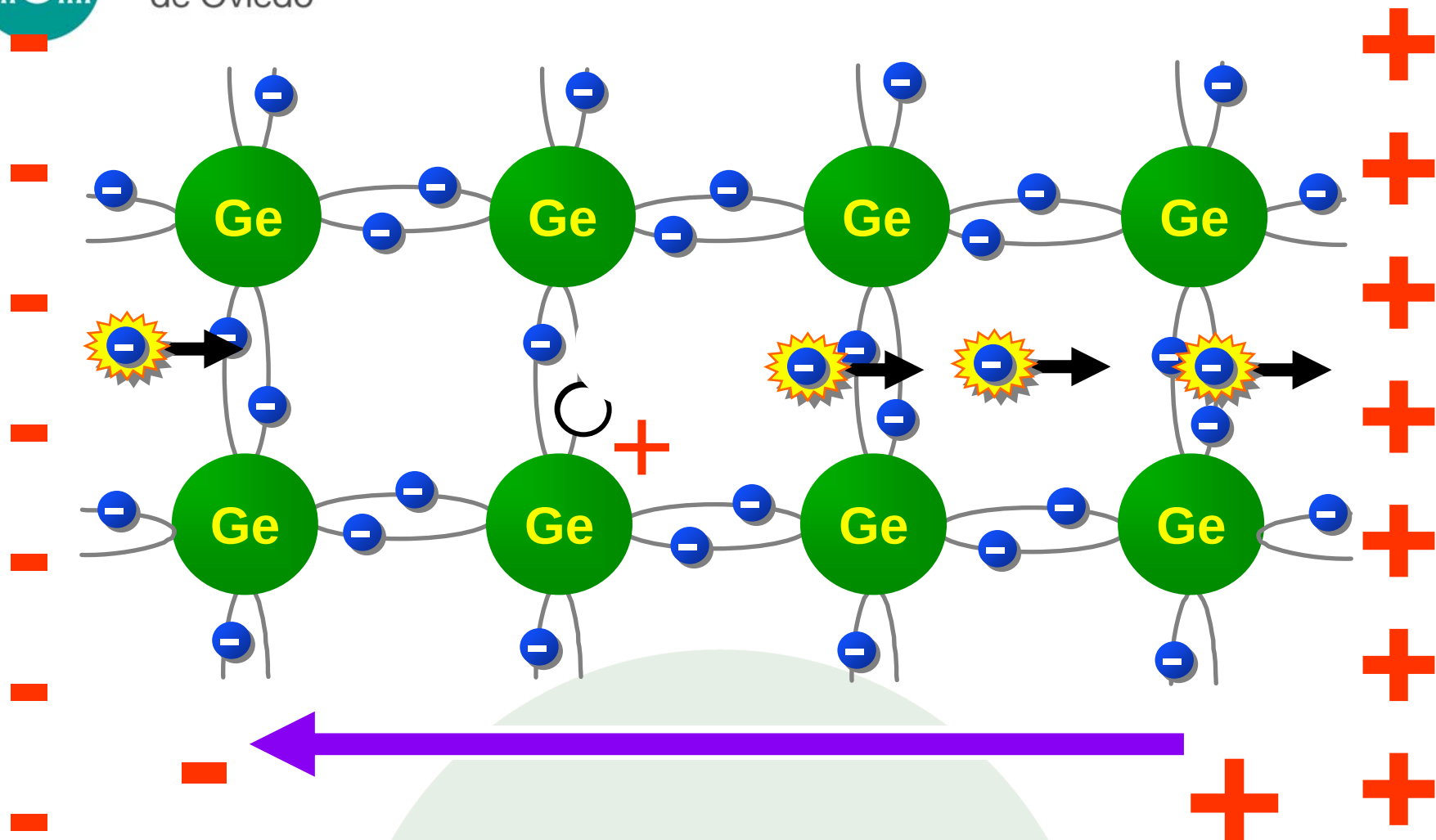
Situación del Ge a 300° K



Siempre se están rompiendo (*generación*) y reconstruyendo (*recombinación*) enlaces. La vida media de un electrón puede ser del orden 100us



Aplicación de un campo externo



- El electrón libre se mueve por acción del campo.

- ¿Y la carga "+" ?.



SEMICONDUCTORE INTRÍNSECO

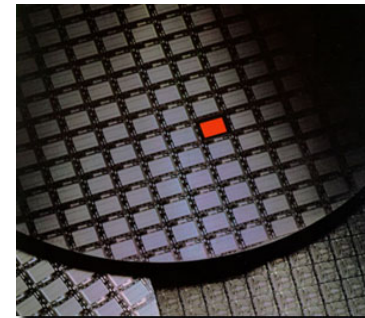
Todo lo comentado hasta ahora se refiere a los llamados **“Semiconductores Intrínsecos”**, en los que:

- No hay ninguna impureza en la red cristalina.
- Hay igual número de electrones que de huecos $n = p = n_i$

Ge: $n_i = 2 \cdot 10^{13}$ portadores/cm³

Si: $n_i = 10^{10}$ portadores/cm³

AsGa: $n_i = 2 \cdot 10^6$ portadores/cm³
(a temperatura ambiente)



¿Pueden modificarse estos valores?

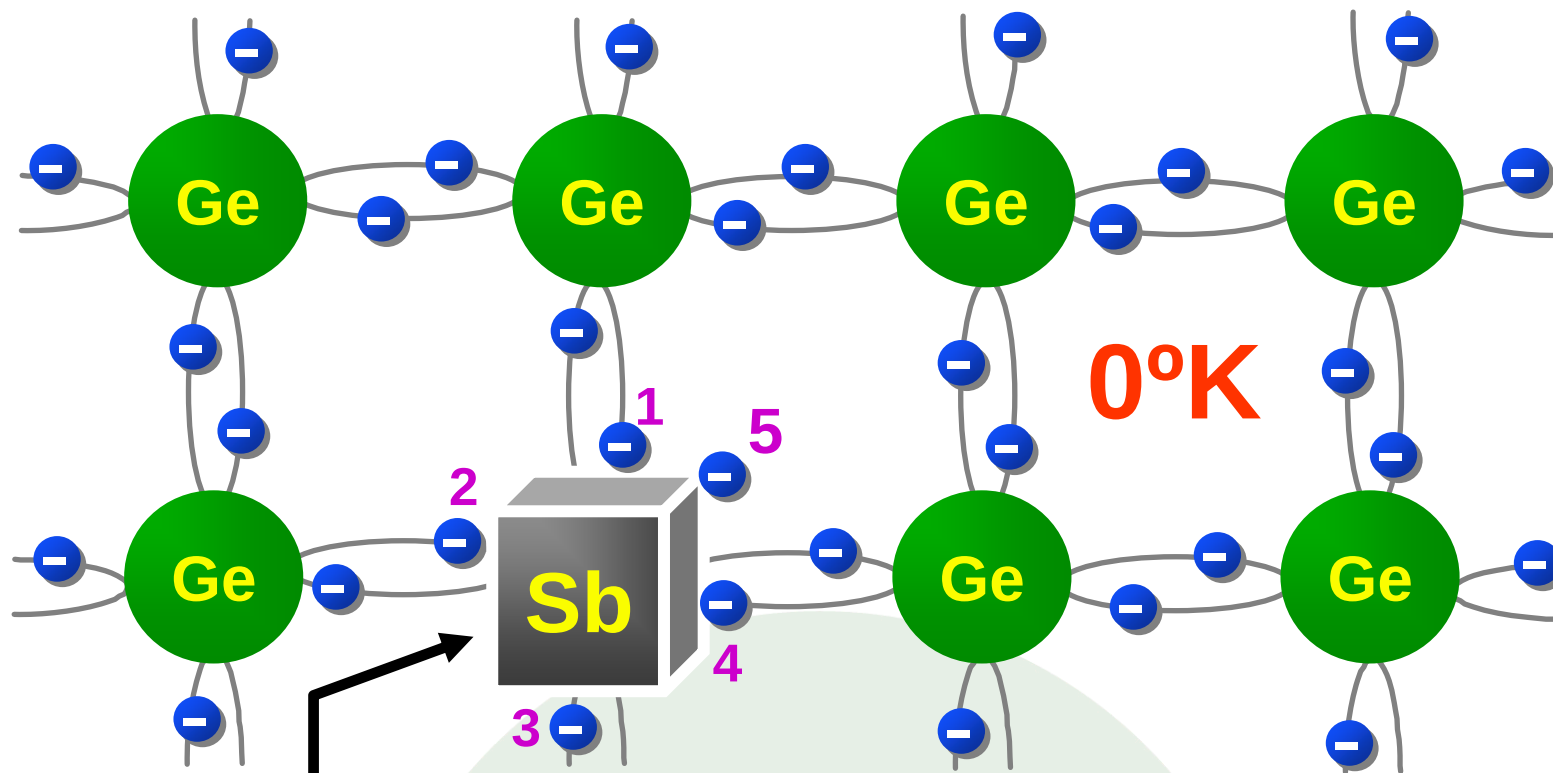
¿Puede desequilibrarse el número de electrones y de huecos?

La respuesta son los **Semiconductores Extrínsecos**



Semiconductores Extrínsecos

Introducimos pequeñas cantidades de impurezas del **grupo V**

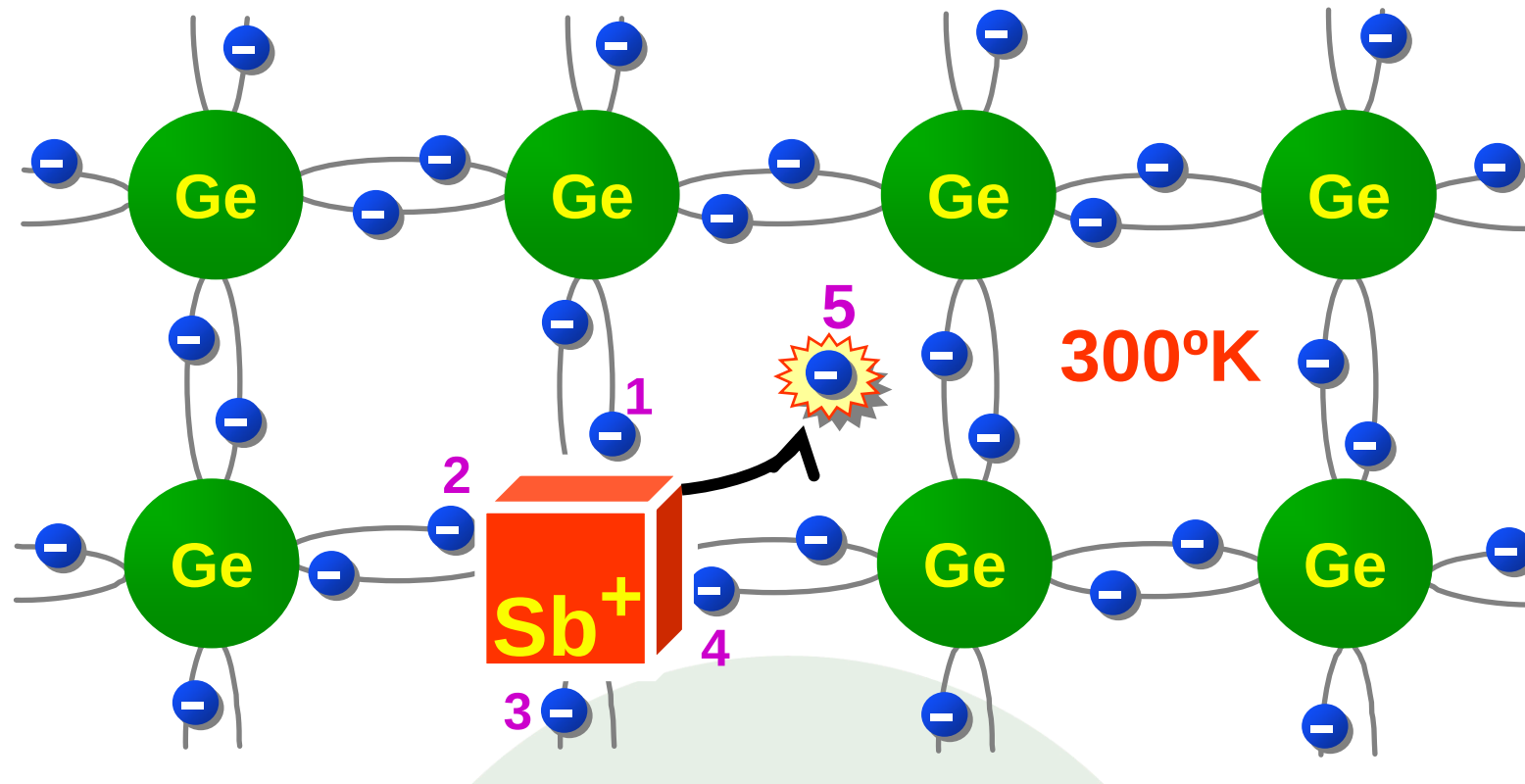


Tiene 5 electrones en la
última capa

A 0°K , habría un electrón
adicional ligado al átomo de Sb



Semiconductores Extrínsecos

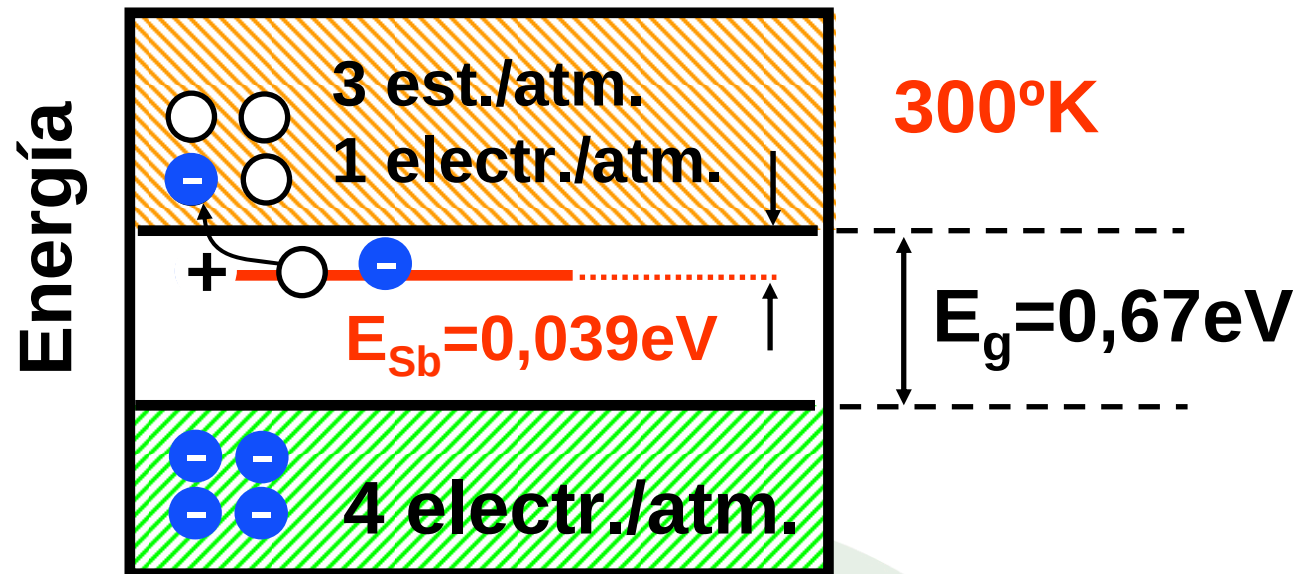


A 300°K, todos electrones adicionales de los átomos de Sb están desligados de su átomo (pueden desplazarse y originar corriente eléctrica). El Sb es un donador y en el Ge hay más electrones que huecos. Es un semiconductor tipo N.



Semiconductores Extrínsecos

Interpretación en diagrama de bandas de un
semiconductor extrínseco **Tipo N**

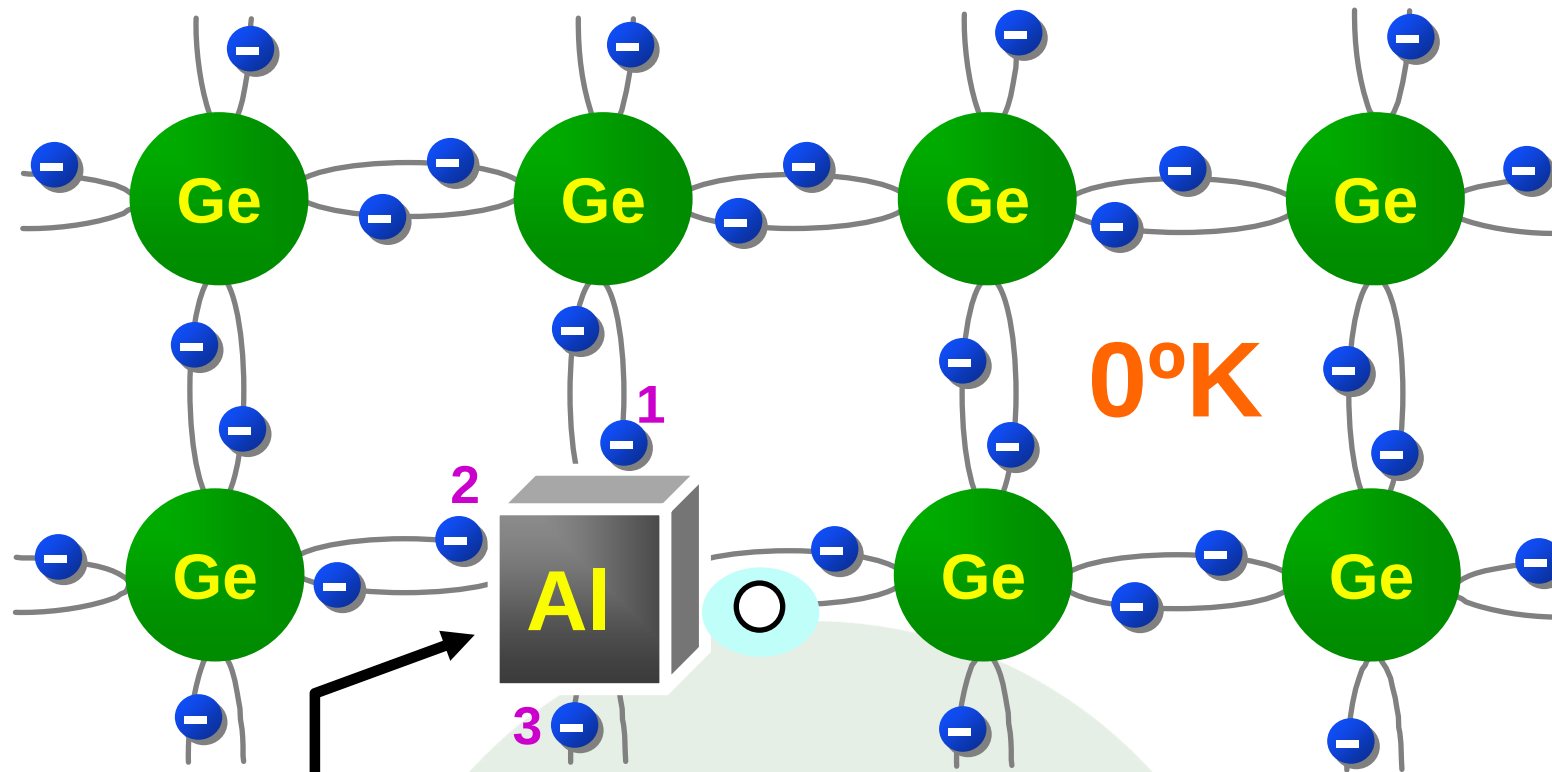


El Sb genera un estado permitido en la banda prohibida, muy cerca de la banda de conducción. La energía necesaria para alcanzar la banda de conducción se consigue a la temperatura ambiente.



Semiconductores Extrínsecos

Introducimos pequeñas cantidades de impurezas del **grupo III**

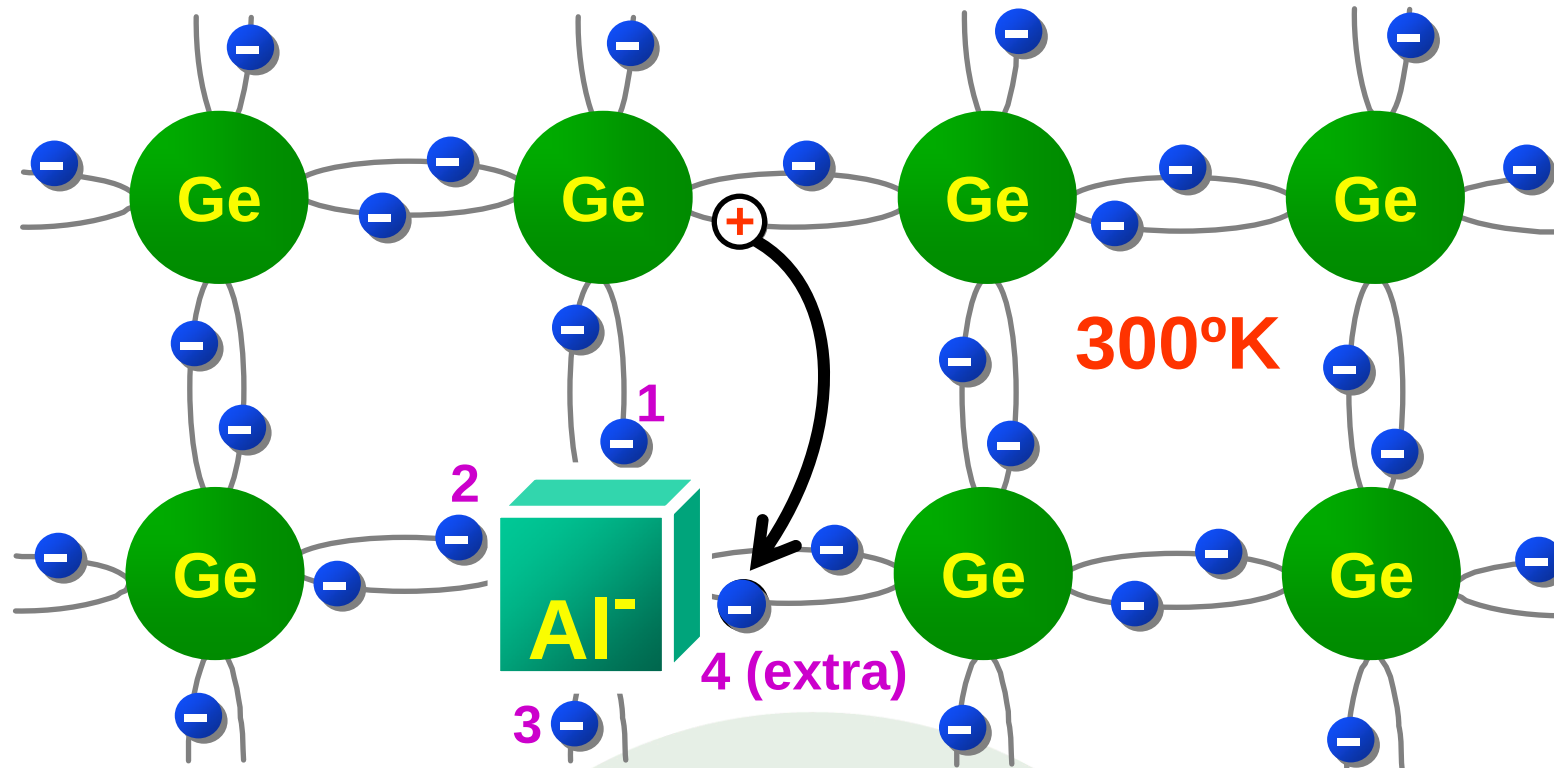


Tiene 3 electrones en la
última capa

A 0°K , habría una “falta de
electrón” -> **HUECO**



Semiconductores Extrínsecos

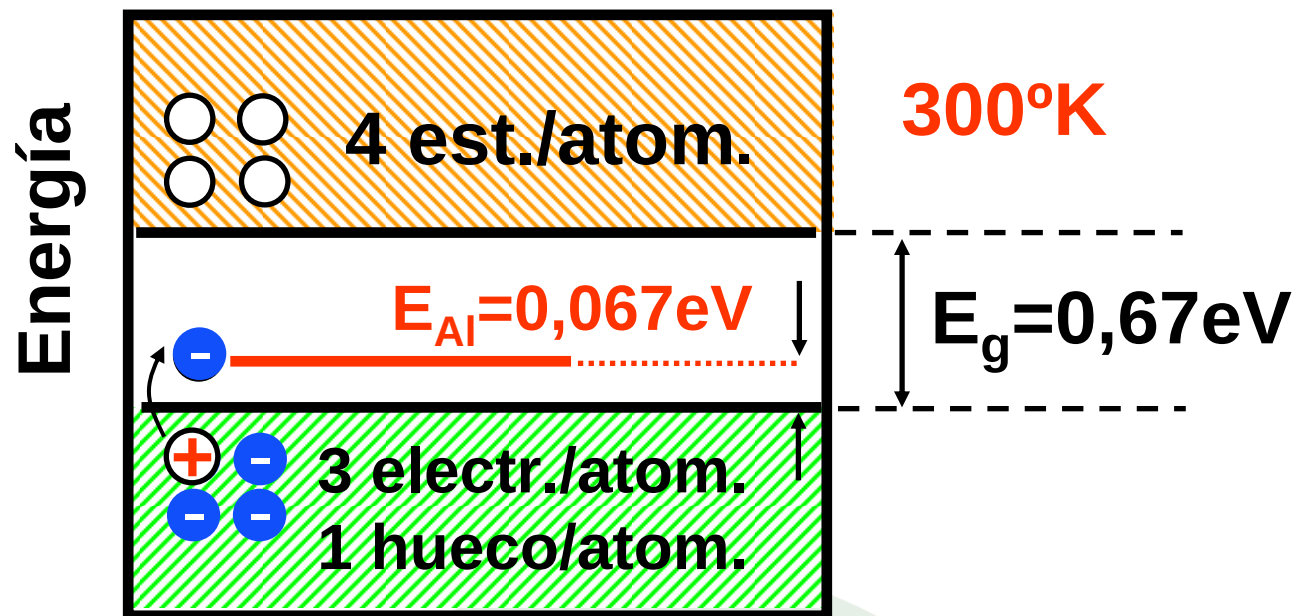


El Al es un aceptador y en el Ge hay más huecos que electrones. Es un semiconductor tipo P.



Semiconductores Extrínsecos

Interpretación en diagrama de bandas de un
semiconductor extrínseco **Tipo P**



El Al genera un estado permitido en la banda prohibida, muy cerca de la banda de valencia. La energía necesaria para que un electrón alcance este estado permitido se consigue a la temperatura ambiente, generando un hueco en la banda de valencia.



Semiconductores intrínsecos:

- Igual número de huecos y de electrones

Semiconductores extrínsecos:

Tipo P:

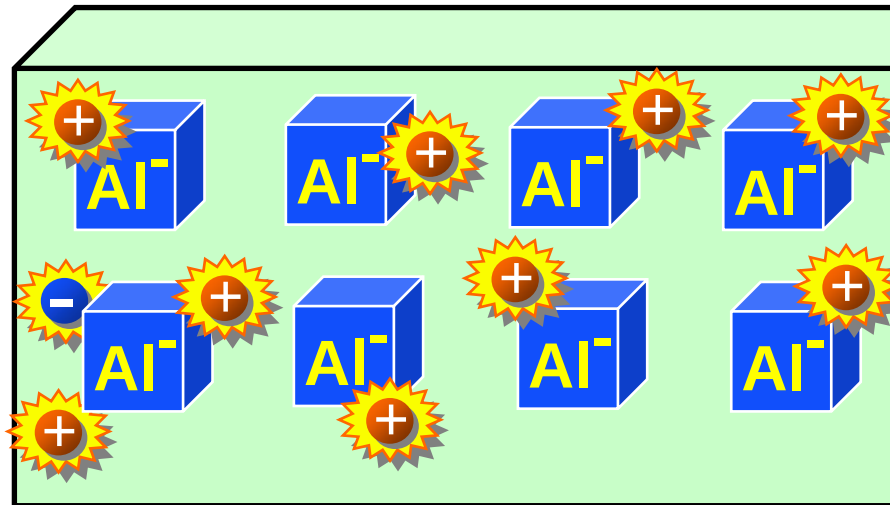
- Más huecos (*mayoritarios*) que electrones (*minoritarios*)
- Impurezas del grupo III (*aceptador*)
- Todos los átomos de aceptador ionizados “-”.

Tipo N:

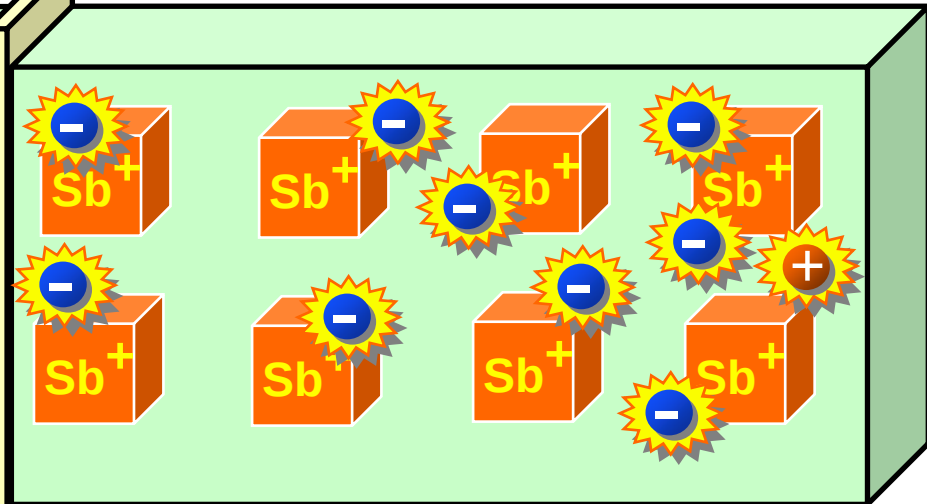
- Más electrones (*mayoritarios*) que huecos (*minoritarios*)
- Impurezas del grupo V (*donador*)
- Todos los átomos de donador ionizados “+”.



Germanio **tipo P**



Germanio **tipo N**



Barrera que impide la difusión

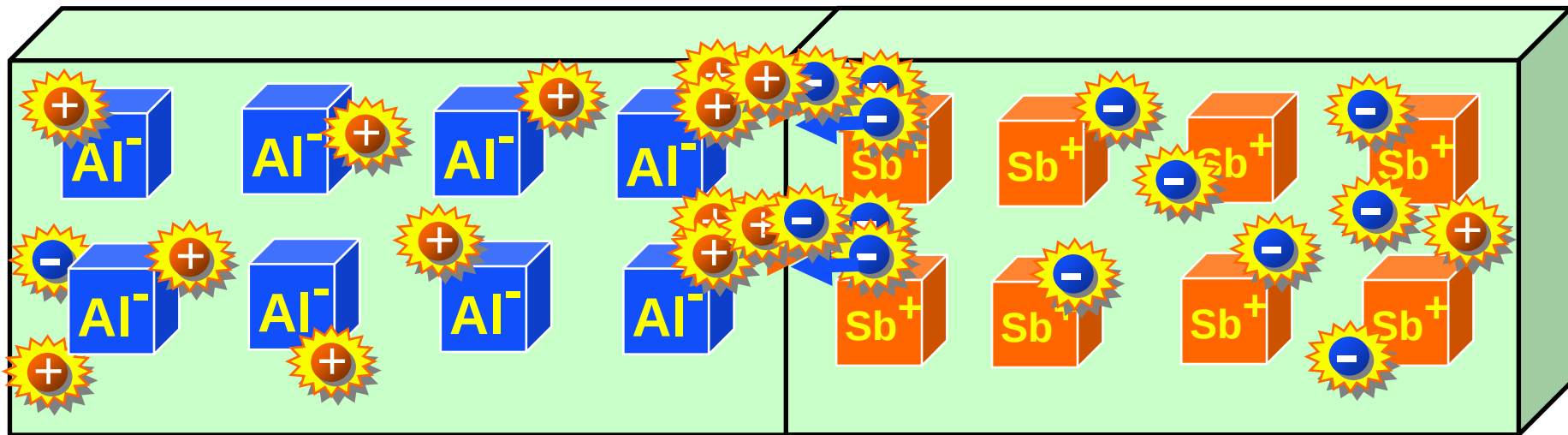
- Ambos son neutros
- Compensación de cargas e iones

¿Qué pasaría si no existiera la barrera que impide la difusión?



Germanio tipo P

Germanio tipo N



Se produce difusión de huecos de la zona P hacia la zona N y de electrones de la zona N hacia la zona P.

¿Se va a producir una difusión completa de huecos y electrones?



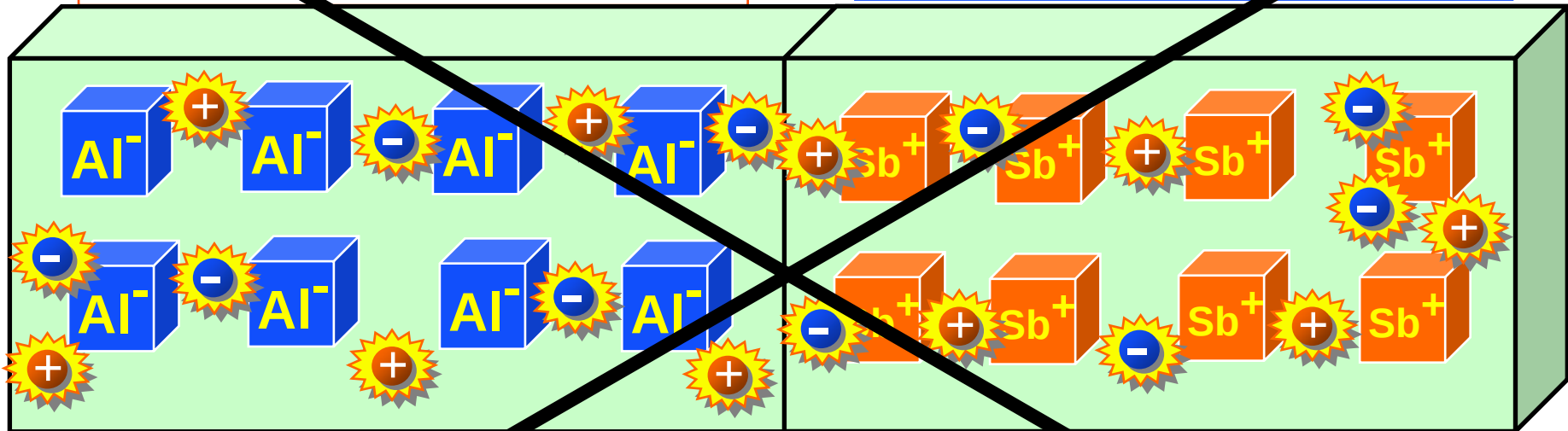
Universidad
de Oviedo

Unión PN

¿Se va a producir una difusión completa de huecos y electrones?

Germanio “antes” tipo P

Germanio “antes” tipo N



Zona **P** no neutra, sino
cargada **negativamente**

Zona **N** no neutra, sino
cargada **positivamente**

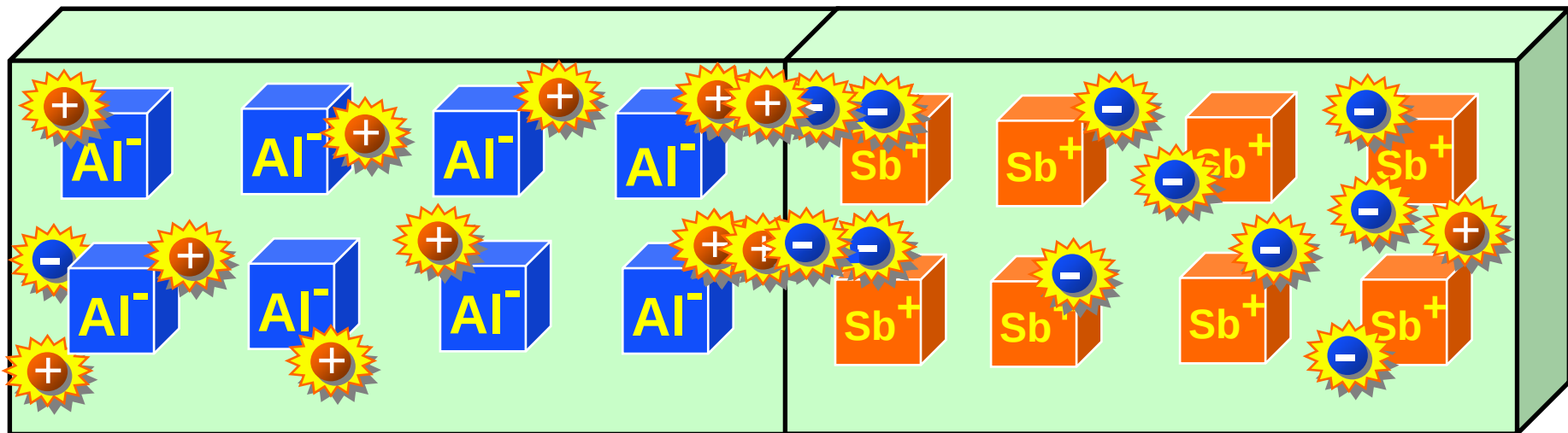
¿Es esta situación la situación final?

NO



Germanio tipo P

Germanio tipo N



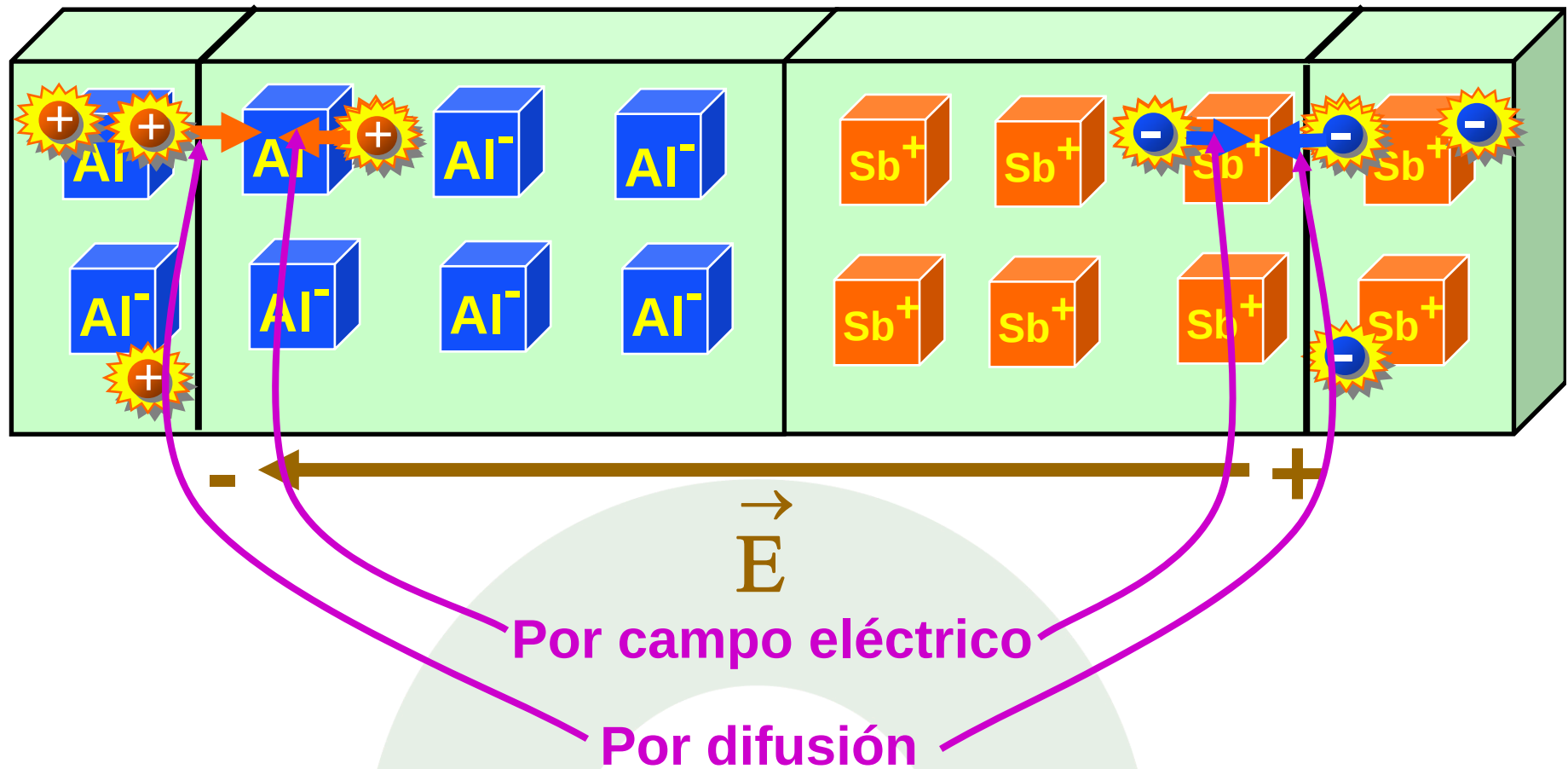
Aparece un campo eléctrico en la zona de contacto (unión metalúrgica) de las zonas



Unión PN

Germanio tipo P

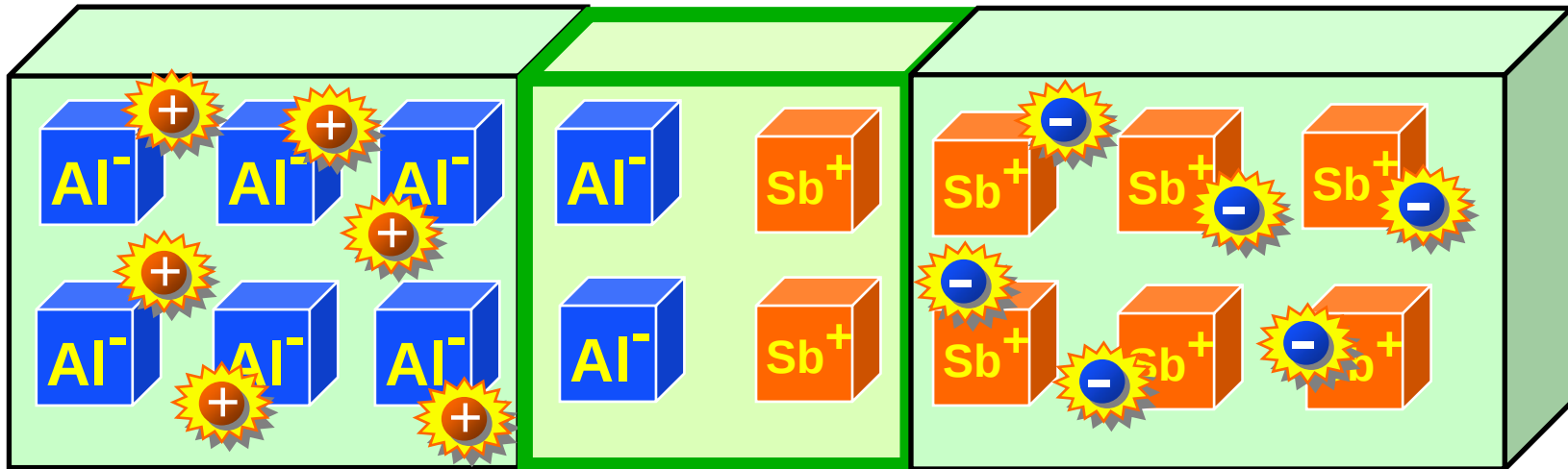
Germanio tipo N



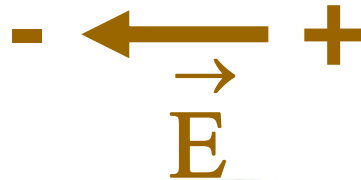
El campo eléctrico limita el proceso de difusión



Zonas de la unión PN



Zona **P** NEUTRA
(**huecos** compensados
con “iones -”)



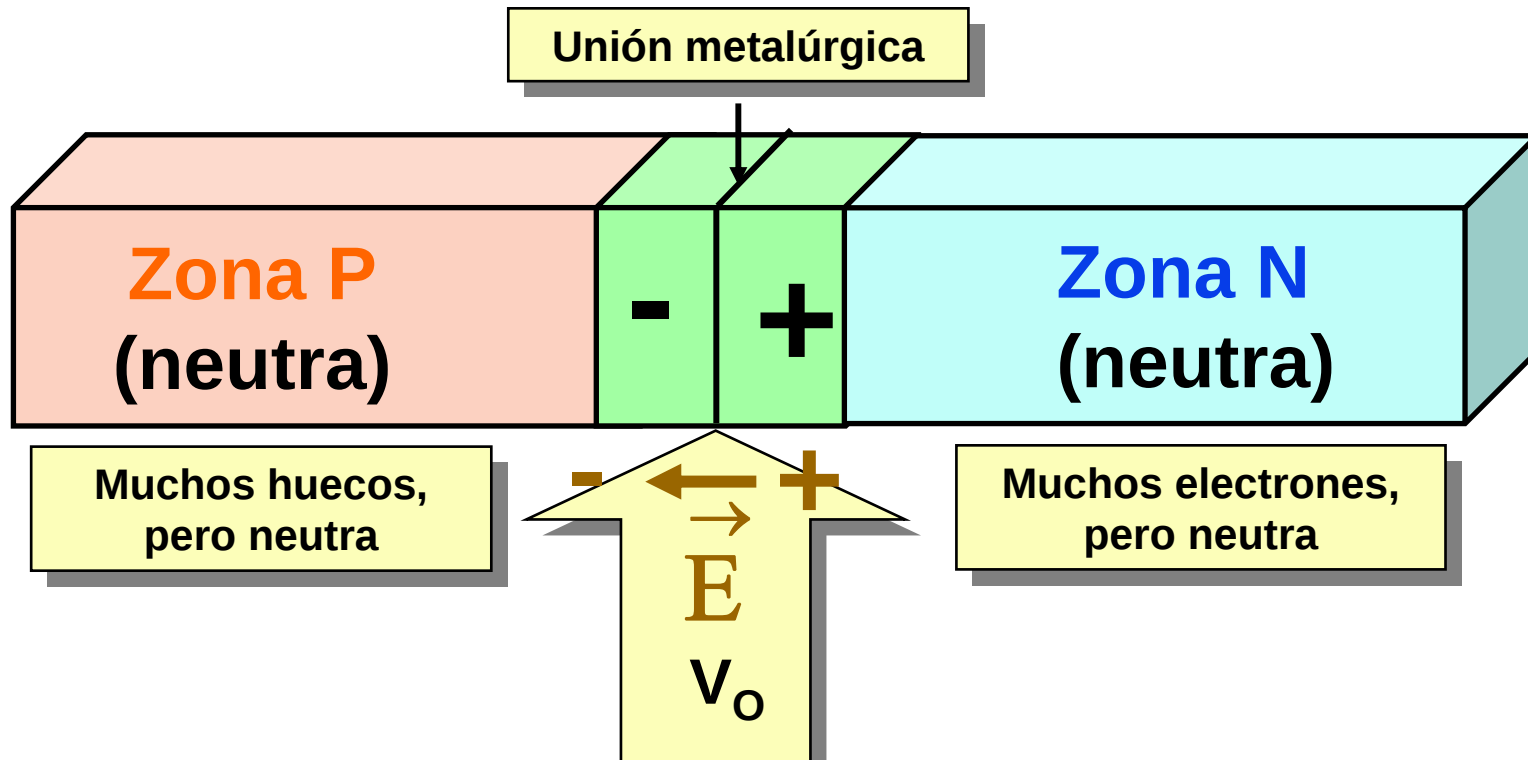
Zona **N** NEUTRA
(**electrones** compensados
con “iones +”)

Zona de Transición

Existe carga espacial y no existen casi
portadores de carga



Zonas de la unión PN

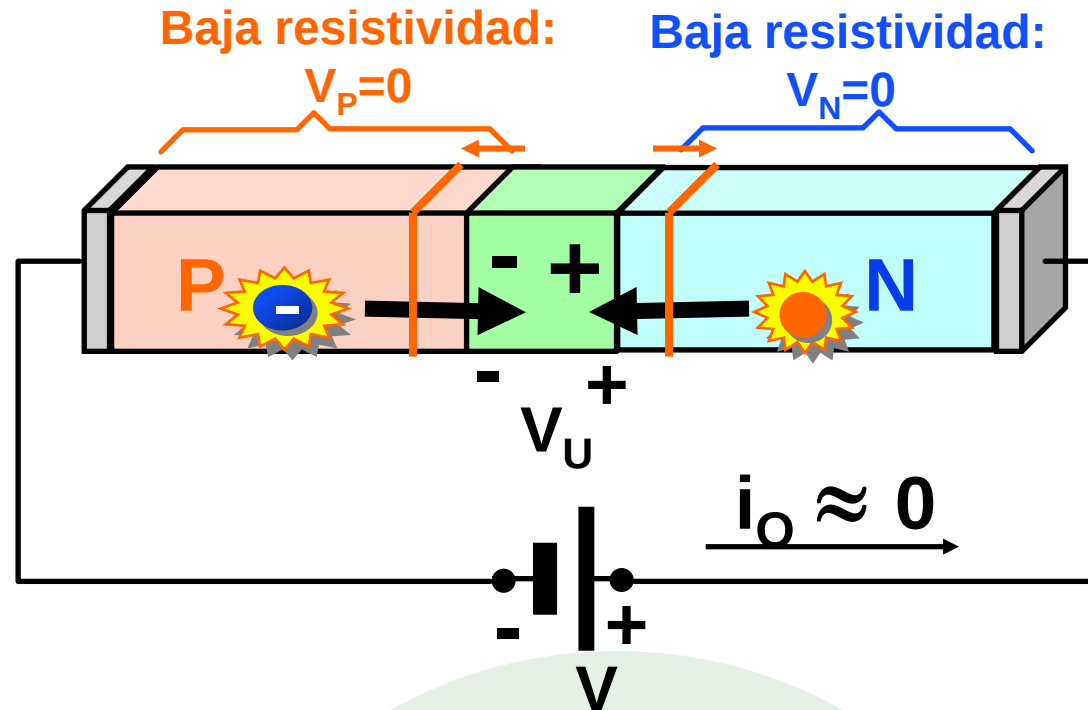


Zona de Transición (no neutra)

Existe carga espacial (que genera campo eléctrico, $\vec{E}$, y diferencia de potencial eléctrico, V_o) y no existen casi portadores de carga.



Polarización inversa



El campo eléctrico impide la difusión de mayoritarios

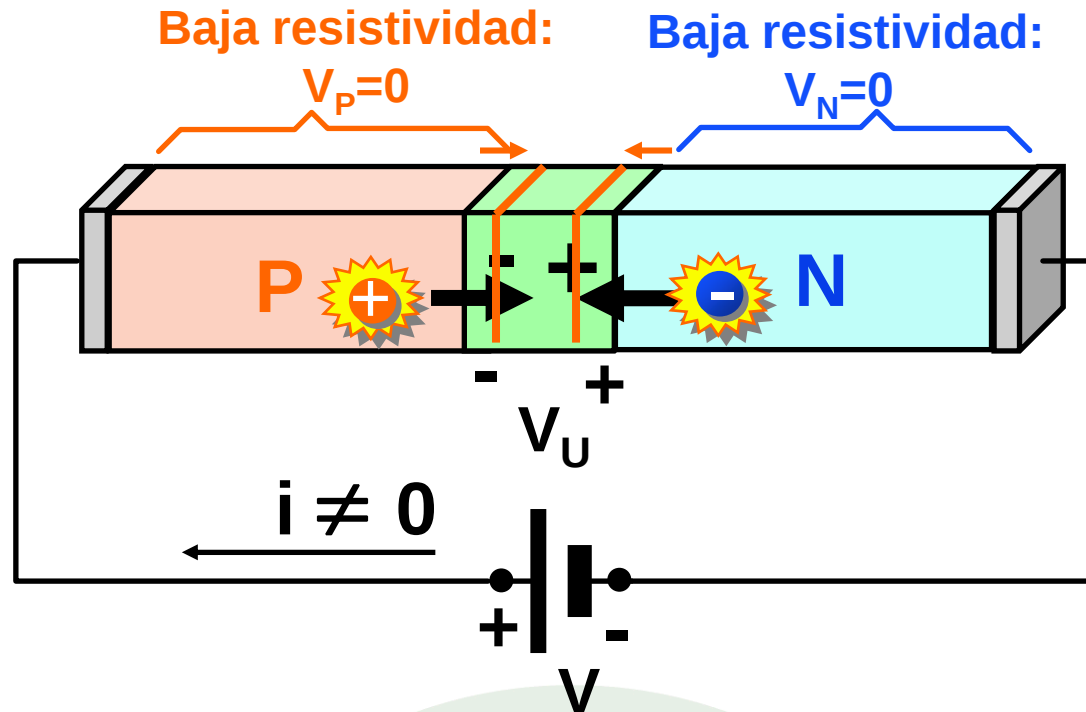
La zona de transición crece haciéndose menos conductora

La corriente circulante i_o se debe a portadores minoritarios

i_o depende mucho de la temperatura (se duplica con cada incremento de 10°C)



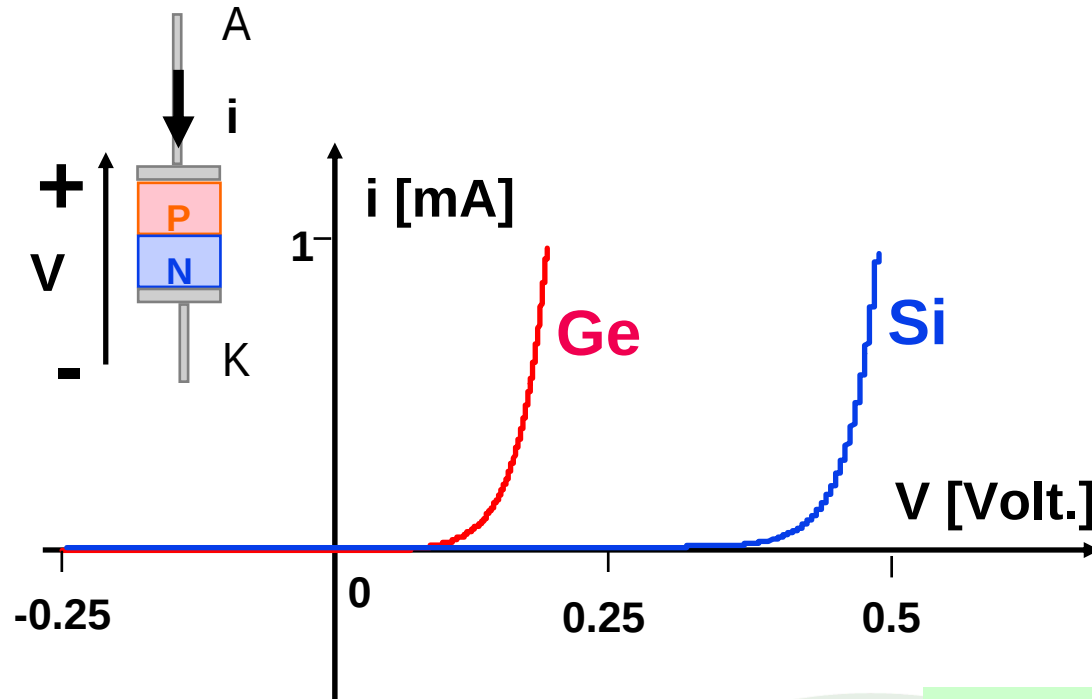
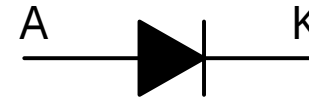
Polarización directa



- El campo exterior favorece la difusión de mayoritarios
- La zona de transición se hace más estrecha
- La corriente de minoritarios es prácticamente despreciable



El Diodo



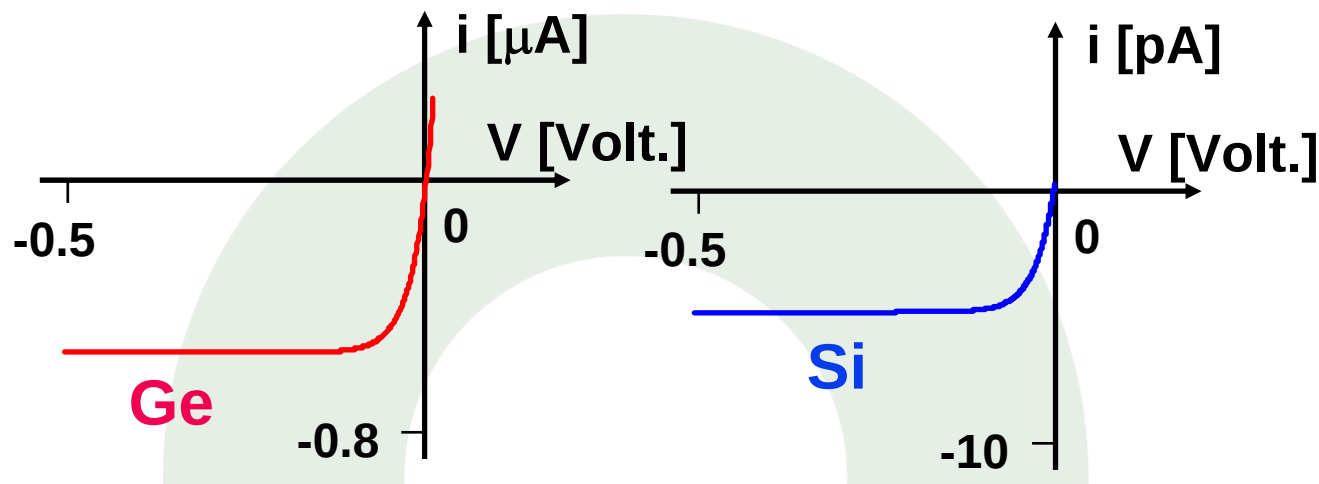
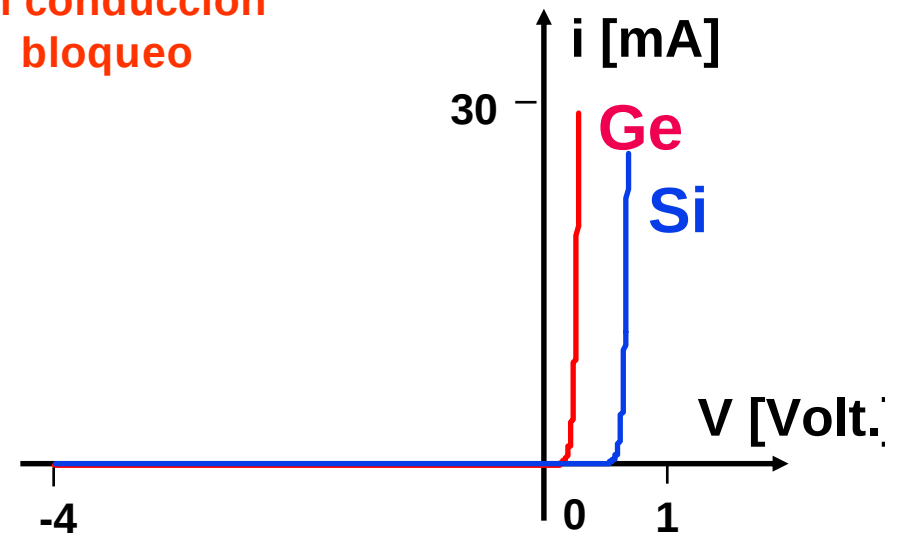
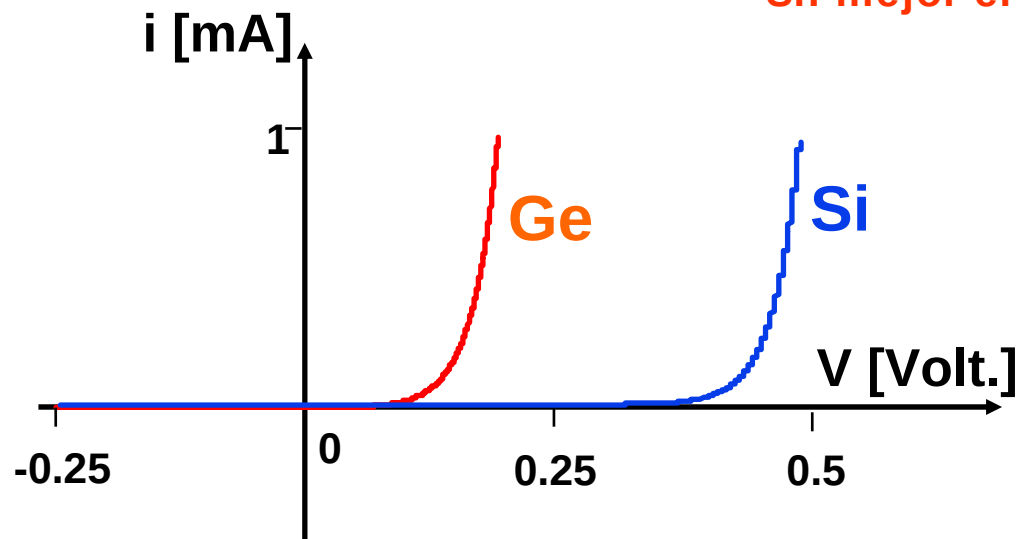
$$I_D = I_S \cdot \left(e^{\frac{V_D \cdot q}{K \cdot T}} - 1 \right)$$

I_S = Corriente Saturación Inversa
 K = Cte. Boltzman
 V_D = Tensión diodo
 q = carga del electrón
 T = temperatura ($^{\circ}\text{K}$)
 I_D = Corriente diodo



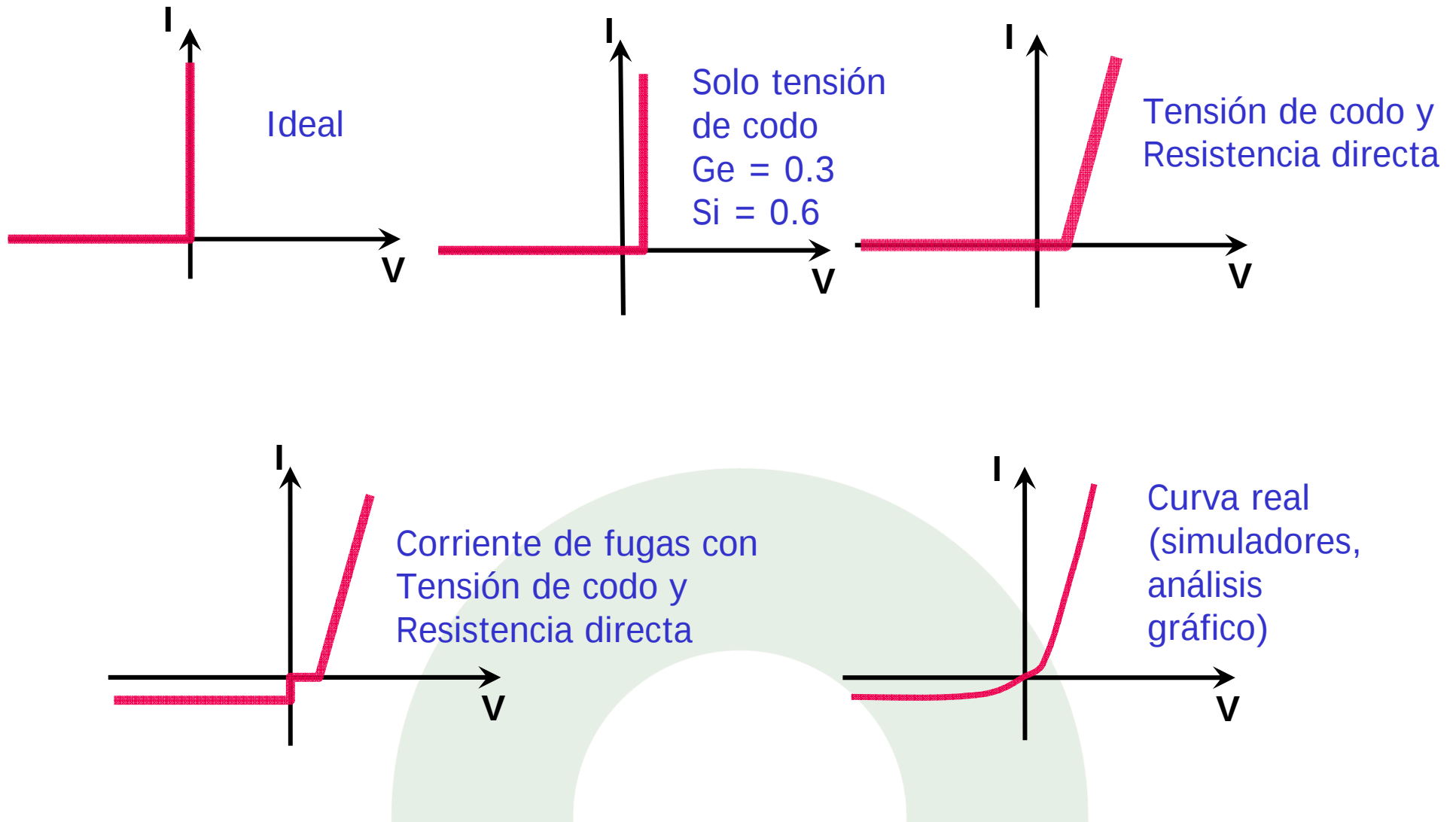
DIODO REAL (Distintas escalas)

Ge: mejor en conducción
Si: mejor en bloqueo





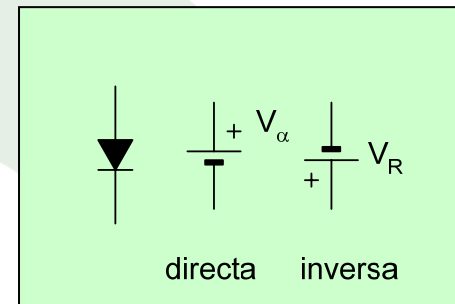
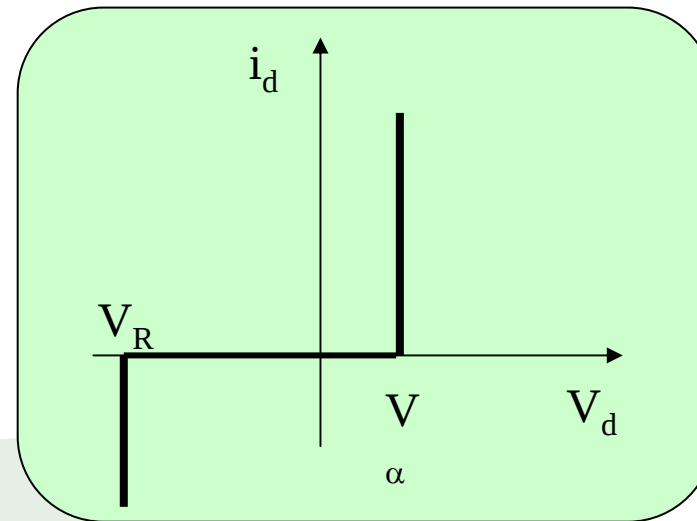
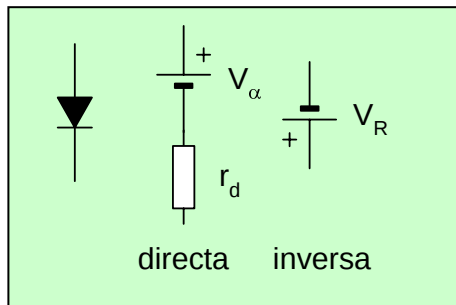
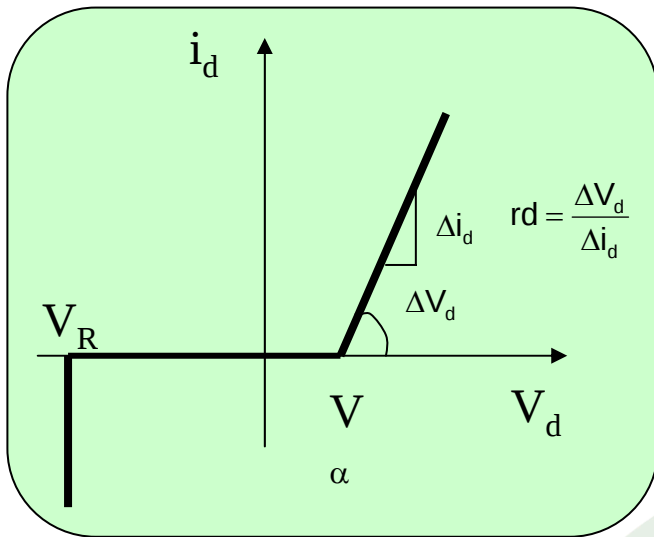
DIODO: distintas aproximaciones





¿Existe un modelo eléctrico sencillo del diodo?

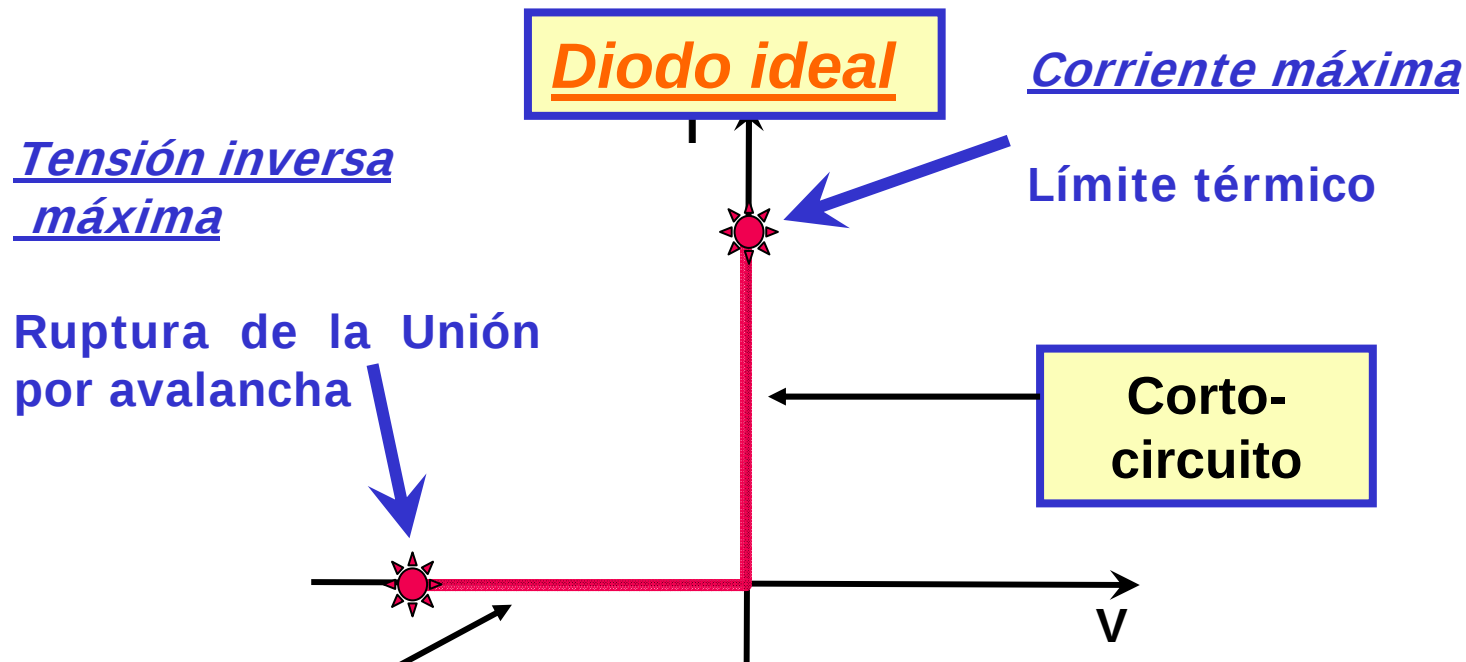
Linealización de las características





Universidad
de Oviedo

DIODO: limitaciones



600 V / 6000 A



200 V / 60 A



1000 V / 1 A

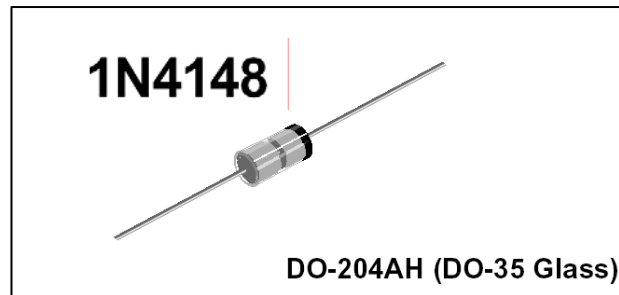


Universidad
de Oviedo

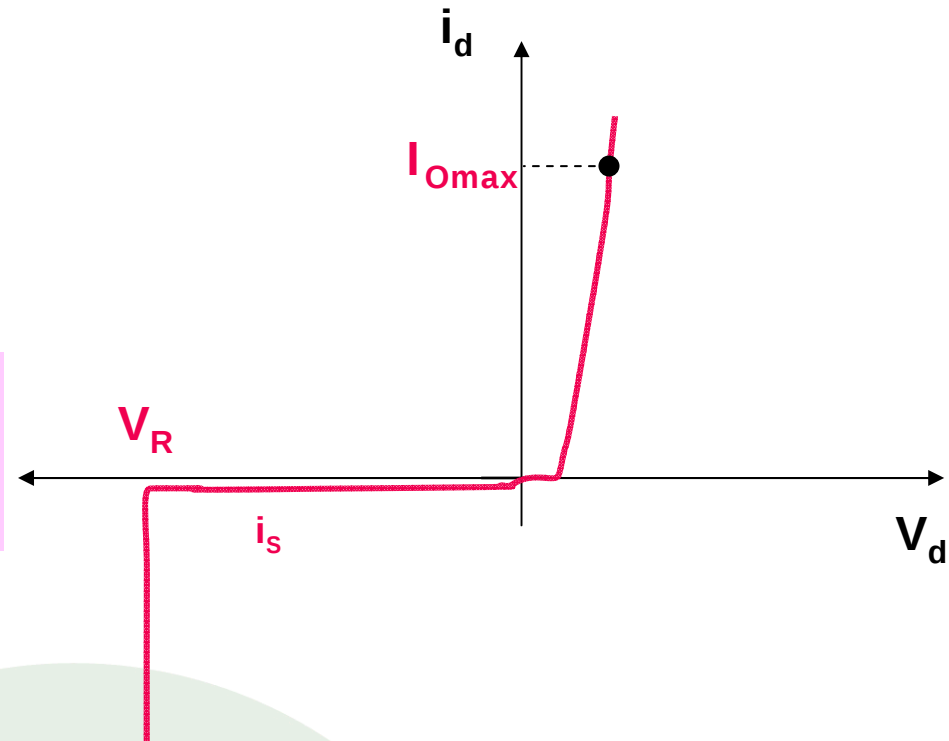
DIODO: Parámetros facilitados por fabricantes



$V_R =$	1000V	Tensión inversa máxima
$I_{OMAX (AV)} =$	1A	Corriente directa máxima
$V_F =$	1V	Caída de Tensión directa
$I_R =$	50 nA	Corriente inversa



$V_R =$	100V	Tensión inversa máxima
$I_{OMAX (AV)} =$	150mA	Corriente directa máxima
$V_F =$	1V	Caída de Tensión directa
$I_R =$	25 nA	Corriente inversa

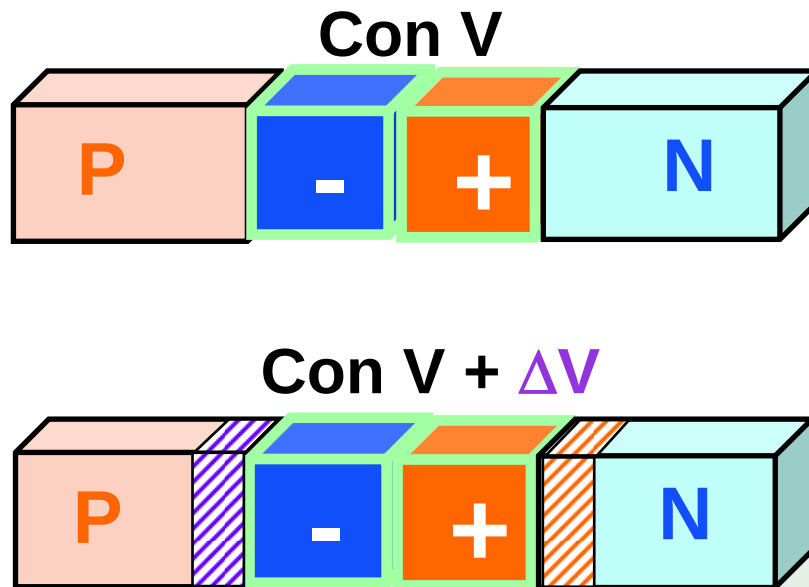


NOTA:

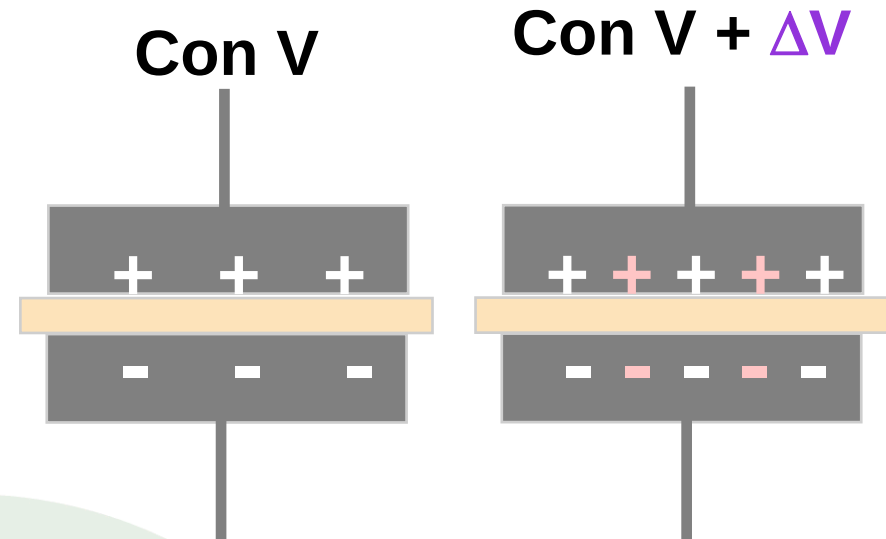
Se sugiere con un buscador obtener las hojas de características de un diodo (p.e. 1N4007). Normalmente aparecerán varios fabricantes para el mismo componente.



Unión PN



Condensador



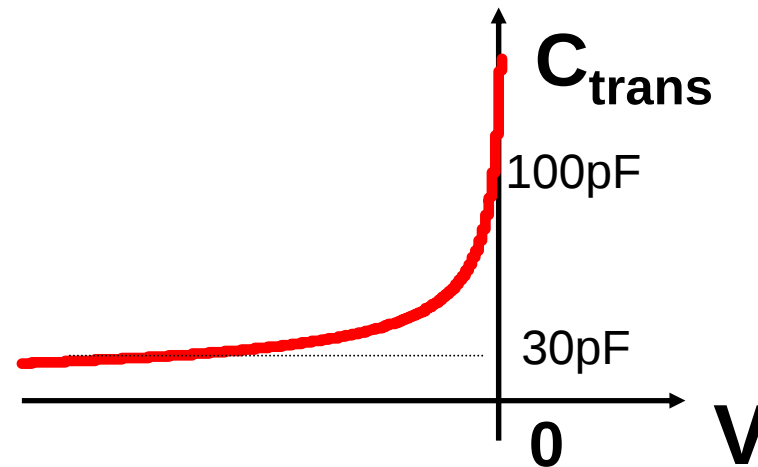
Condensador: nuevas cargas a la misma distancia ($C = \text{cte.}$)

Unión PN: nuevas cargas a distinta distancia ($C \neq \text{cte.}$)



Universidad
de Oviedo

Capacidades parásitas: capacidad de transición



Es una función del
tipo $K \cdot (V_0 - V)^{-1/2}$

Disminuye al aumentar la tensión inversa aplicada.
Las cargas se alejan más unas de otras



Capacidades parásitas: capacidad de transición

Los diodos **varicap o varactores** son diodos que se utilizan como condensadores variables controlados por tensión.

- Se basan en la capacidad de transición de una unión PN polarizada inversamente.
- Se utilizan frecuentemente en electrónica de comunicaciones para realizar moduladores de frecuencia, osciladores controlados por tensión, control automático de sintonía, etc.



Símbolo

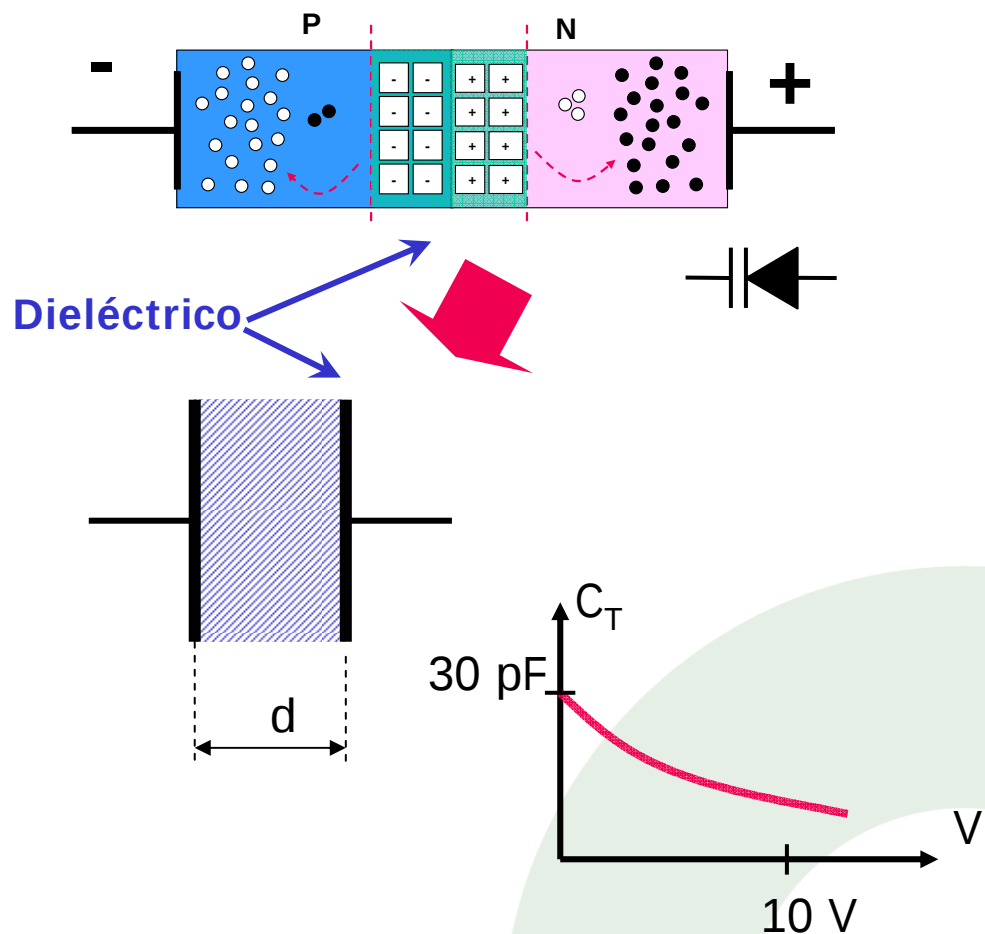


Se usa polarizado
inversamente



Universidad
de Oviedo

Diodo Varicap (Varicap, Varactor or Tuning diode)



La unión PN polarizada inversamente puede asimilarse a un condensador de placas planas (zona de transición).

Esta capacidad se llama Capacidad de Transición (C_T).

Notar, que al aumentar la tensión inversa aumenta la zona de transición. Un efecto parecido al de separar las placas de un condensador (C_T disminuye).

Tenemos pues una capacidad dependiente de la tensión inversa.

Un diodo Varicap tiene calibrada y caracterizada esta capacidad.

Uso en equipos de comunicaciones (p.e. Control automático de frecuencia en sintonizadores)

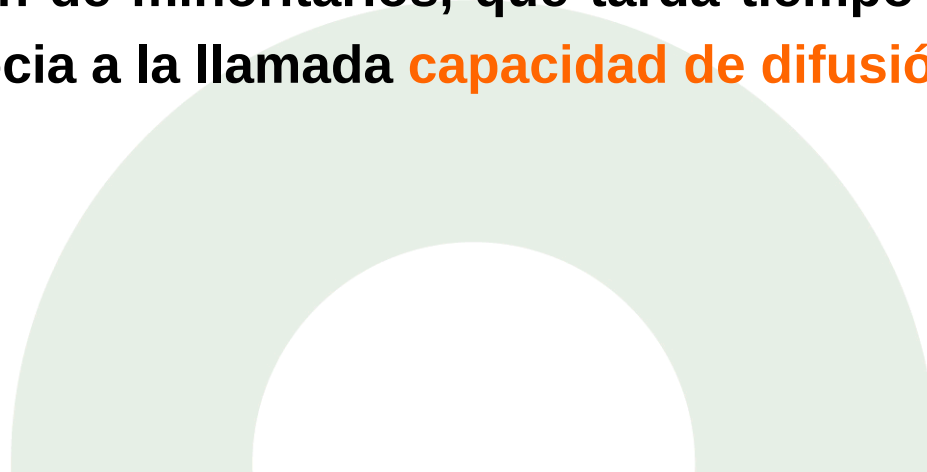


dominante con polarización directa

La capacidad de difusión.

Esta capacidad está ligada a la concentración de minoritarios en los bordes externos de la zona de transición.

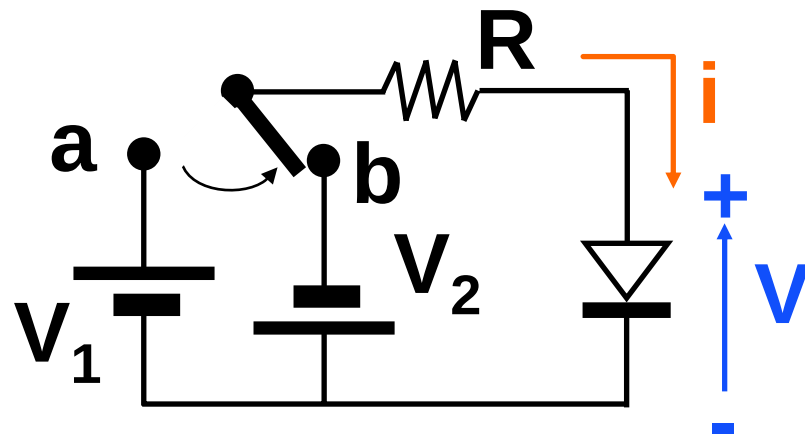
Al incrementar la tensión tiene que producirse un aumento de concentración de minoritarios, que tarda tiempo en producirse, lo que se asocia a la llamada *capacidad de difusión*





Tiempos de conmutación

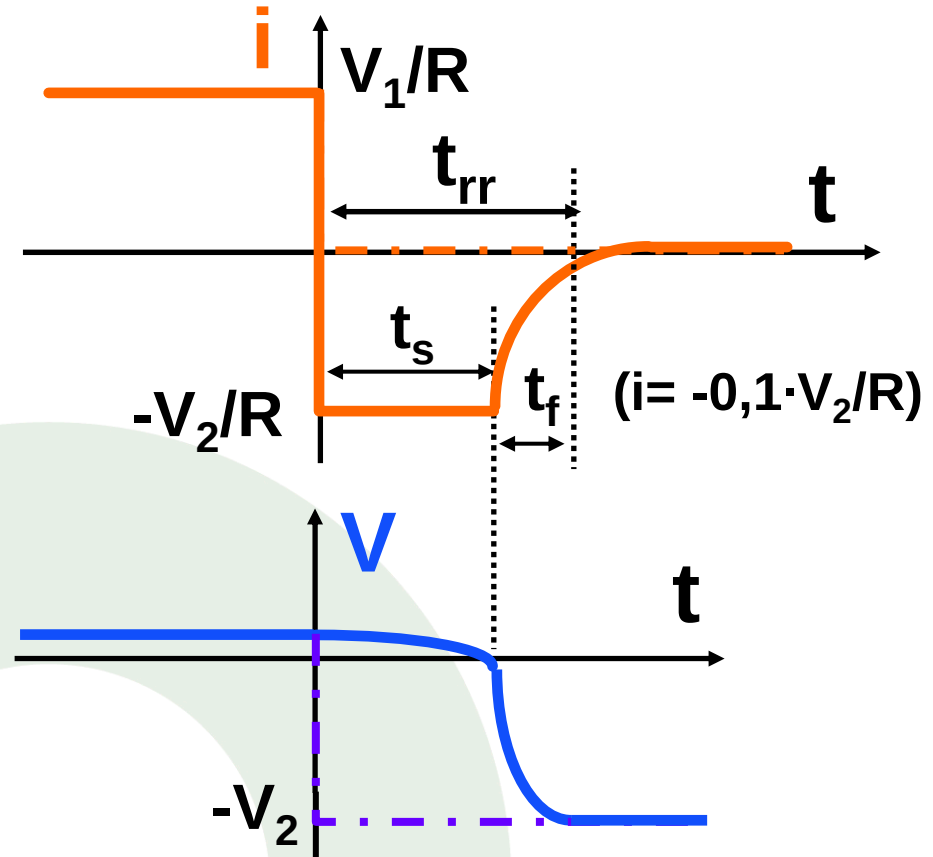
Transición de “a” a “b” (apagado), en una escala detallada (μs o ns).



t_s = tiempo de almacenamiento
(storage time)

t_f = tiempo de caída (fall time)

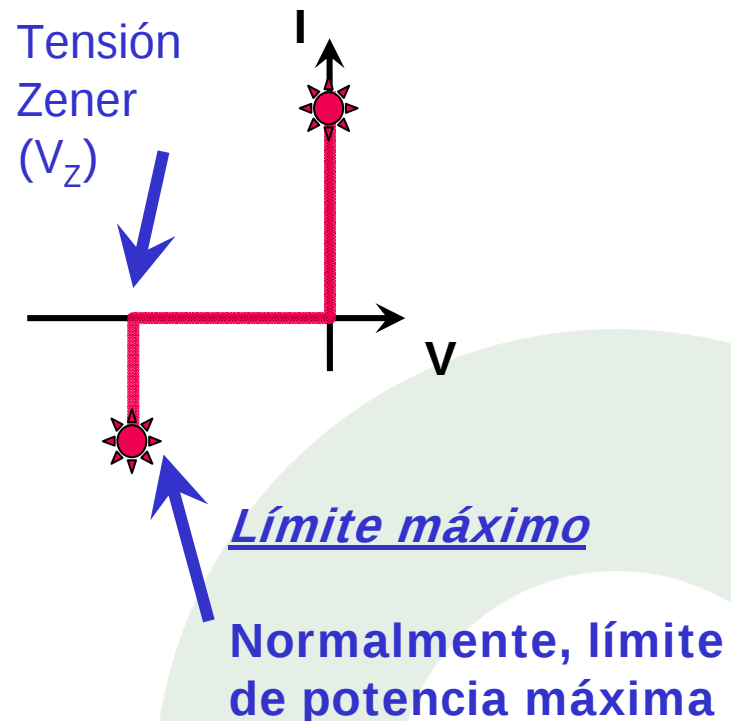
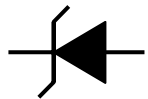
t_{rr} = tiempo de recuperación
inversa (reverse recovery time)





DIODOS ESPECIALES

Diodo Zener (Zener diode)



La ruptura no es destructiva.
(Ruptura Zener).

En la zona Zener se comporta
como una fuente de tensión
(Tensión Zener).

Necesitamos, un límite de
corriente inversa.

Podemos añadir al modelo
lineal la resistencia Zener.

Aplicaciones en pequeñas
fuentes de tensión y
referencias.



Fenómeno de avalancha o zener.

Avalancha: la ruptura de los enlaces se produce por el choque de los portadores minoritarios contra los átomos del cristal. Los portadores son acelerados por el campo externo aplicado.

Zener: Se consigue dopando más uno de los semiconductores para provocar un elevado gradiente de campo eléctrico en la zona de transición, y éste es el causante de la ruptura de los enlaces.

Diferencias:

- Coeficiente de temperatura positivo en el caso de la ruptura por avalancha y negativo en el caso ruptura zener.

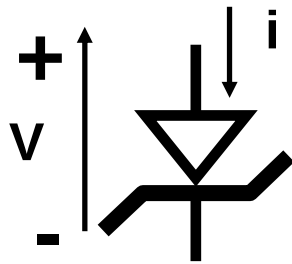
¿Cuándo se produce cada una?

- Para el Si: si la tensión a la que se produce la ruptura es menor de 4,5 voltios, la ruptura es tipo zener; si es mayor que 9 voltios, es tipo avalancha; a tensiones entre 4,5 y 9 voltios es mixta.
- Para el Ge: lo mismo pero con 2,7 y 5,4 voltios.

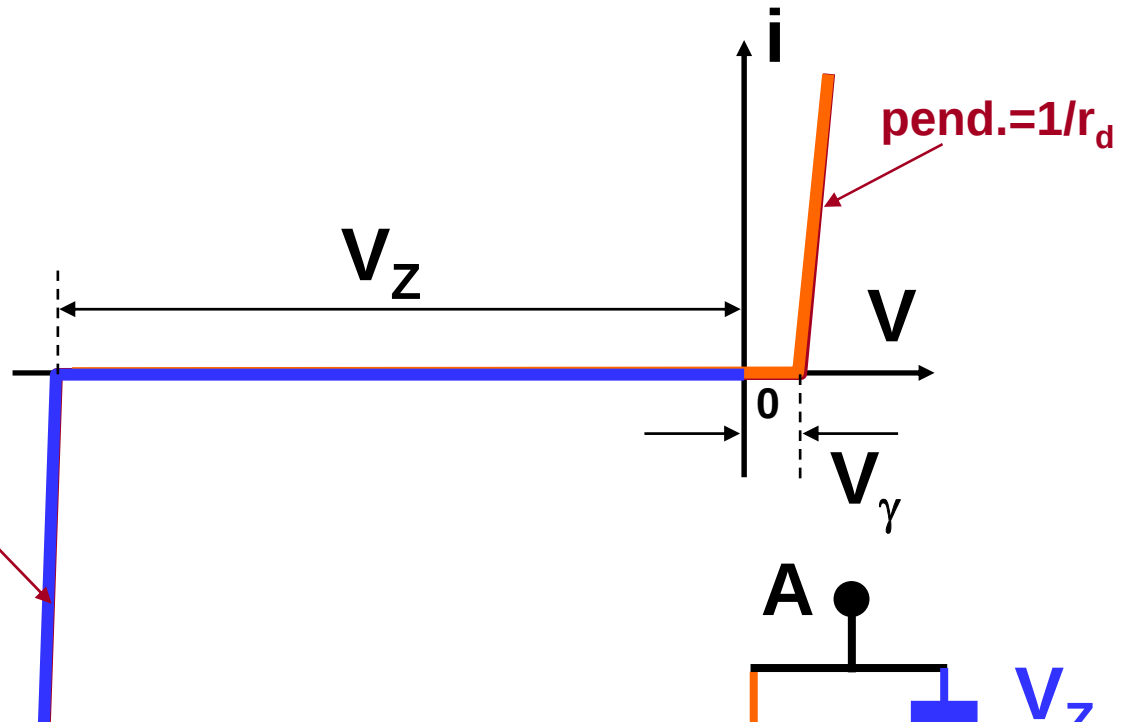


Universidad
de Oviedo

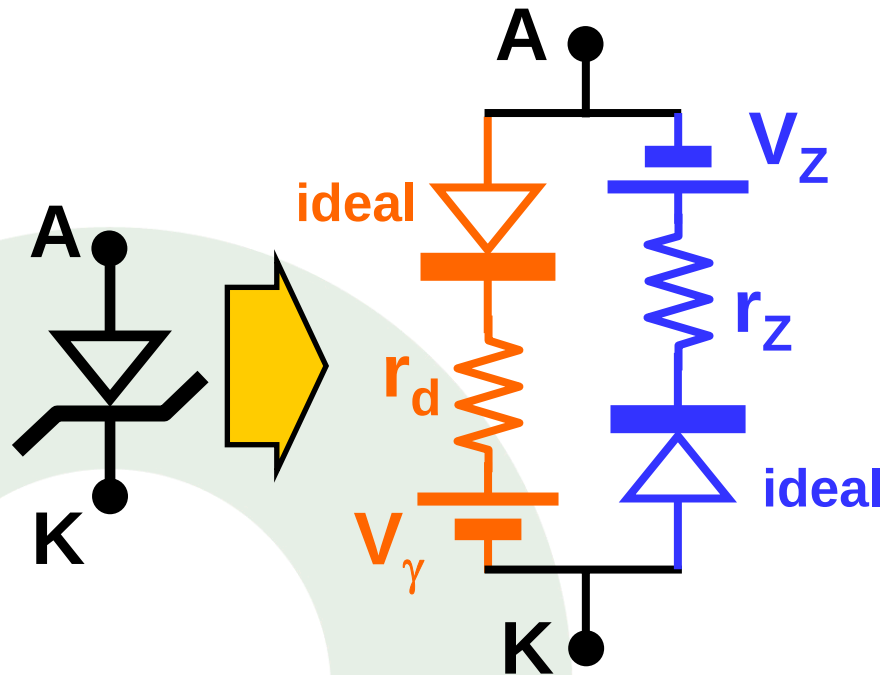
Diodos zener



pend. $=1/r_z$

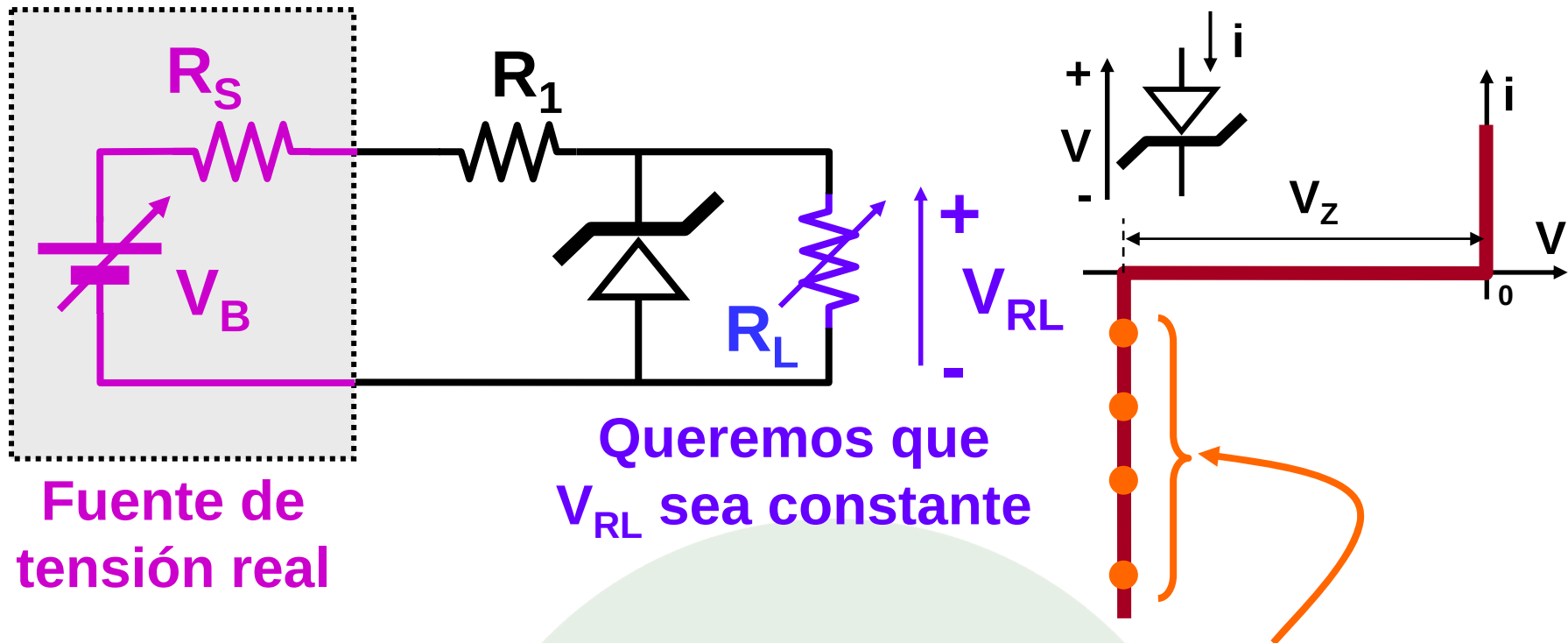


Circuito equivalente
asintótico





Circuito estabilizador con zener



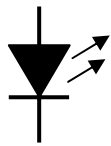
Si se diseña para que el punto de trabajo del zener esté en la zona de ruptura (zona zener),



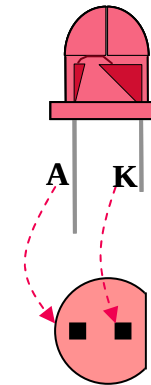
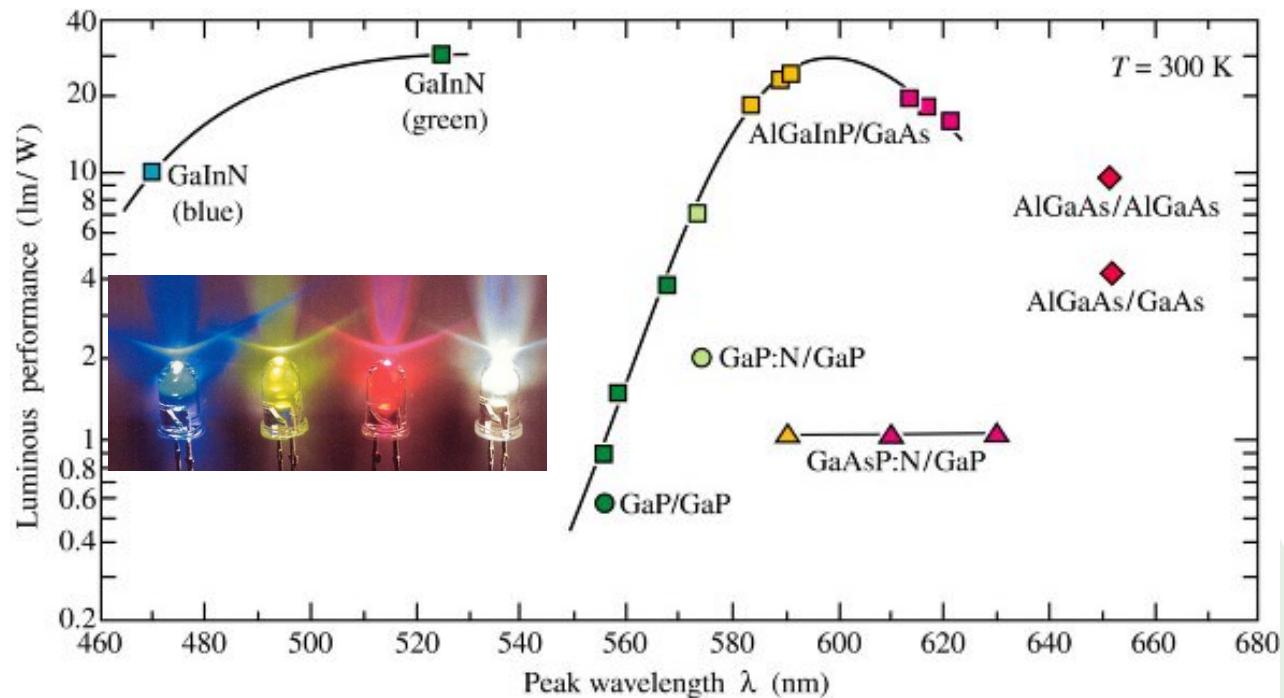
Universidad
de Oviedo

Diodo LED (LED diode)

Diodo emisor de Luz = Light Emitter Diode



El semiconductor es un compuesto III-V (p.e. Ga As). Con la unión PN polarizada directamente emiten fotones (luz) de una cierta longitud de onda. (p.e. Luz roja)





Universidad
de Oviedo

Diodo LED (LED diode)

Materiales:

GaAs

Infrarrojo

AlInGaP

Rojo

GaP

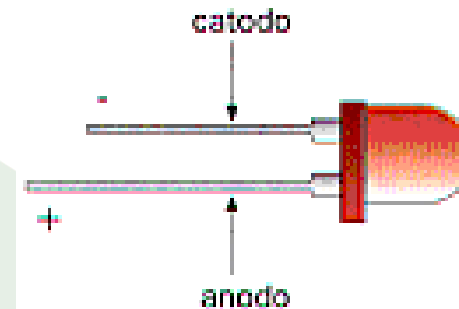
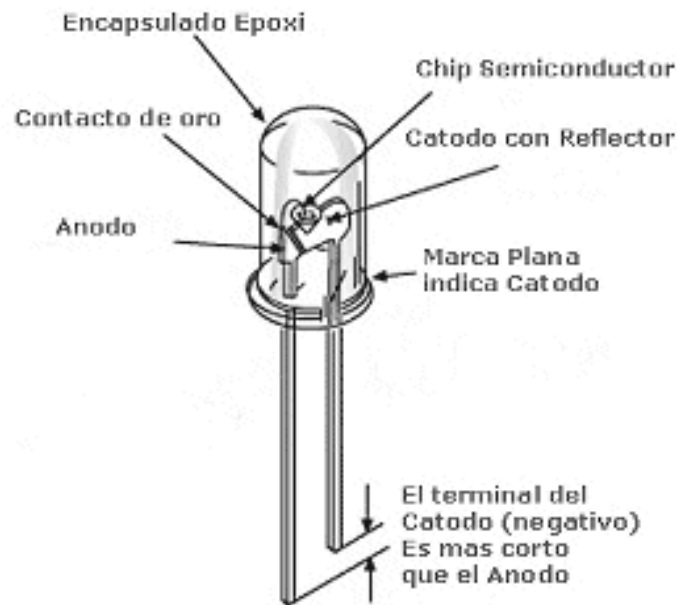
Verde

SiC

Azul

GaN

Ultravioleta



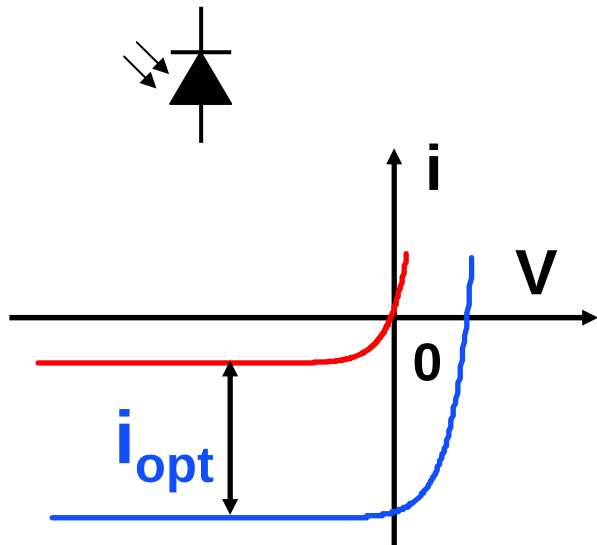


Fotodiodos (Photodiode)

Los diodos basados en compuestos III-V, presentan una corriente de fugas proporcional a la luz incidente (siendo sensibles a una determinada longitud de onda).

Estos fotodiodos se usan en el tercer cuadrante. Siendo su aplicaciones principales:

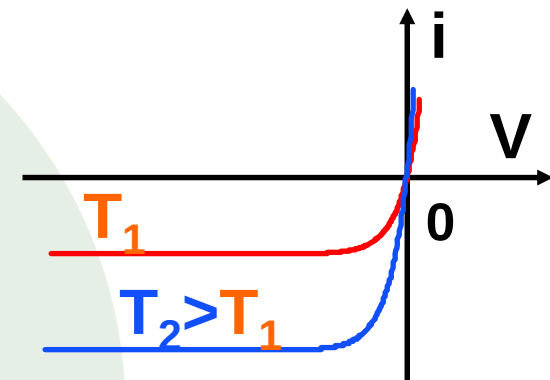
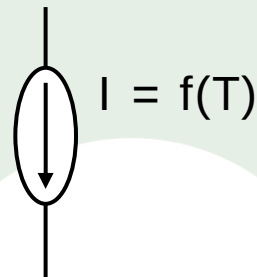
Sensores de luz (fotómetros)
Comunicaciones



COMENTARIO

Los diodos normales presentan variaciones en la corriente de fugas proporcionales a la Temperatura y pueden ser usados como sensores térmicos

El modelo puede ser una fuente de corriente dependiente de la luz o de la temperatura según el caso

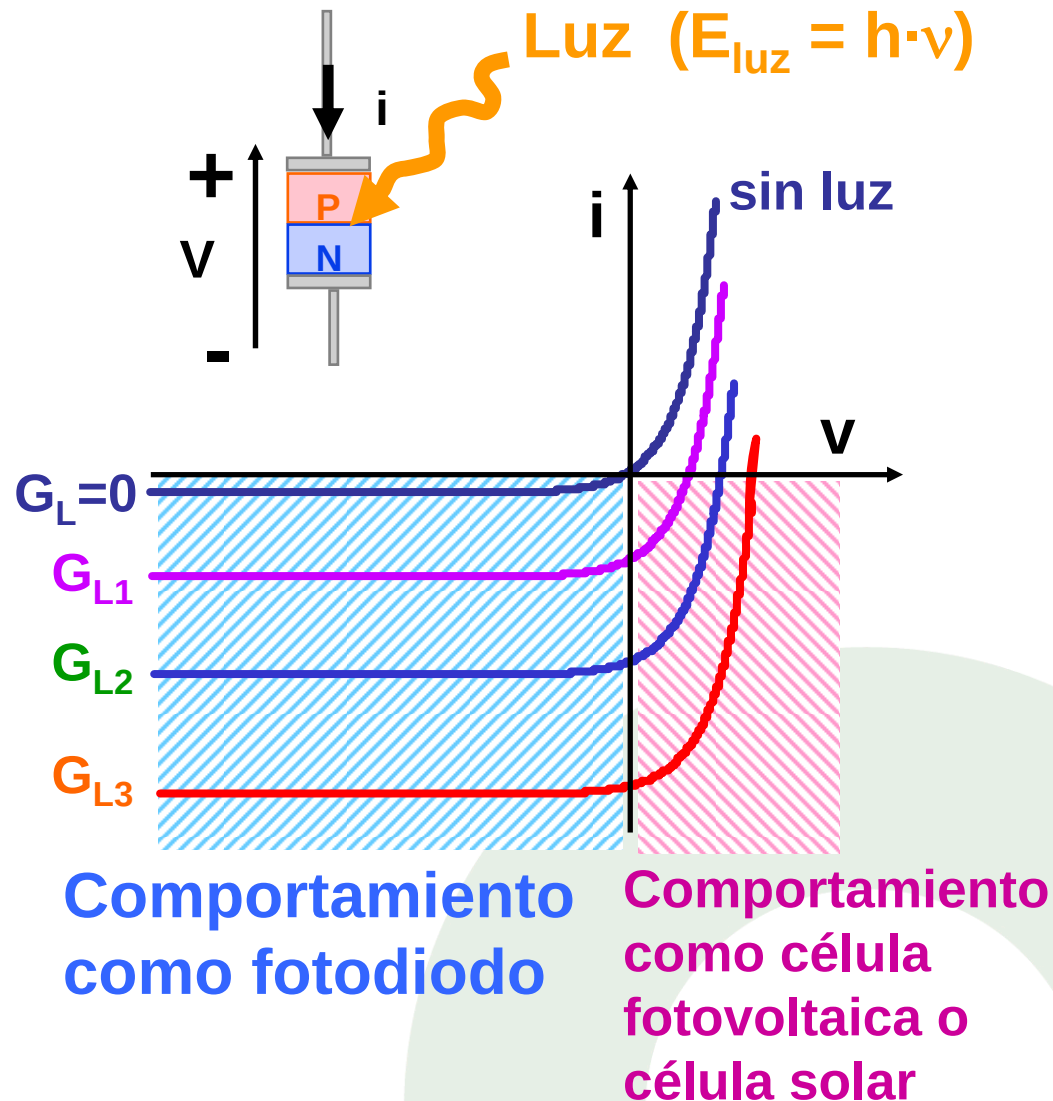




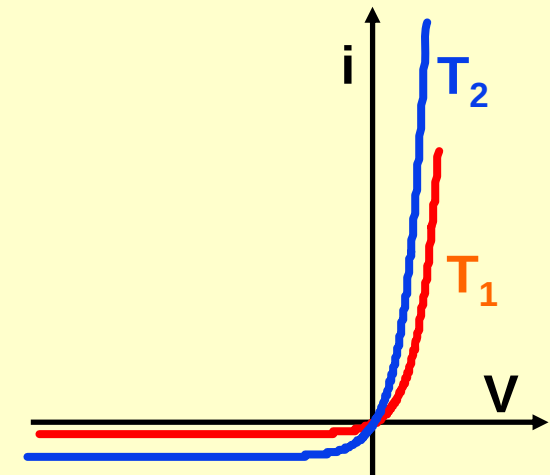
Universidad
de Oviedo

Células solares (Solar Cell)

Efecto fotovoltaico



¡¡Ojo!! la variación de temperatura no genera operación en el tercer cuadrante



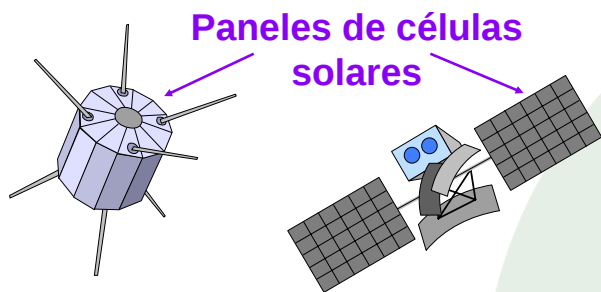
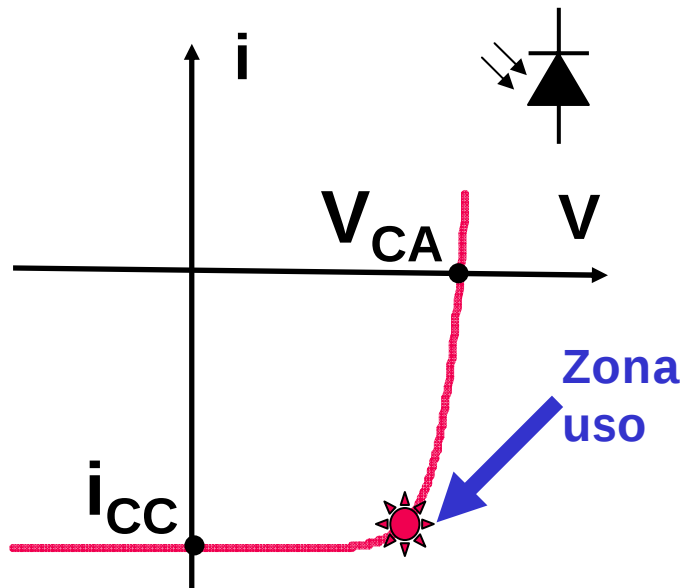


Universidad
de Oviedo

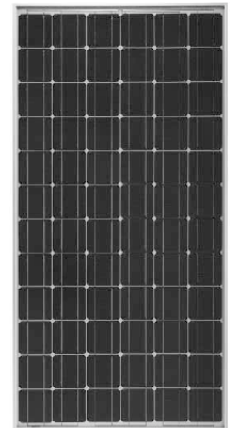
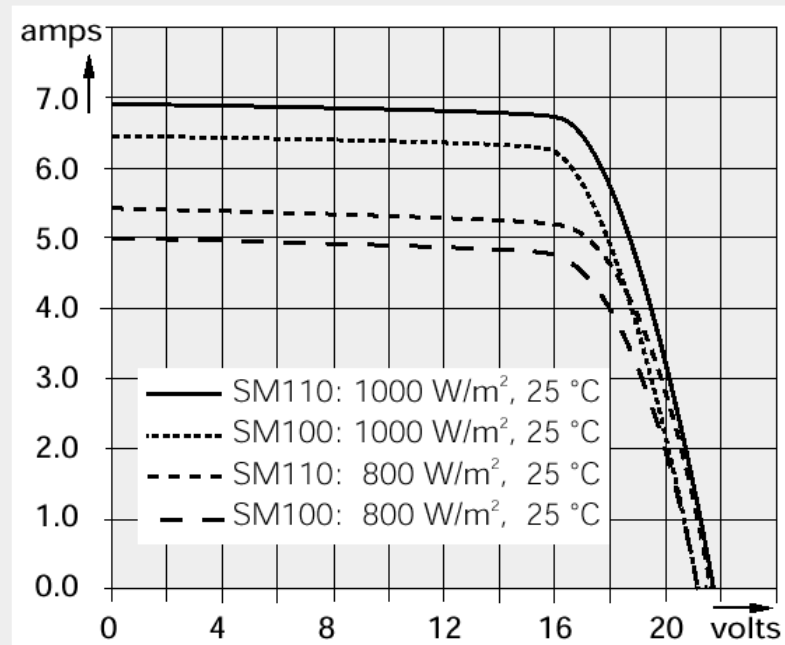
Células solares (Solar Cell)

Cuando incide luz en una unión PN, la característica del diodo se desplaza hacia el 4º cuadrante.

En este caso, el dispositivo puede usarse como generador.



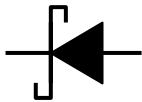
Voltage-current characteristic 12 V





Universidad
de Oviedo

Diodo Schottky (Schottky diode)



Unión Metal-semiconductor N. Produciéndose el llamado efecto schottky.

La zona N debe estar poco dopada.

Dispositivos muy rápidos (capacidades asociadas muy bajas).

Corriente de fugas significativamente mayor.

Menores tensiones de ruptura.

Caídas directas mas bajas (tensión de codo $\cong 0.2$ V).

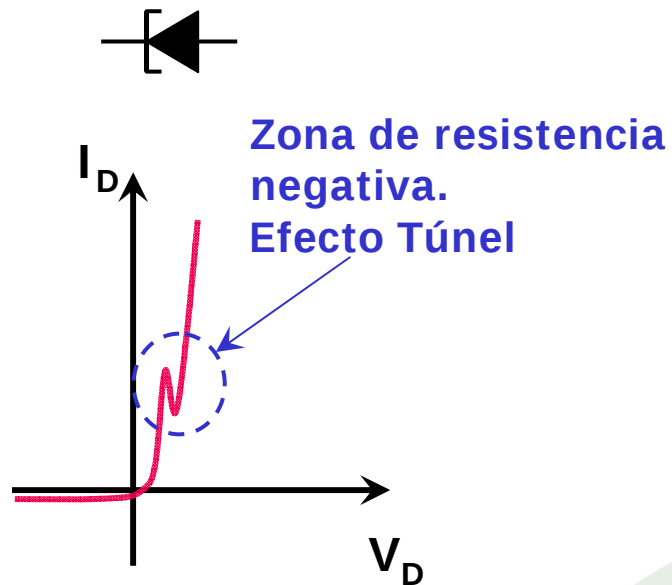
Aplicaciones en Electrónica Digital y en Electrónica de Potencia

El efecto Schottky fue predicho teóricamente
en 1938 por Walter H. Schottky



Universidad
de Oviedo

Diodo tunel y diodo GUNN *(Gunn diode and Tunnel diode)*



Diodo GUNN



Tienen dopadas mucho las dos zonas del diodo (10^5 veces mayor).

Aparece un efecto nuevo conocido como *efecto túnel*. (Descubierto por Leo Esaki en 1958).

Un efecto parecido (GUNN) se produce en una cavidad tipo N de Ga As.

El diodo GUNN fue descubierto por Ian Gunn en 1962.

Los efectos se traducen en una zona de resistencia negativa en la característica directa del diodo.

Esta zona se aprovecha para hacer osciladores de microondas.

(El diodo GUNN aparece en el oscilador local del receptor del radar. Está presente en todos los radares marinos actuales).



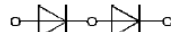
Universidad
de Oviedo

ASOCIACIÓN DE DIODOS

Diodo de alta tensión (Diodos en serie)



HSK



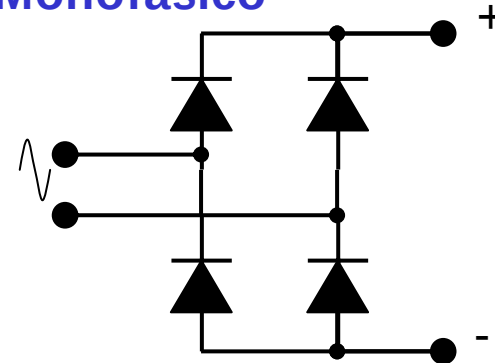
SKV

DISPLAY

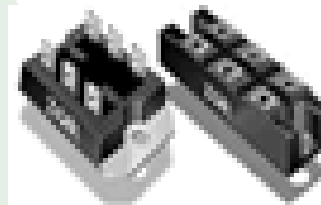
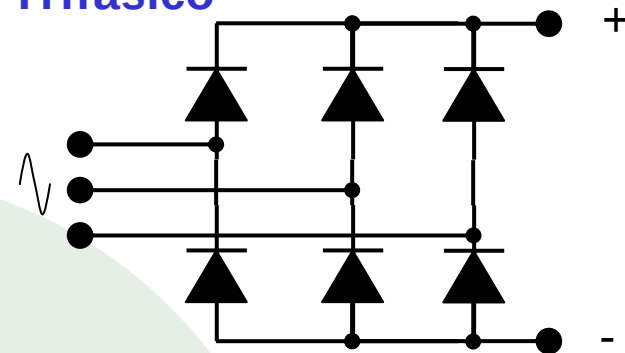


Puente rectificador

Monofásico



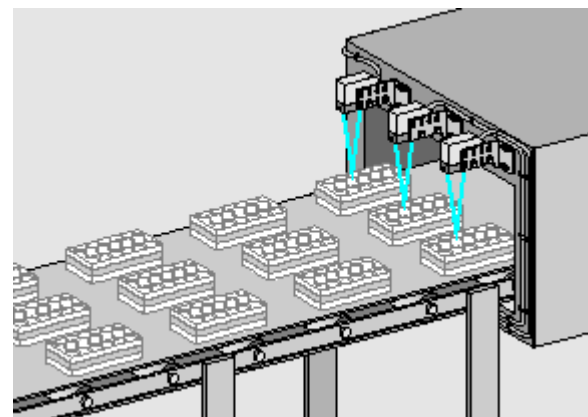
Trifásico



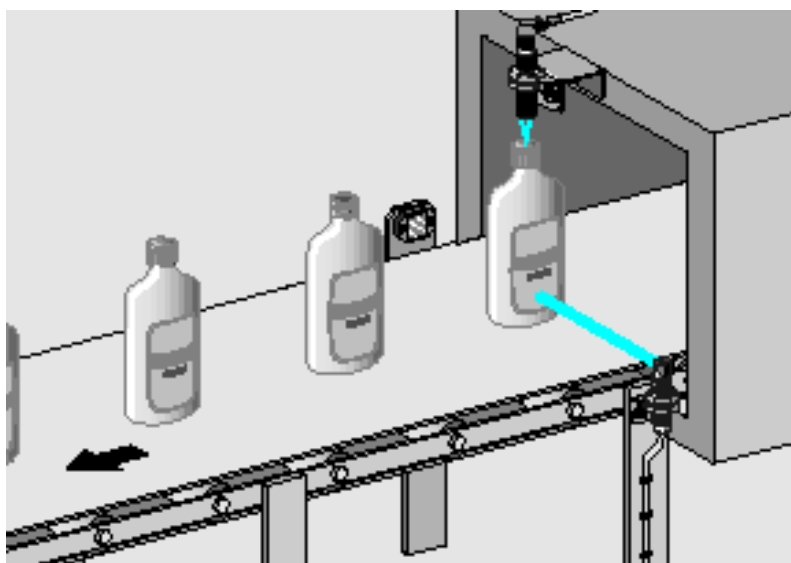


Universidad
de Oviedo

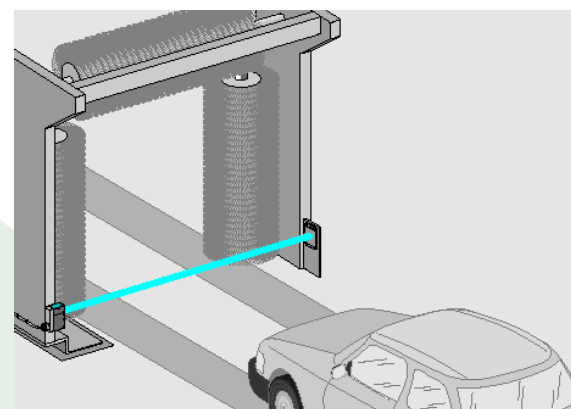
APLICACIONES DE DIODOS



Detectores reflexión de objeto



Detectores reflexión de espejo



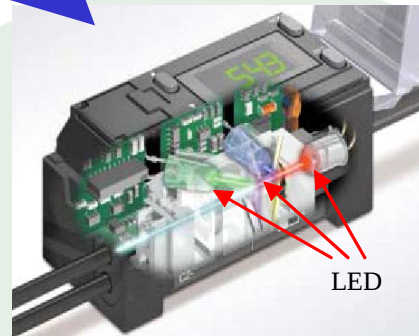
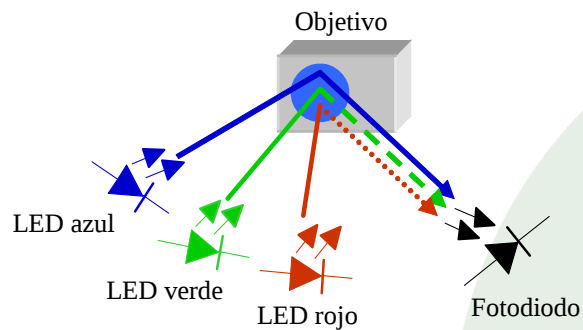
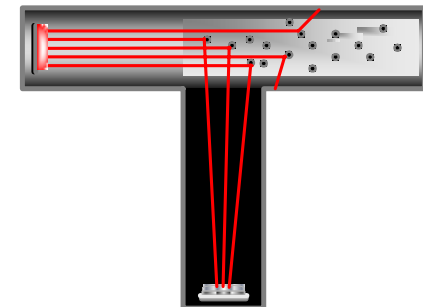
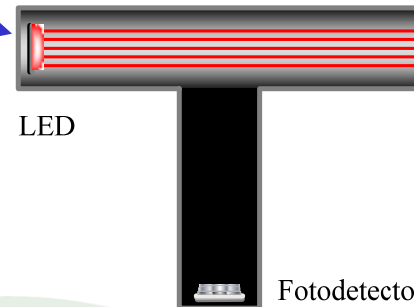
Detectores de barrera



Universidad
de Oviedo

APLICACIONES DE DIODOS

Sensores de luz: Fotómetros
Sensor de lluvia en vehículos
Detectores de humo
Sensor de Color



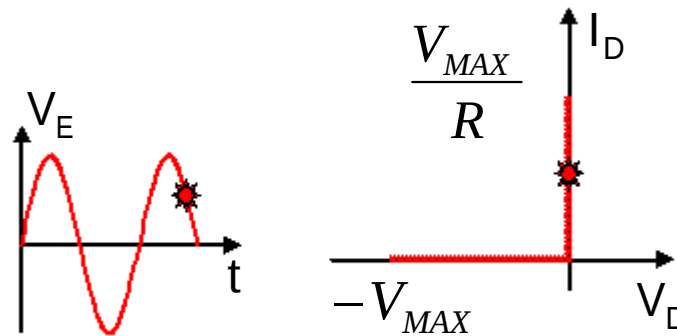
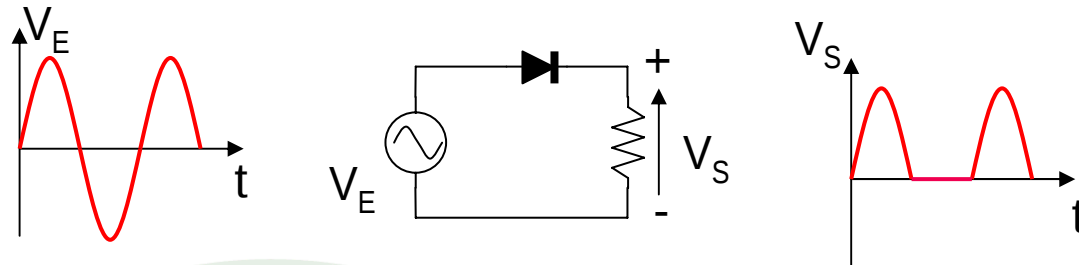


Los diodos (y el resto de dispositivos electrónicos) son dispositivos no lineales.

¡Cuidado, no se puede aplicar el principio de superposición!

¡Cuidado, no se puede aplicar el análisis con complejos

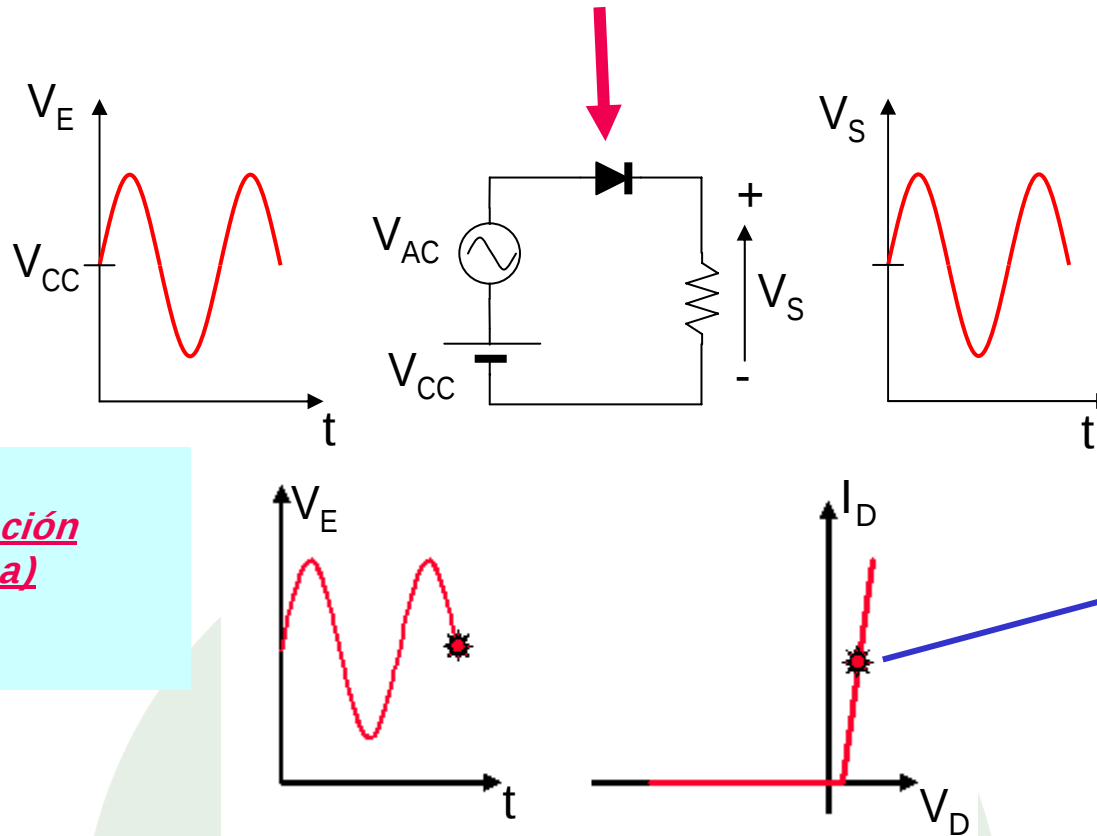
EJEMPLO TÍPICO: RECTIFICADOR





Si **POLARIZAMOS** en una zona de funcionamiento, podremos aplicar el principio de superposición y sustituir el dispositivo por un equivalente lineal.

¡¡¡ AQUÍ SI, PODEMOS CONSIDERARLO UN ELEMENTO LINEAL!!



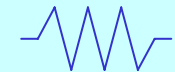
Hablaremos de:

Circuito de polarización
(Circuito de continua)

y de:

Circuito alterna

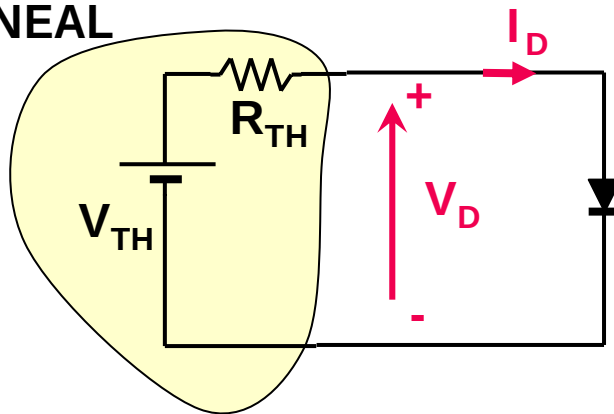
Equivalente
del diodo



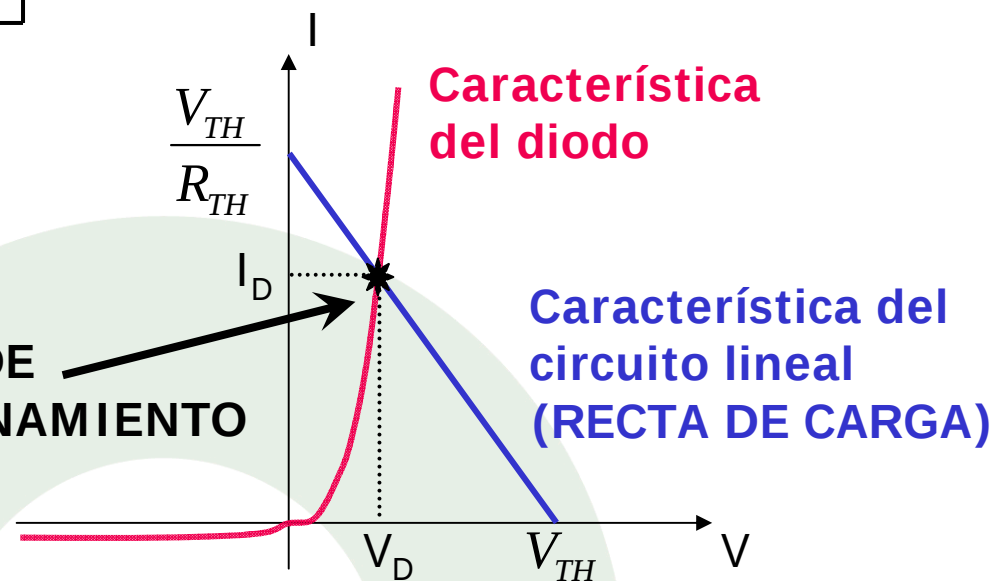


RECTA DE CARGA Y PUNTO DE FUNCIONAMIENTO

**CIRCUITO
LINEAL**



**PUNTO DE
FUNCIONAMIENTO**





Universidad
de Oviedo

DIODOS: Propuesta para el alumno

Búsqueda en la web: Con ayuda de un buscador(Google o similar), se sugiere obtener y consultar hojas de características (**Datasheet**) de diodos comerciales. Familiarizarse con los parámetros característicos de los dispositivos, tensión y corriente máximas, ...

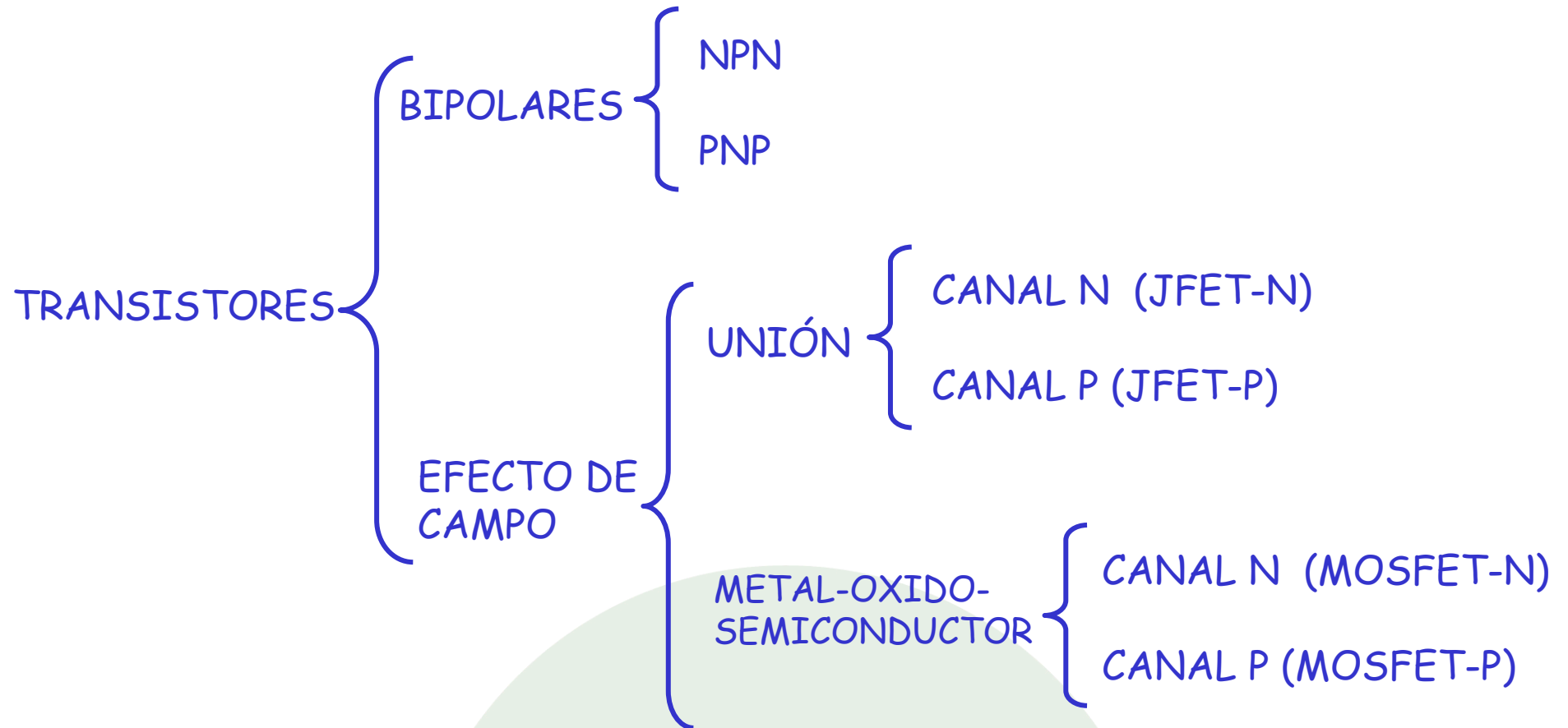
Es normal encontrar para cada referencia de componente, fabricantes distintos. Toda la información está siempre en Ingles.

A continuación se sugieren algunas referencias para la búsqueda. No obstante, con el término ingles (**diode, Zener diode, tunnel diode, etc**) aparecen muchísimas referencias, catálogos completos, guías de selección, etc.

1N4007	Diodo de Silicio
1N4148	Diodo de Silicio rápido (FAST)
OA91	Diodo de Germanio
HLMPD150	Diodo LED
BZX79C15	Diodo Zener
10MQ040N	Diodo Schottky
OK60	Panel Solar
BB152	Diodo Varicap
MG1007-15	Diodo GUNN
AI201K	Diodo Tunel
BPW21R	Fotodiodo



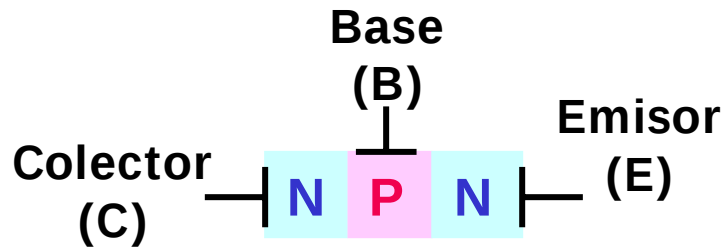
TRANSISTORES (Panorámica)



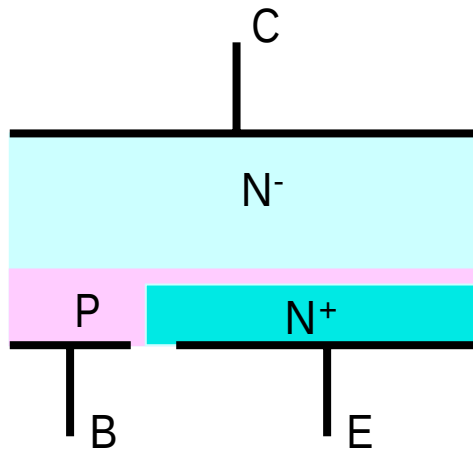
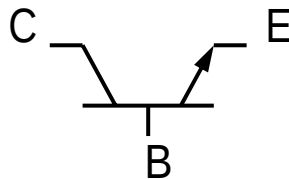
* FET : Field Effect Transistor



TRANSISTOR BIPOLAR NPN (NPN bipolar transistor)



SÍMBOLO



ASPECTO MAS REAL DE UN
TRANSISTOR BIPOLAR

En principio un transistor bipolar está formado por dos uniones PN.

Para que sea un transistor y no dos diodos deben de cumplirse dos condiciones.

1.- La zona de Base debe ser muy estrecha y poco dopada (Fundamental para que sea transistor).

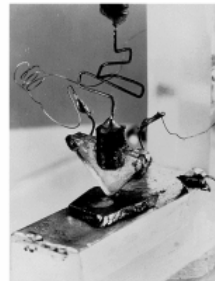
2.- El emisor debe de estar muy dopado.

Normalmente, el colector está muy poco dopado y es mucho mayor.

!!! IMPORTANTE !!!
No es un dispositivo simétrico

First Transistor, Bell Lab, 1947

Photo courtesy:
AT&T Archive



Hong Xiao, Ph. D.

www2.usf.in.cc/tx.us/HongXiao/Book.htm

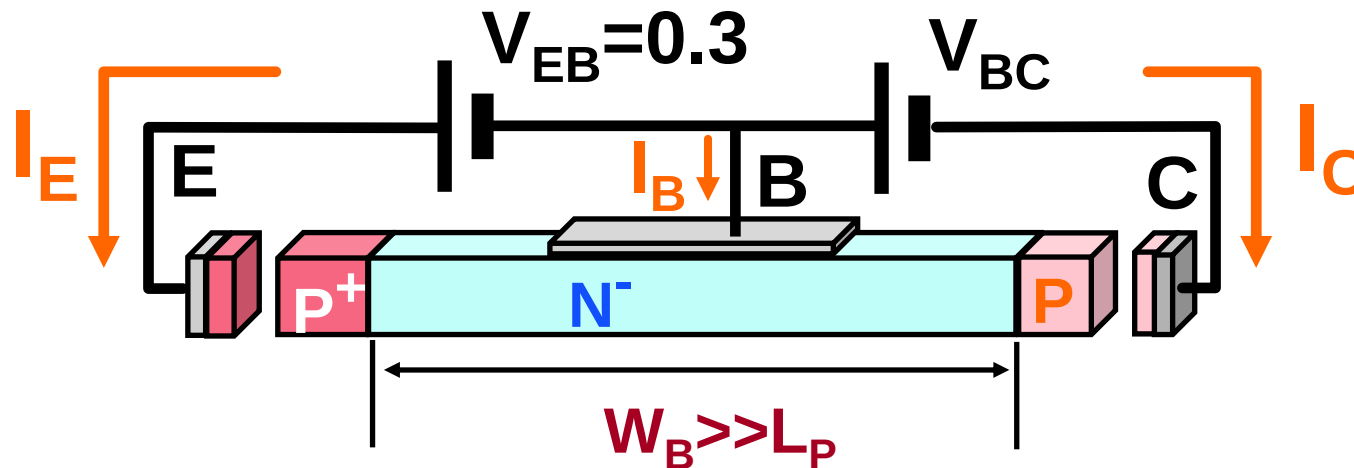
6



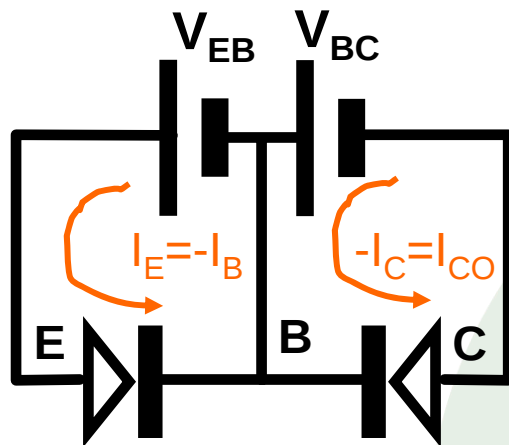
Descubiertos por
Shockley, Brattain
y Barden en 1947
(Laboratorios Bell)



Transistor “mal hecho” (con base ancha)



Circuito equivalente con Base ancha.

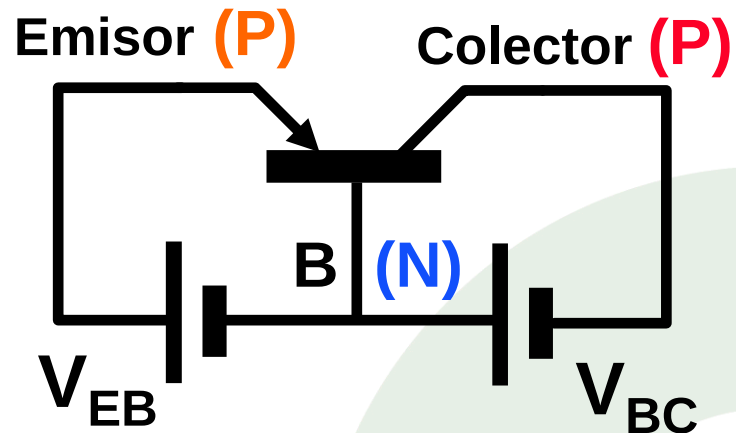
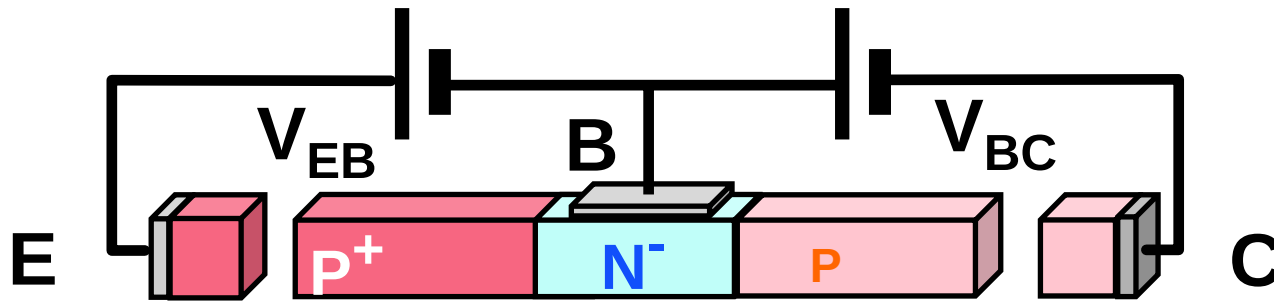


Los portadores de la zona de E (huecos) no alcanzan el colector ya que se recombinan en la zona de base

L_p : Longitud de difusión es la distancia media recorrida por un portador antes de recombinarse



Transistor “bien hecho” (con base ancha)



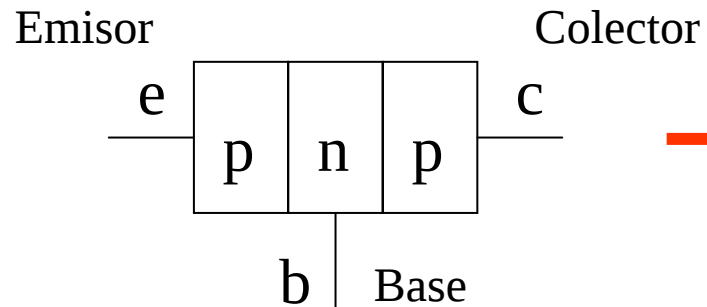
Reducimos el ancho de la base:

$$W_B \ll L_P$$

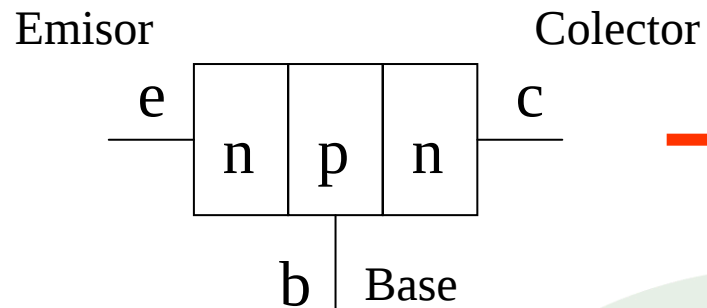
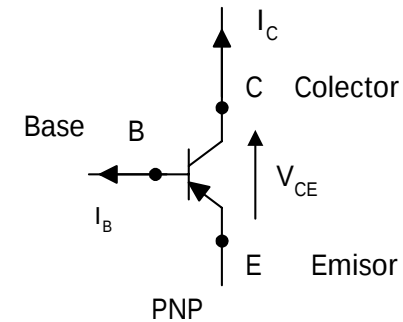
Los portadores procedentes del emisor se ven atraídos por el campo eléctrico y llegan al colector. Solo una pequeña parte se recombina en la zona de base.



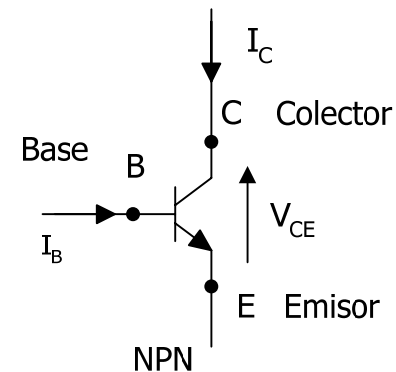
Tipos de Transistores



Transistor PNP



Transistor NPN



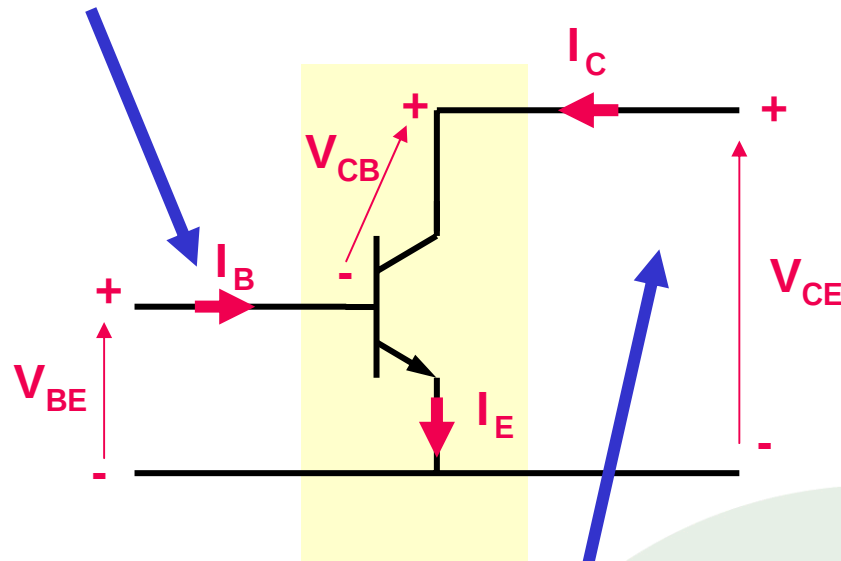
Polarizamos las uniones:

- Emisor-Base, directamente
- Base-Colector, inversamente



CARACTERÍSTICAS DE UN TRANSISTOR NPN

$I_B = f(V_{BE}, V_{CE})$ Característica de entrada



$I_C = f(V_{CE}, I_B)$ Característica de salida

En principio necesitamos conocer 3 tensiones y 3 corrientes:

$$I_C, I_B, I_E$$

$$V_{CE}, V_{BE}, V_{CB}$$

En la práctica basta con conocer solo 2 corrientes y dos tensiones.

Normalmente se trabaja con I_C , I_B , V_{CE} y V_{BE} .

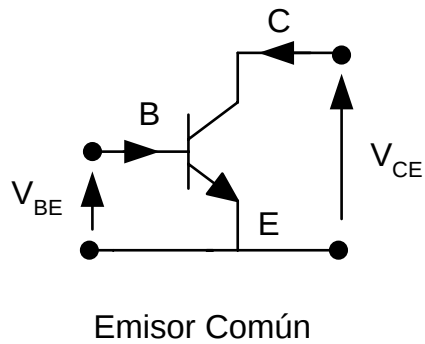
Por supuesto las otras dos pueden obtenerse fácilmente:

$$I_E = I_C + I_B$$

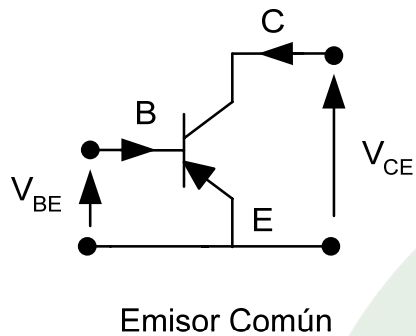
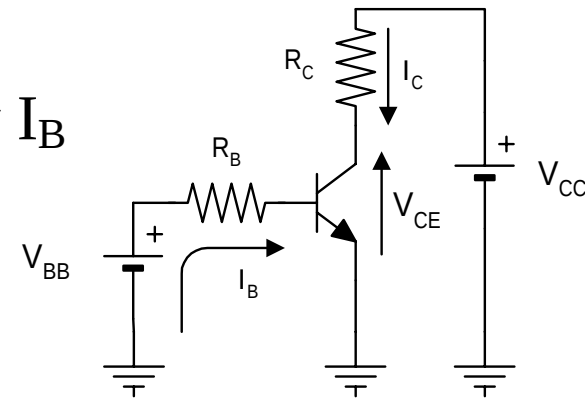
$$V_{CB} = V_{CE} - V_{BE}$$



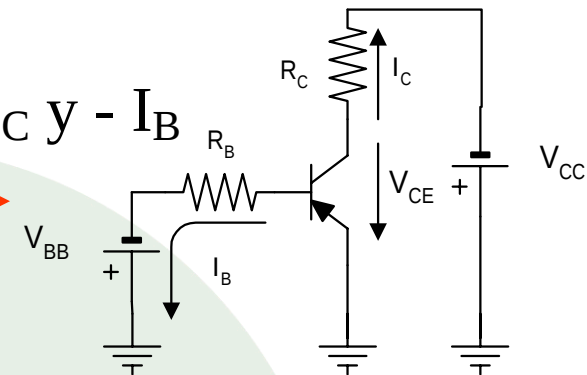
Configuración en Emisor Común



V_{BE} , V_{CE} , I_C y I_B



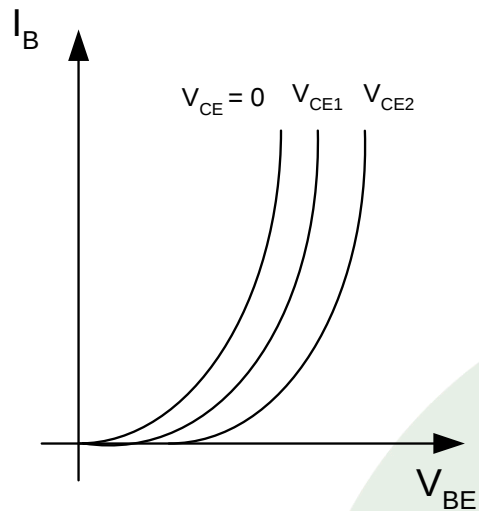
$-V_{BE}$, $-V_{CE}$, $-I_C$ y $-I_B$



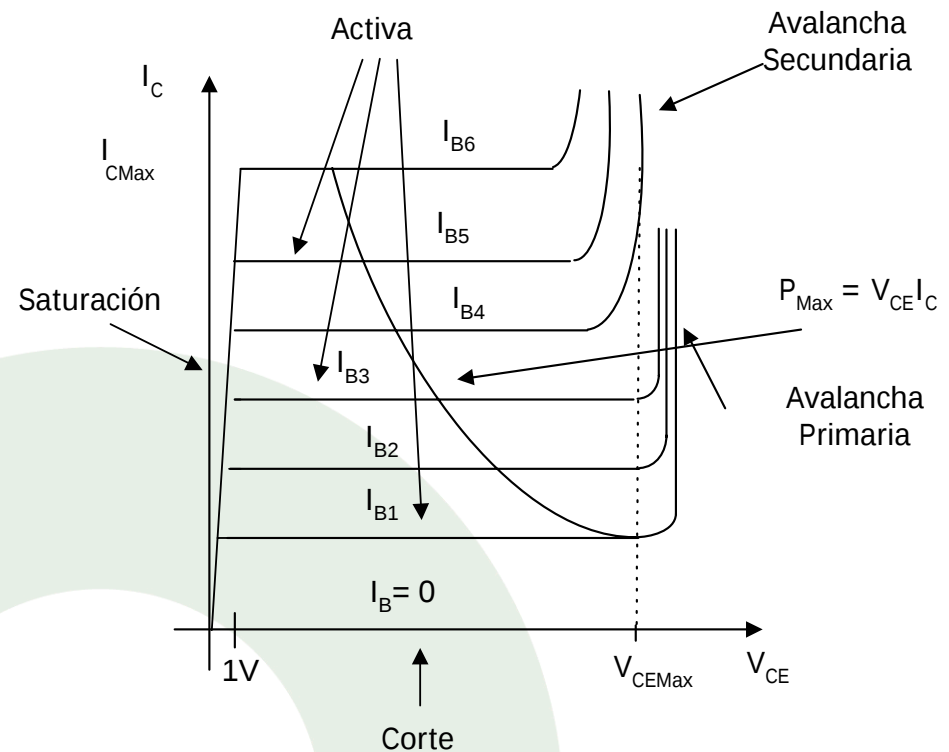


Configuración en Emisor Común

$I_B = f(V_{BE}, V_{CE})$
Característica de entrada



$I_C = f(V_{CE}, I_B)$
Característica de salida





Factor de amplificación de corriente “ α ”

Partimos de :

$$-I_C \approx \alpha \cdot I_E \text{ y } I_E = -I_B - I_C$$

Eliminando I_E queda:

$$I_C \approx I_B \cdot \alpha / (1 - \alpha)$$

Definimos β :

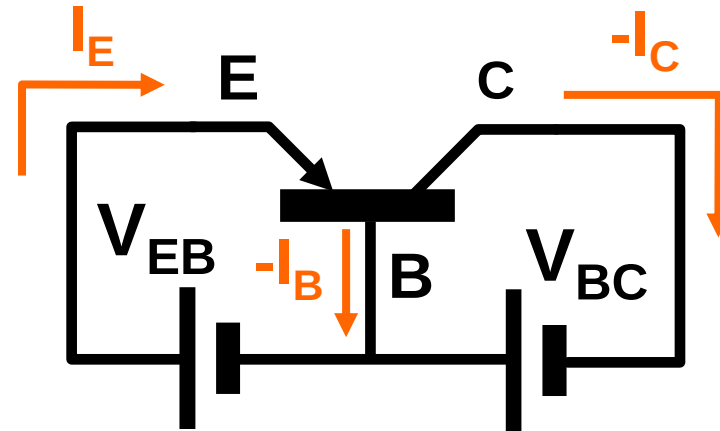
$$\beta = \alpha / (1 - \alpha)$$

Luego:

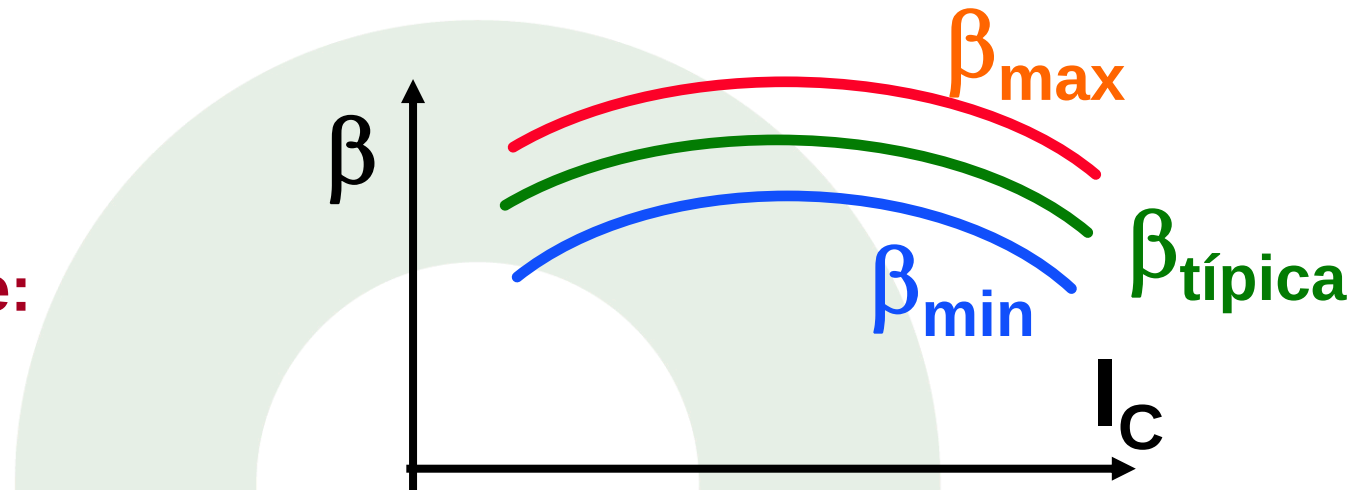
$$I_C \approx \beta \cdot I_B$$

Típicamente:

$$\beta = 50-200$$



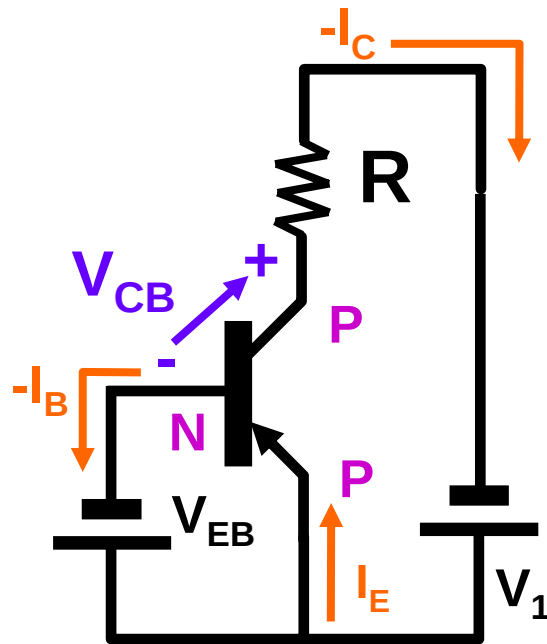
Los fabricantes usan el término h_{FE} en vez de β .





Resumen

Zona Activa

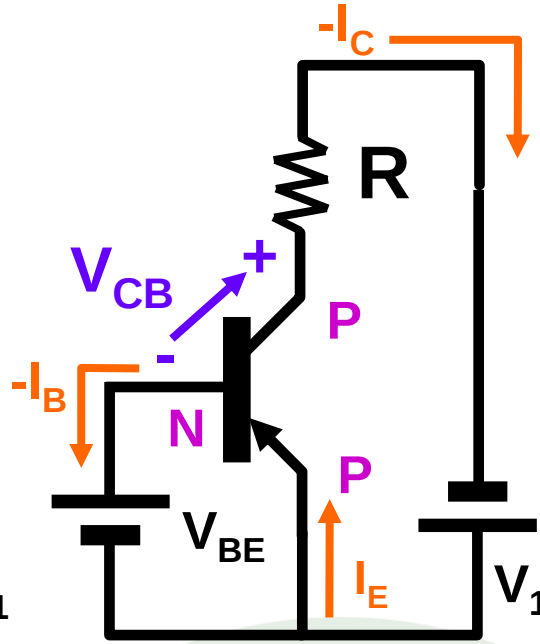


$$V_{CB} < 0$$

$$-I_C \approx \alpha \cdot I_E \text{ y } -I_B \approx (1-\alpha) \cdot I_E$$

$$-I_C \approx -\beta \cdot I_B \text{ y } I_E \approx -(1+\beta) \cdot I_B$$

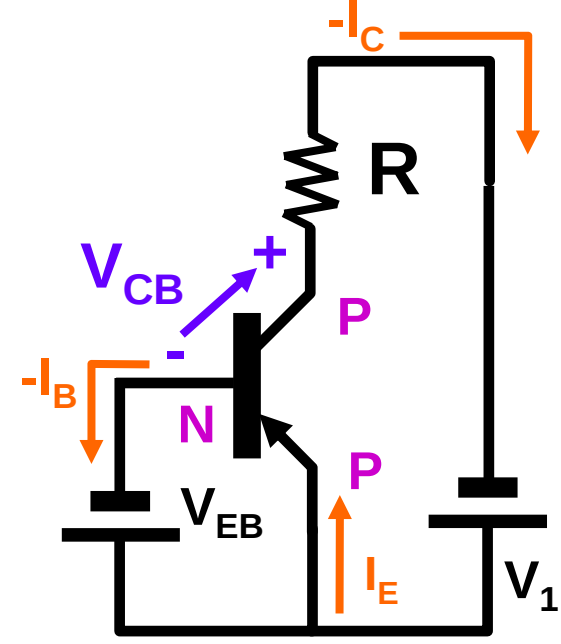
Zona de Corte



$$I_C \approx 0, I_E \approx 0$$

$$\text{y } I_B \approx 0$$

Zona de Saturación



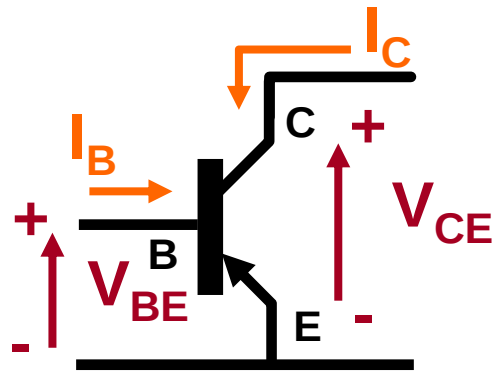
$$V_{CB} > 0 \text{ (} V_{CE} \approx 0 \text{)}$$

$$-I_C \approx V_1/R$$



Zonas de trabajo

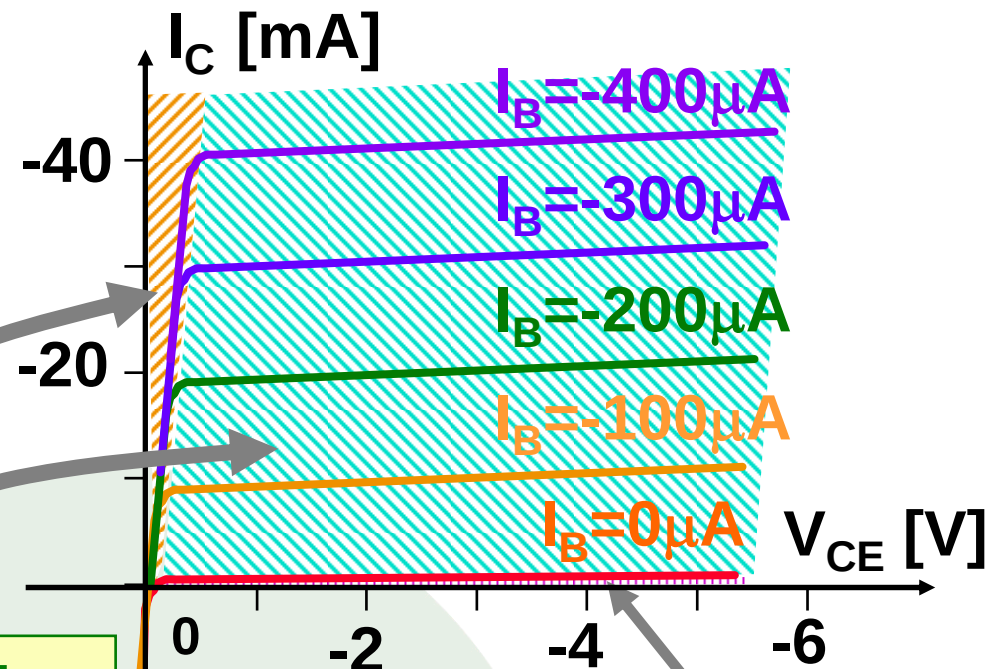
Referencias normalizadas



Saturación

Zona Activa

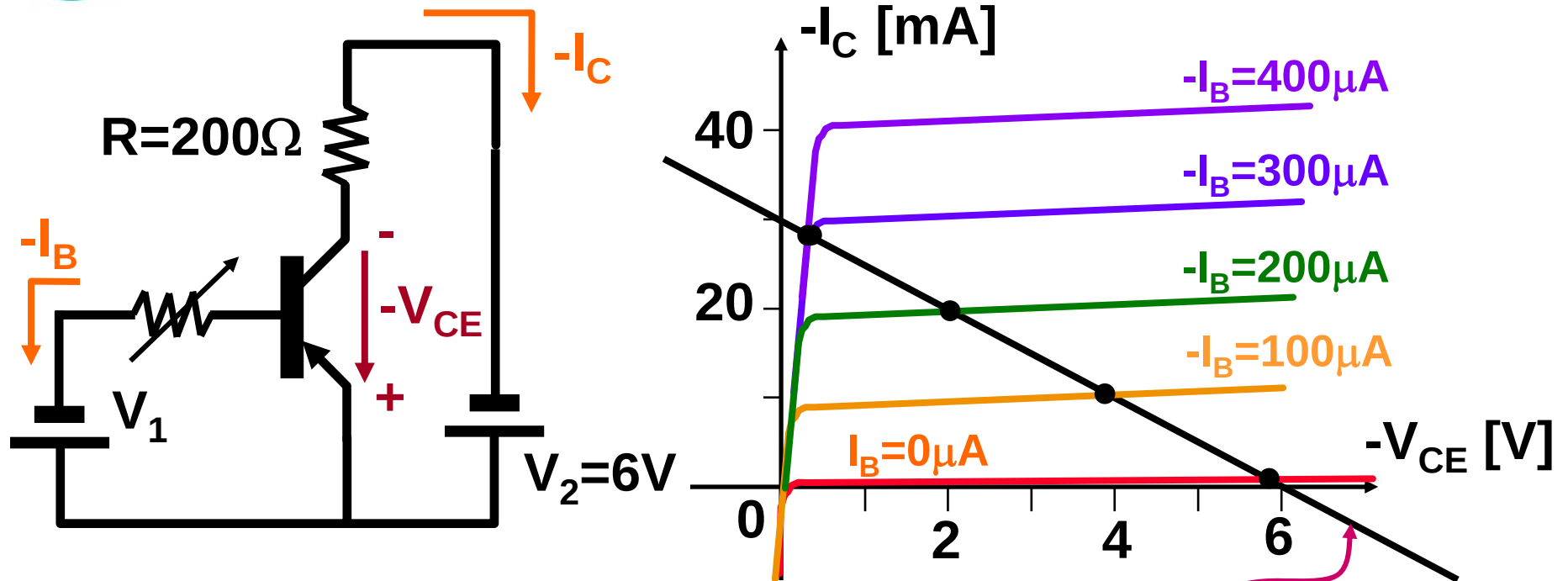
Curvas de salida



Corte



Análisis gráfico en emisor común



$-I_B = 0 \Rightarrow -I_C \approx 0 \Rightarrow -V_{CE} \approx 6V \Rightarrow$ **Corte**

Recta de carga

$-I_B = 100\mu A \Rightarrow -I_C \approx 10mA \Rightarrow -V_{CE} \approx 4V \Rightarrow$ **Zona activa**

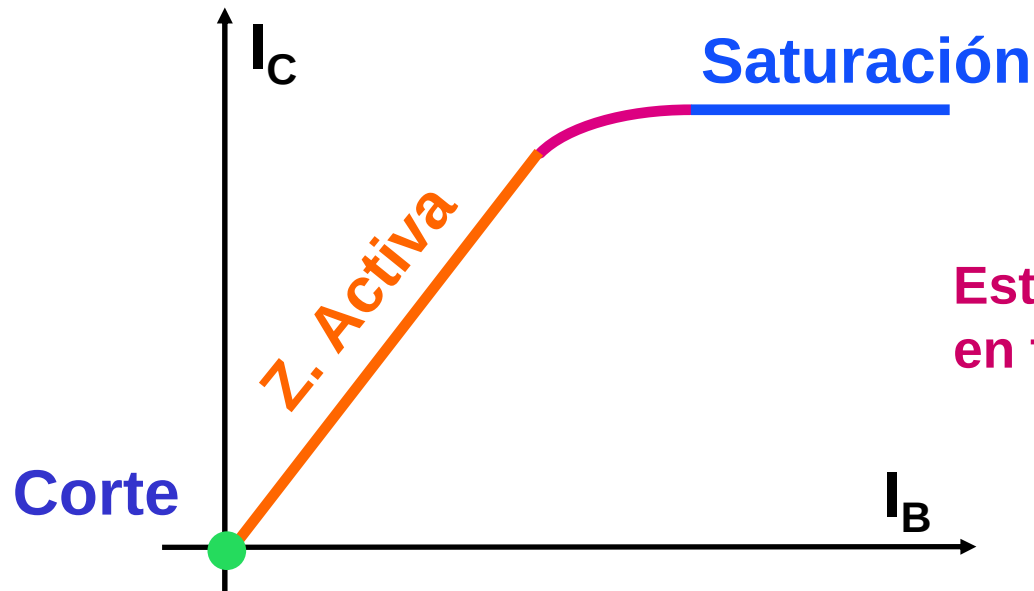
$-I_B = 200\mu A \Rightarrow -I_C \approx 20mA \Rightarrow -V_{CE} \approx 2V \Rightarrow$ **Zona activa**

$-I_B = 300\mu A \Rightarrow -I_C \approx 30mA \Rightarrow -V_{CE} \approx 0,4V \Rightarrow$ **Saturación**

$-I_B = 400\mu A \Rightarrow -I_C \approx 30mA \Rightarrow -V_{CE} \approx 0,4V \Rightarrow$ **Saturación**



Análisis gráfico en emisor común



Esta representación justifica
en término “saturación”.

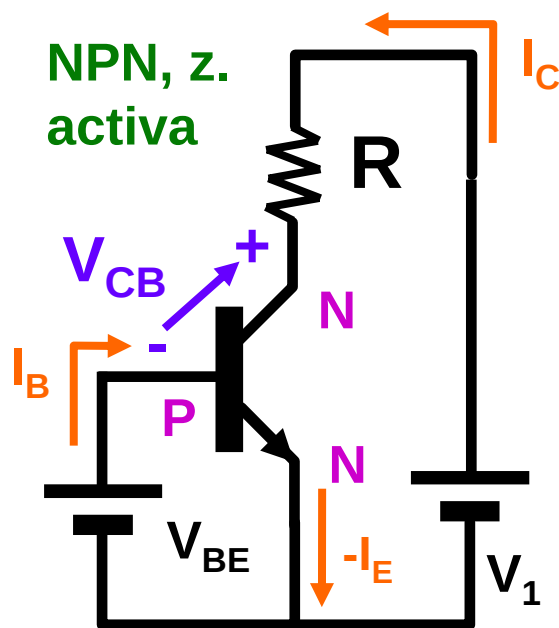
Determinación del estado en zona
activa o en saturación en circuitos

Zona Activa: $I_C \approx I_B \cdot \beta_F$

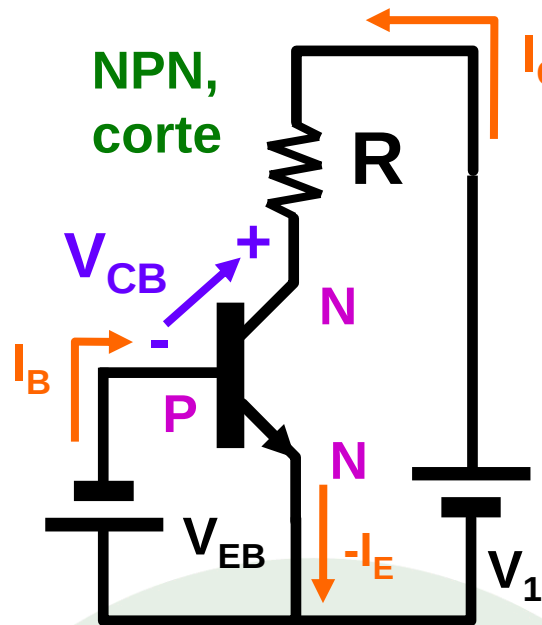
Saturación: $I_C < I_B \cdot \beta_F$



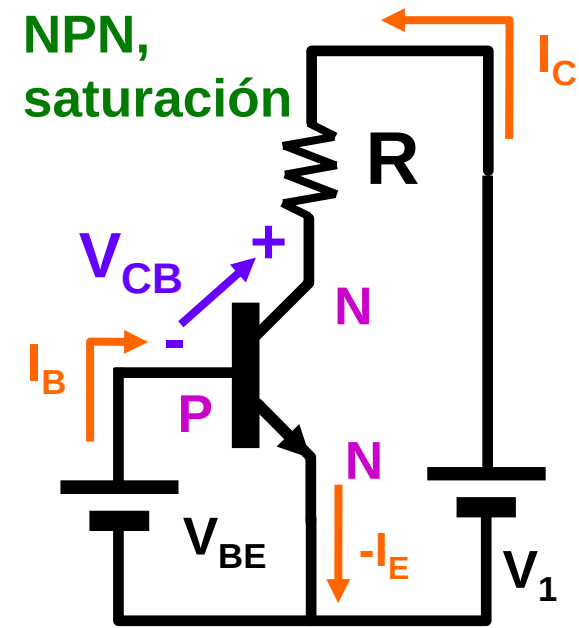
Resumen con transistores NPN



$$\begin{aligned} V_{CB} &> 0 \\ I_C &\approx \alpha \cdot (-I_E) \\ I_C &\approx \beta \cdot I_B \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} I_C &\approx 0, \quad I_E \approx 0 \\ \text{y} \quad I_B &\approx 0 \end{aligned}$$



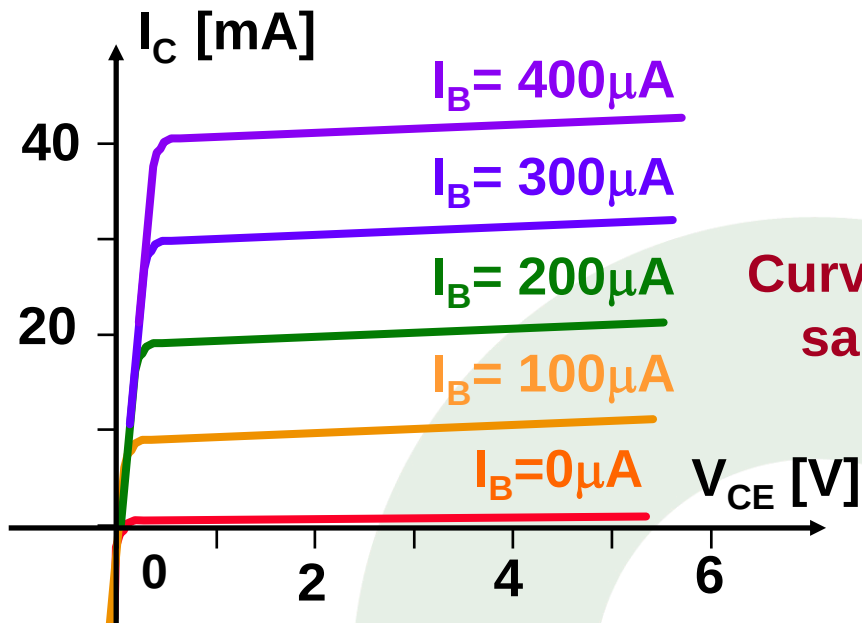
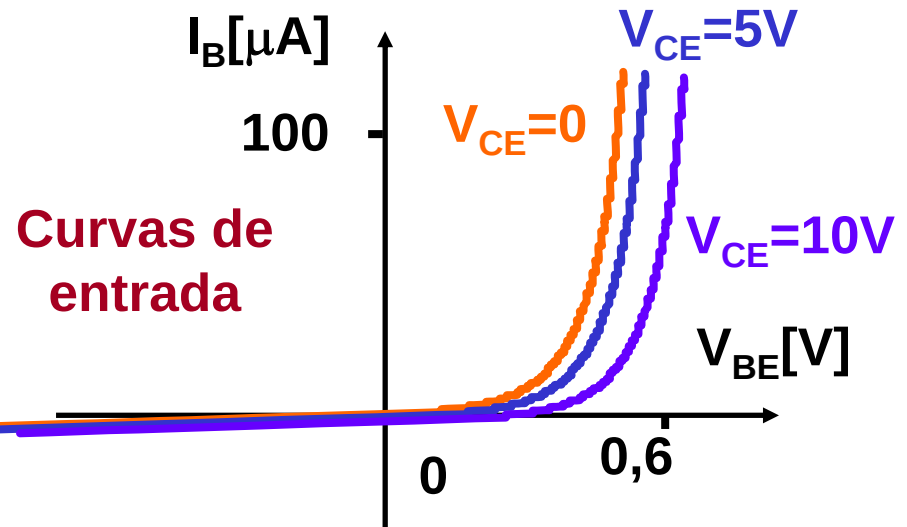
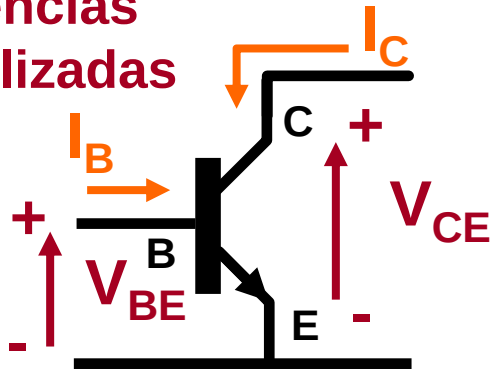
$$\begin{aligned} V_{CB} &< 0 \quad (V_{CE} \approx 0) \\ I_C &\approx V_1/R \end{aligned}$$



Universidad
de Oviedo

Curvas características en emisor común en un transistor NPN

Referencias
normalizadas



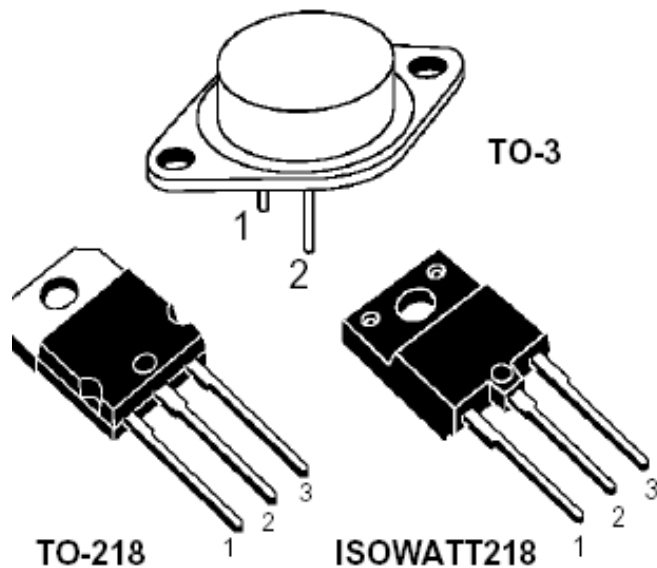
Todas las magnitudes importantes son positivas



Universidad
de Oviedo

Algunos transistores y fabricantes más comunes.

HIGH VOLTAGE FAST-SWITCHING
NPN POWER TRANSISTORS



$$V_{CE} = 1500$$

$$I_C = 8$$

$$H_{FE} = 20$$

ON Semiconductor™

**High-Voltage - High Power
Transistors**

16 AMPERE
POWER TRANSISTORS
COMPLEMENTARY
SILICON
140 VOLTS
200 WATTS

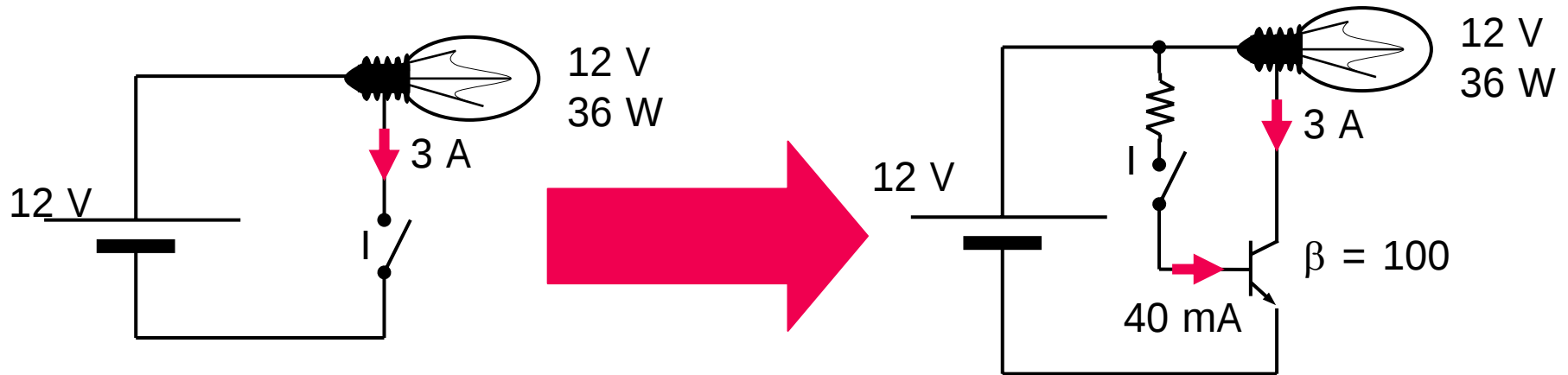
**NPN
2N5631
PNP
2N6031**



TOSHIBA



USOS DEL TRANSISTOR NPN: Como interruptor



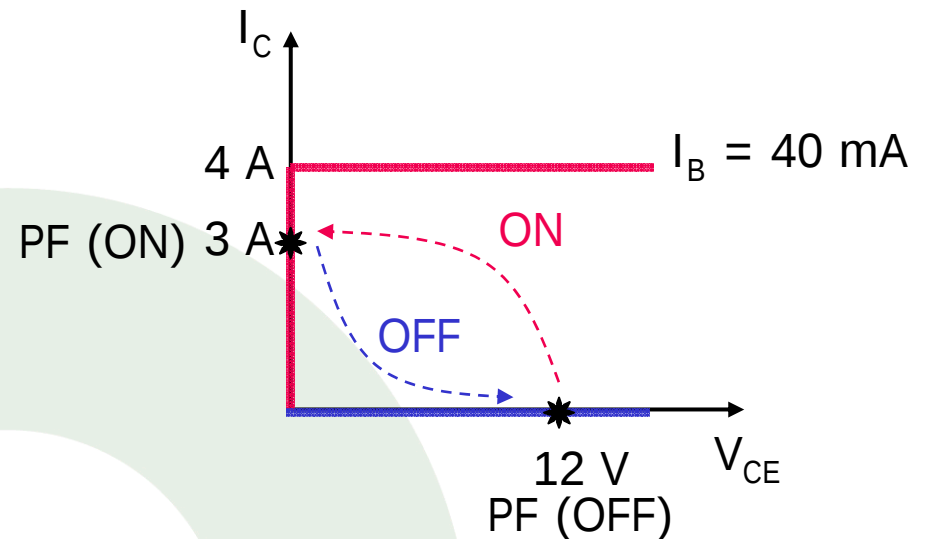
Sustituimos el interruptor principal por un transistor.

La corriente de base debe ser suficiente para asegurar la zona de saturación.

Ventajas:

No desgaste, sin chispas, rapidez, permite control desde sistema lógico.

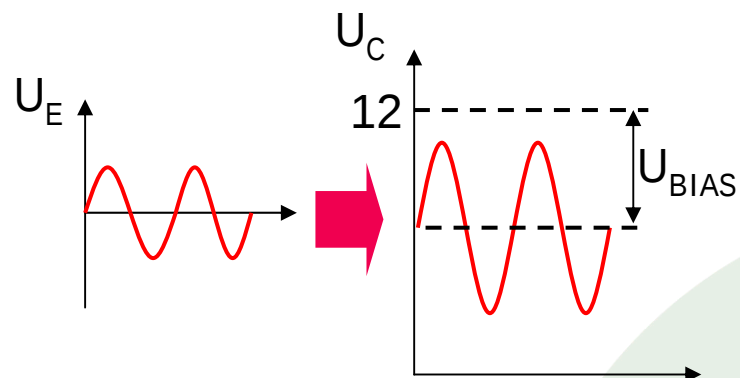
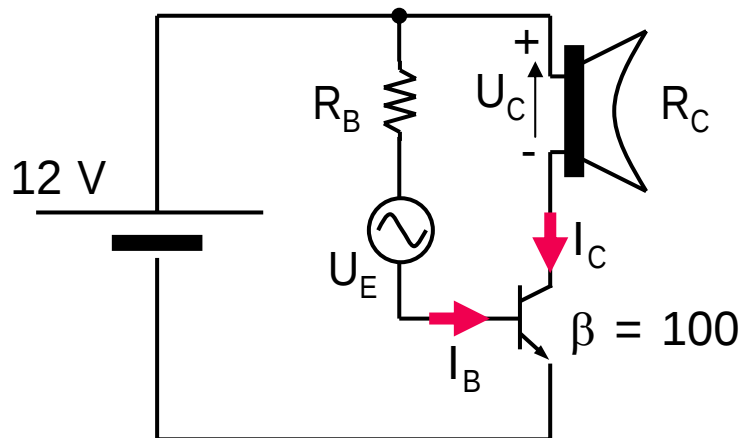
Electrónica de Potencia y Electrónica digital





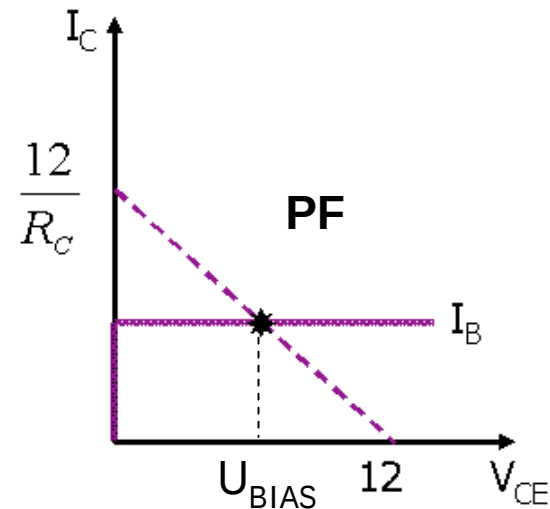
Universidad
de Oviedo

USOS DEL TRANSISTOR NPN: Como fuente de corriente (amplificador)



Podremos aplicar el principio de superposición y linealizar el transistor entorno a su punto de funcionamiento.

Hablaremos de circuito de continua (polarización) y de circuito de alterna.



**ELECTRÓNICA
ANALÓGICA**

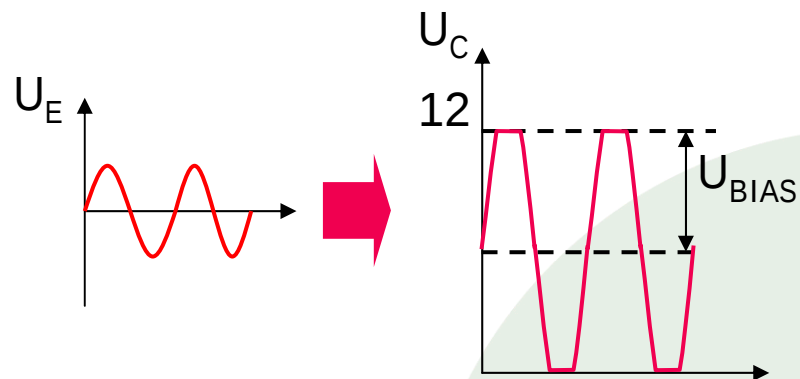
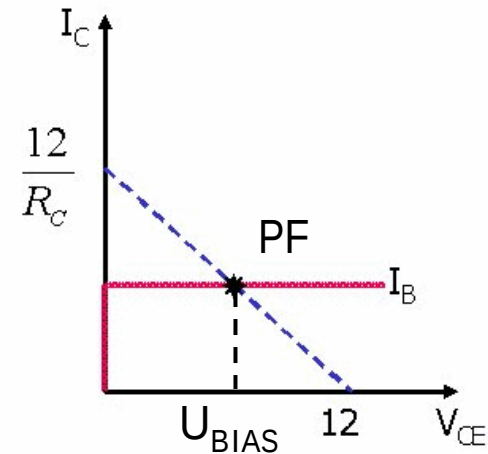
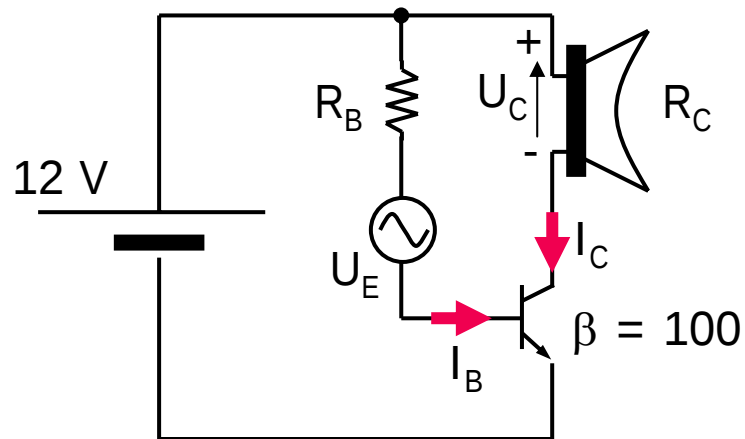
En R_C (p.e. altavoz) obtenemos una copia de U_E (p.e. música).

Notar la presencia de un indeseable nivel de continua.

Necesitamos polarizar el transistor para que siempre se comporte como una fuente de corriente dependiente: $I_C = f(I_B)$



USOS DEL TRANSISTOR NPN: Saturación como amplificador



El transistor se sale de la zona de fuente de corriente. Las tensiones del circuito no pueden sobrepasar las de alimentación.

Decimos que el amplificador se satura (y distorsiona).



Universidad
de Oviedo

TRANSISTORES: Propuesta para el alumno

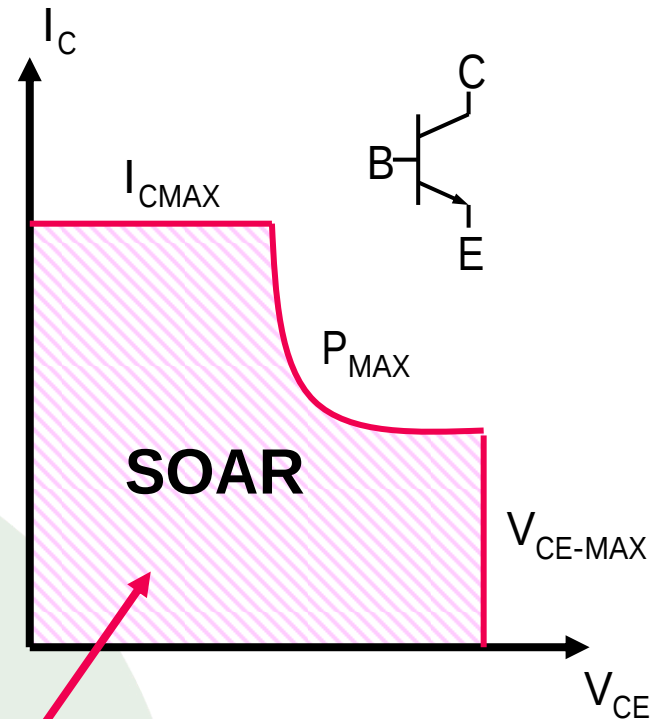
Búsqueda en la web: Con ayuda de un buscador(Google o similar), se sugiere obtener y consultar hojas de características (**Datasheet**) de transistores comerciales. Familiarizarse con los parámetros característicos de los dispositivos, tensión y corriente máximas, ...

Reproducir los circuitos previos (transistor como interruptor y fuente de corriente) para un transistor PNP

Identificar los sentidos reales de la corriente

¿Que transistor es más rápido NPN o PNP?, ¿por qué?

I_{C-MAX}	Corriente máxima de colector
V_{CE-MAX}	Tensión máxima CE
P_{MAX}	Potencia máxima
V_{CE-SAT}	Tensión C.E. de saturación
$H_{FE} \cong \beta$	Ganancia



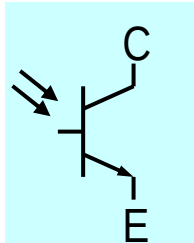
Área de operación segura
(Safety Operation Area)



Universidad
de Oviedo

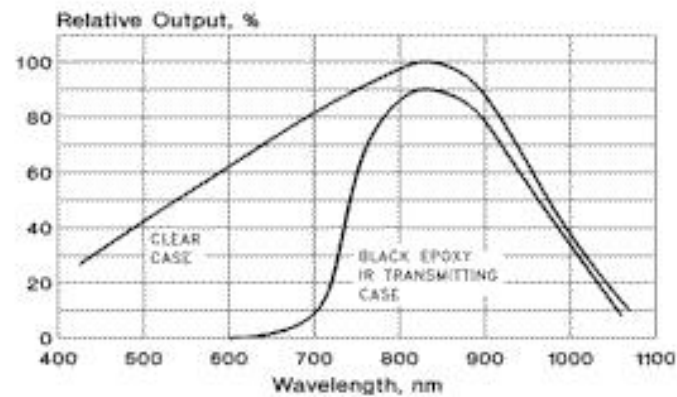
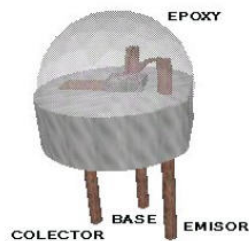
FOTOTRANSISTOR (Phototransistor)

La luz (fotones de una cierta longitud de onda) al incidir en la zona de base desempeñan el papel de corriente de base



El terminal de Base, puede estar presente o no.

No confundir con un fotodiodo.



Relative Spectral Response
(Referred to Peak Response of Clear Case)

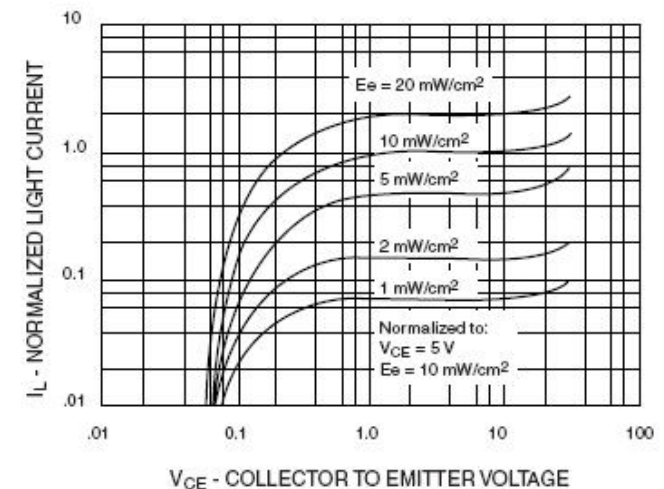
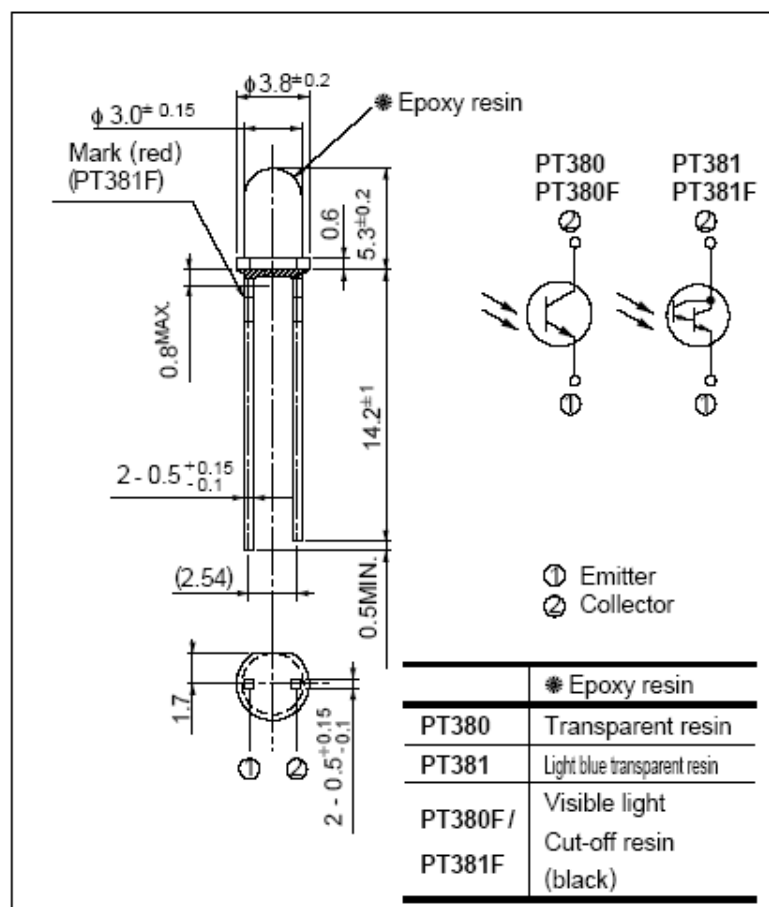
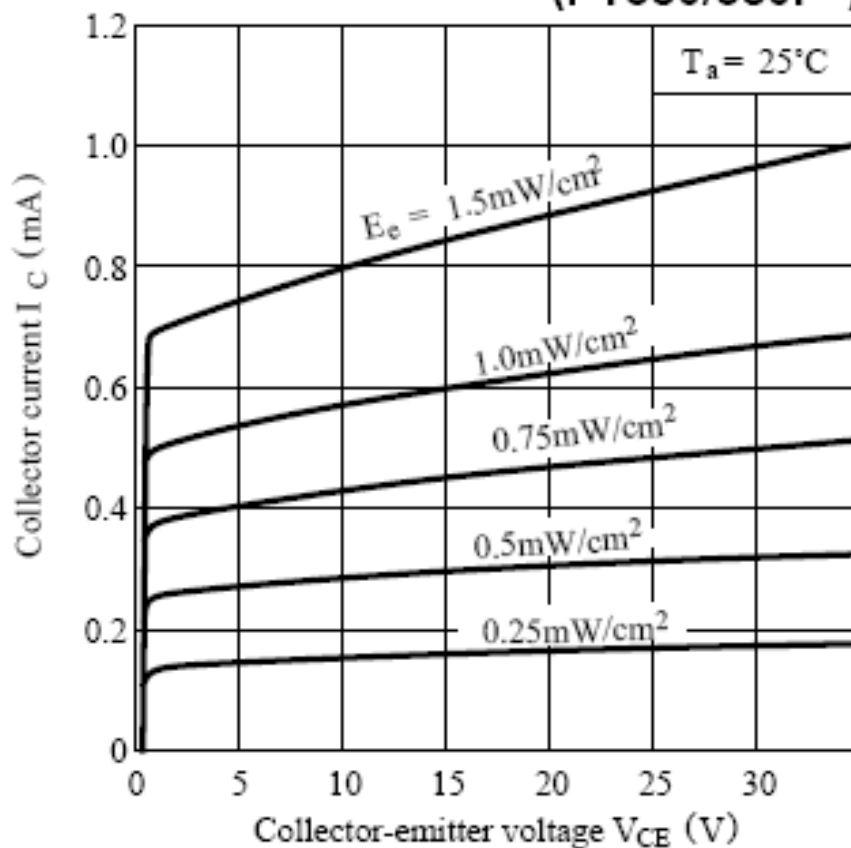


Fig. 1 Light Current vs. Collector to Emitter Voltage

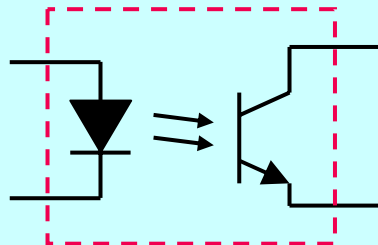


**Fig. 5-a Collector Current vs.
Collector-emitter Voltage
(PT380/380F)**





OPTOACOPLADOR

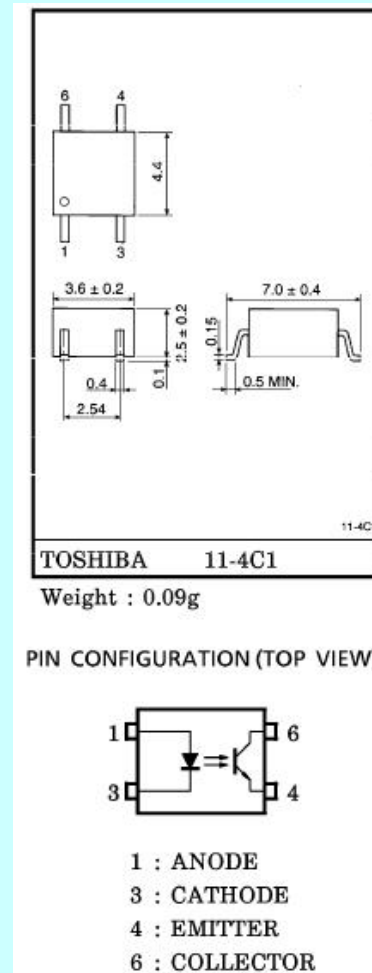


Conjunto fotodiodo + fototransistor

OBJETIVO:

Proporcionar aislamiento
galvánico y protección eléctrica.

Detección de obstáculos.



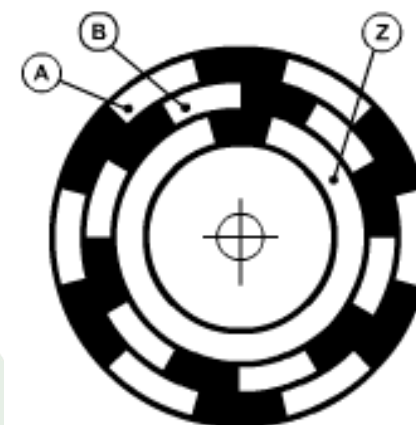
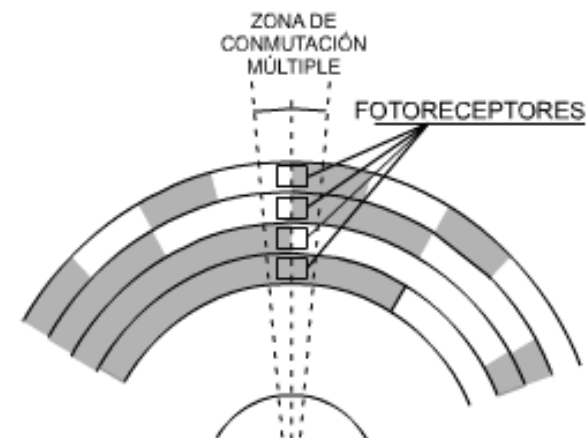
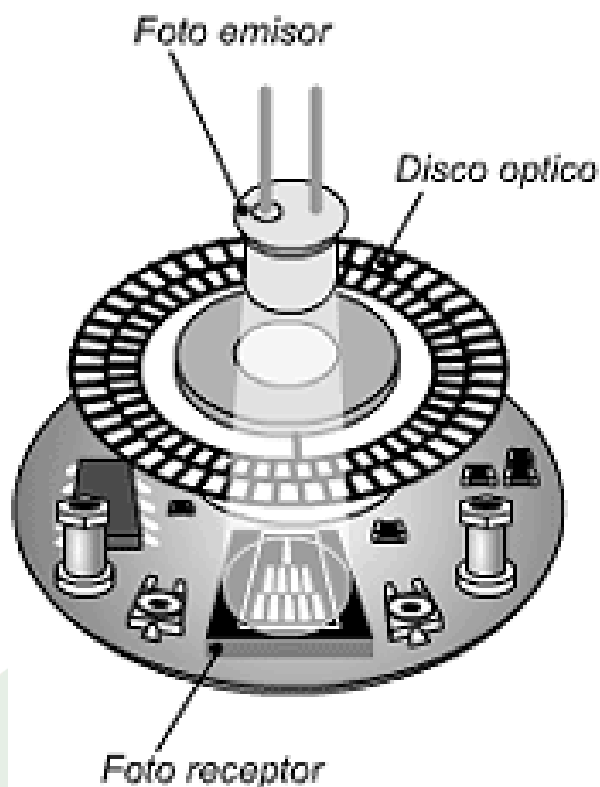


Universidad
de Oviedo

APLICACIÓN TÍPICA DE LOS OPTOACOPLADORES: "Encoder" óptico para medida de velocidad y posicionado



DECIMAL	BINARIO	GRAY
0	0000	0000
1	0001	0001
2	0010	0011
3	0011	0010
4	0100	0110
5	0101	0111
6	0110	0101
7	0111	0100
8	1000	1100
9	1001	1101
10	1010	1111
11	1011	1110
12	1100	1010
13	1101	1011
14	1110	1001
15	1111	1000

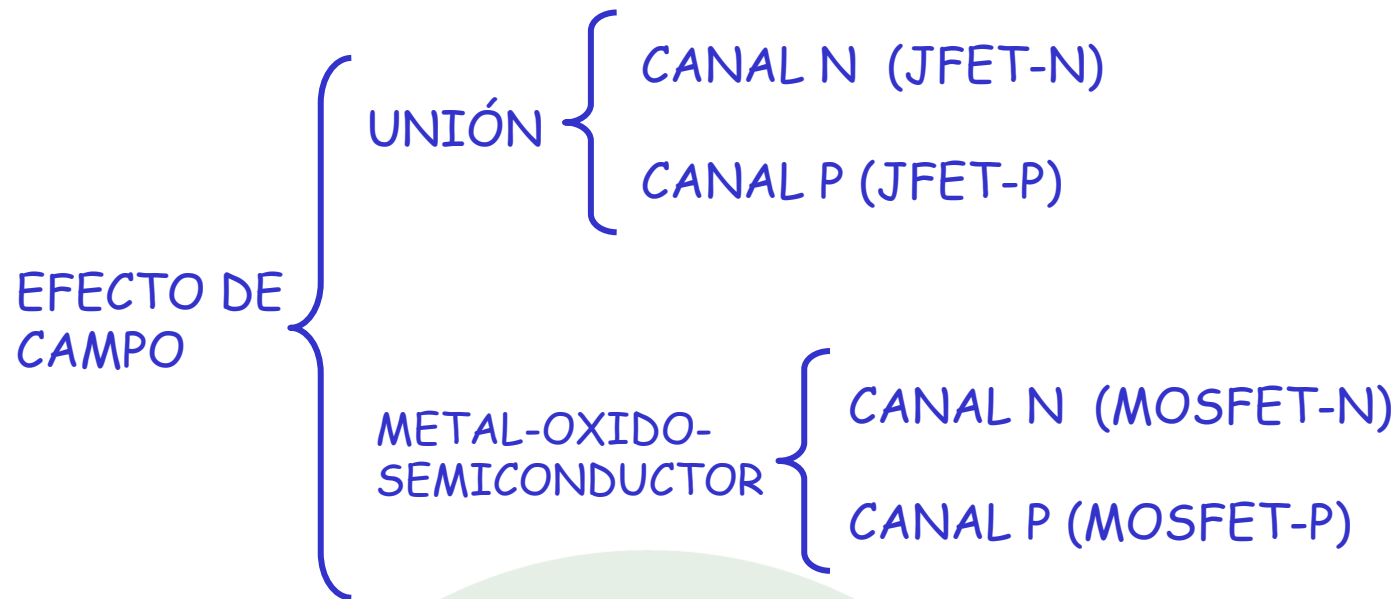


Representación de las señales
incrementales A, B y Z endisco óptico.



Universidad
de Oviedo

TRANSISTORES DE EFECTO DE CAMPO (FET - Field Effect Transistor)



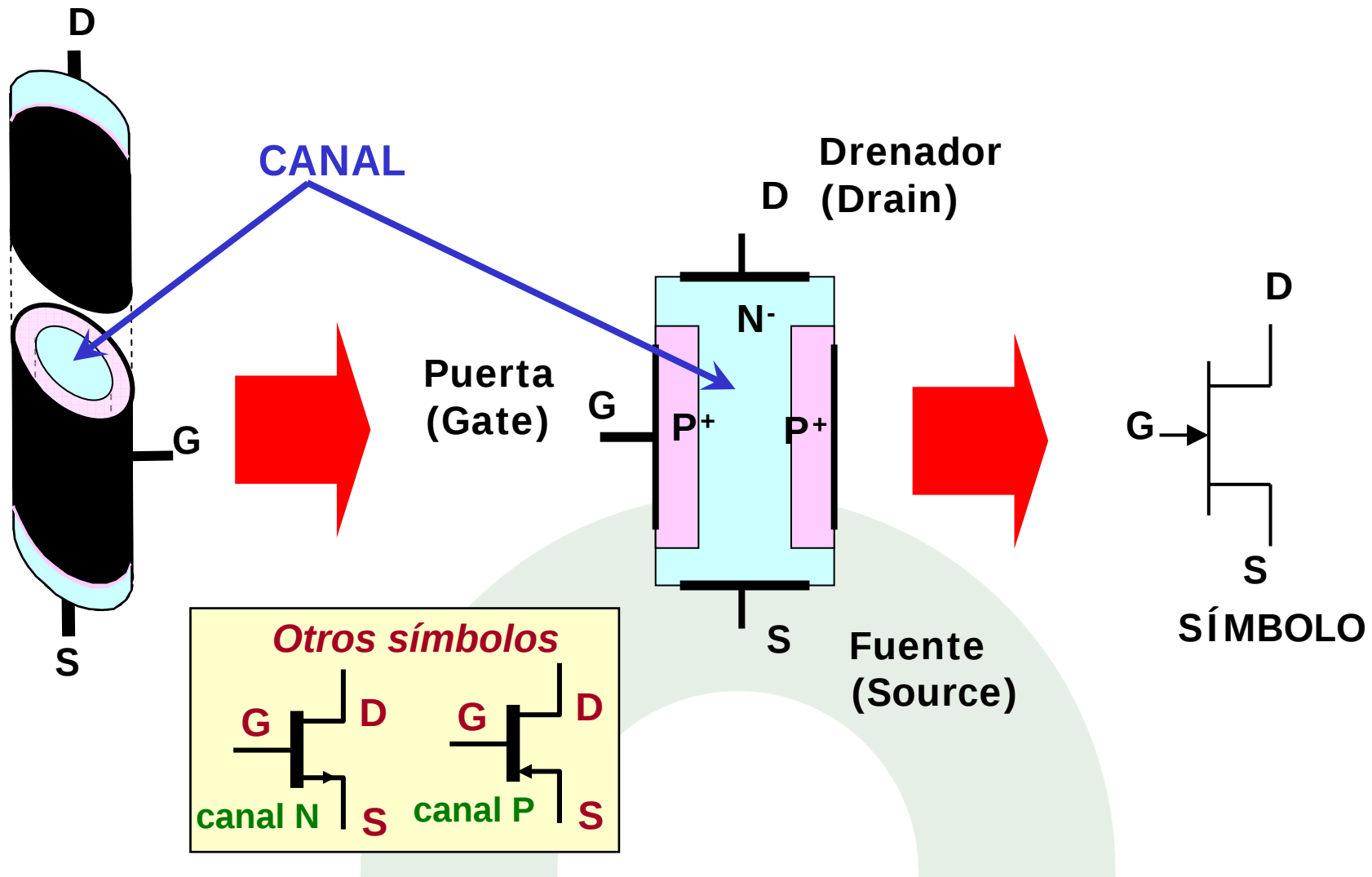
Dr Julius Lilienfield (Alemania) en 1926 patentó el concepto de "*Field Effect Transistor*".
20 años antes que en los laboratorio Bell fabricaran el primer transistor bipolar.



Universidad
de Oviedo

JFET de canal N (JFET - Junction Field Effect Transistor)

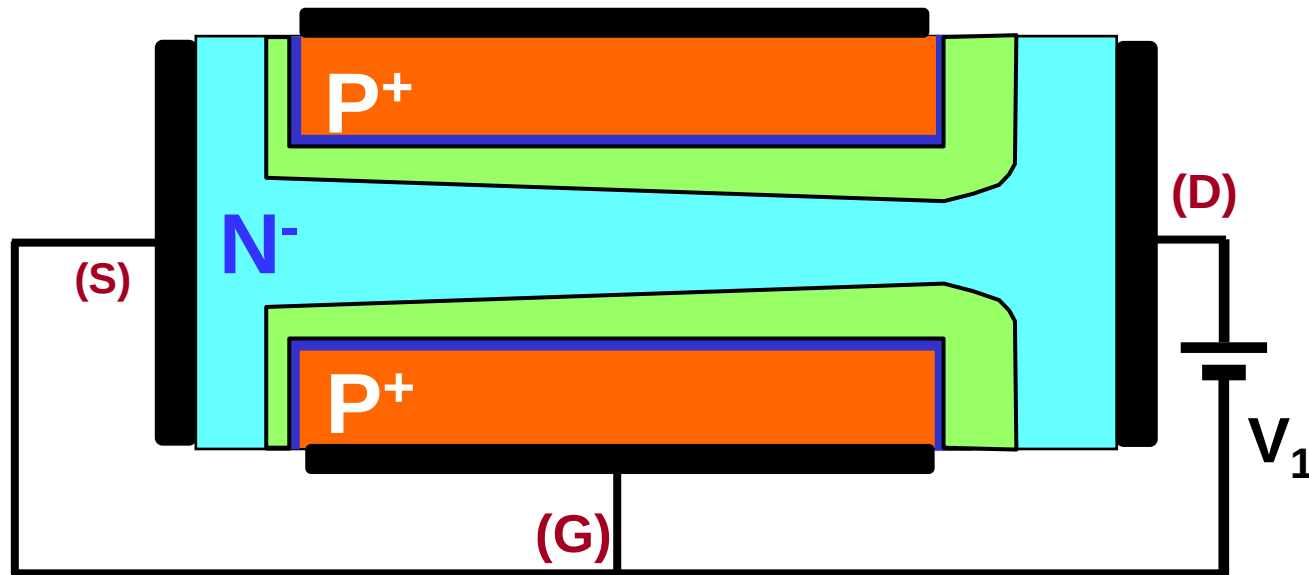
Notar que es un dispositivo simétrico (D y S son intercambiables)





Universidad
de Oviedo

Principio de funcionamiento de los transistores de efecto de campo de unión, JFET

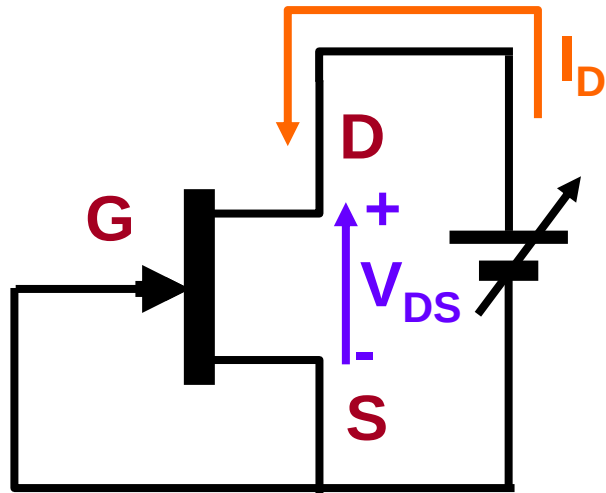


Según aumenta la tensión drenador-fuente, aumenta la resistencia del canal, ya que aumenta la zona de transición, que es una zona de pocos portadores

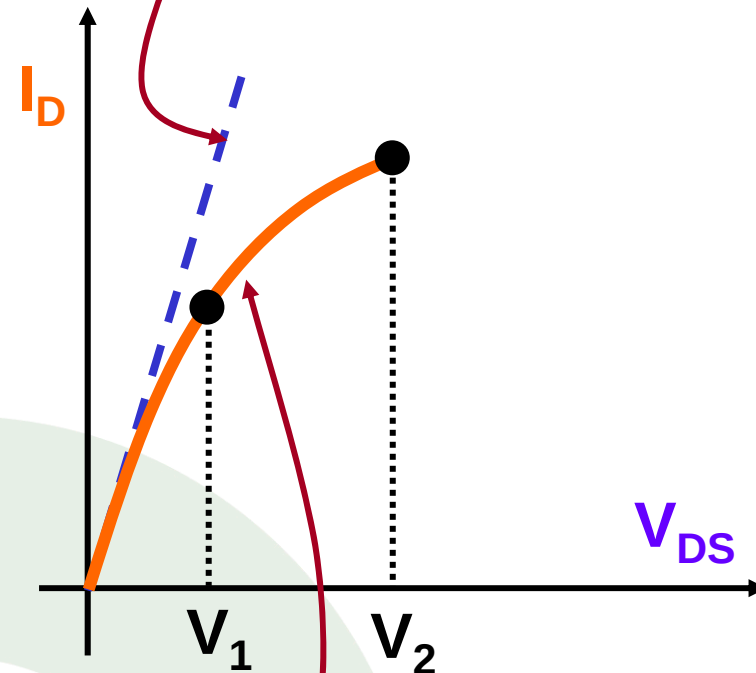


Universidad
de Oviedo

Principio de funcionamiento de los transistores de efecto de campo de unión, JFET



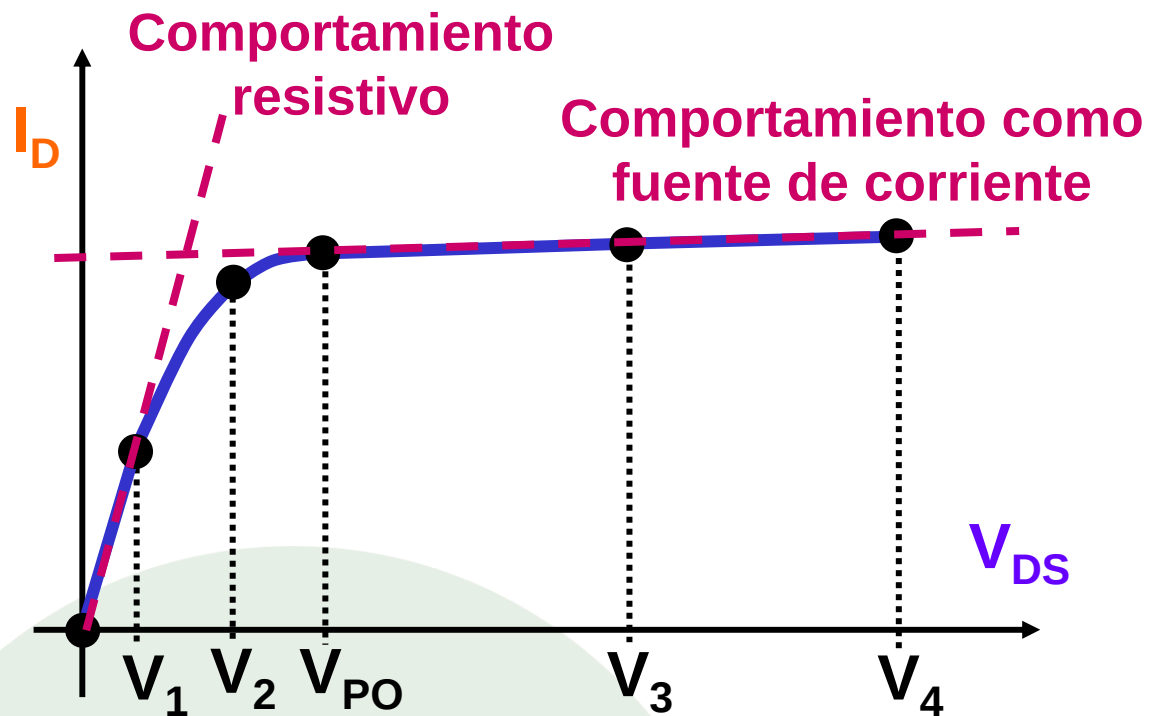
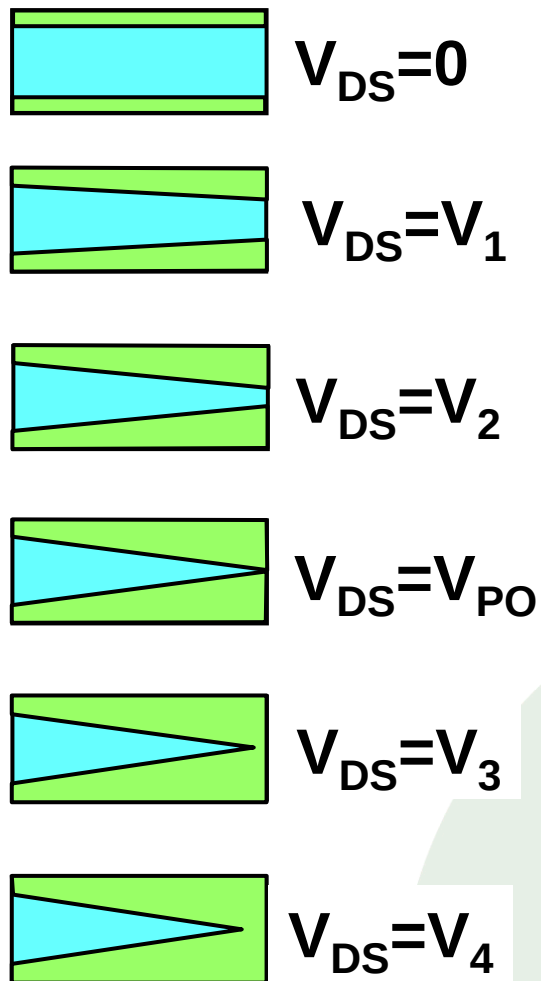
**Evolución si la resistencia
no cambiara con la tensión.**



**Evolución real en un JFET
(la resistencia cambia con
la tensión aplicada).**



Resumen del principio de funcionamiento
de los JFET cuando $V_{GS} = 0$

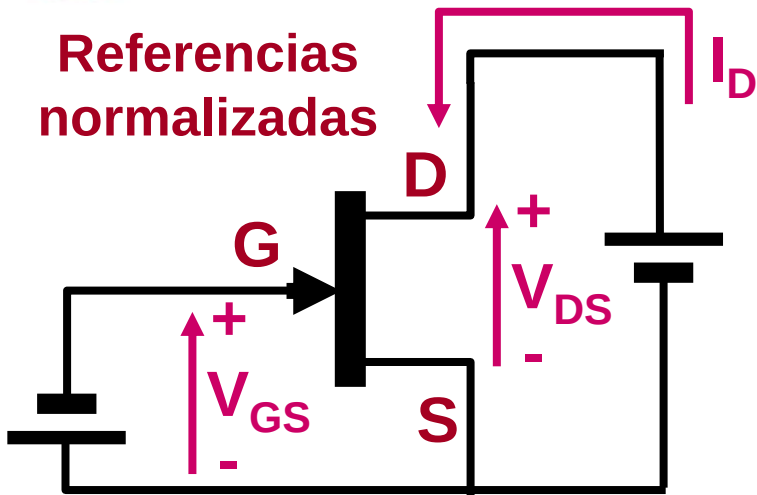


**EL CANAL SE VA ESTRANGULANDO
(DISMINUYENDO SECCIÓN) HASTA
DESAPARECER**

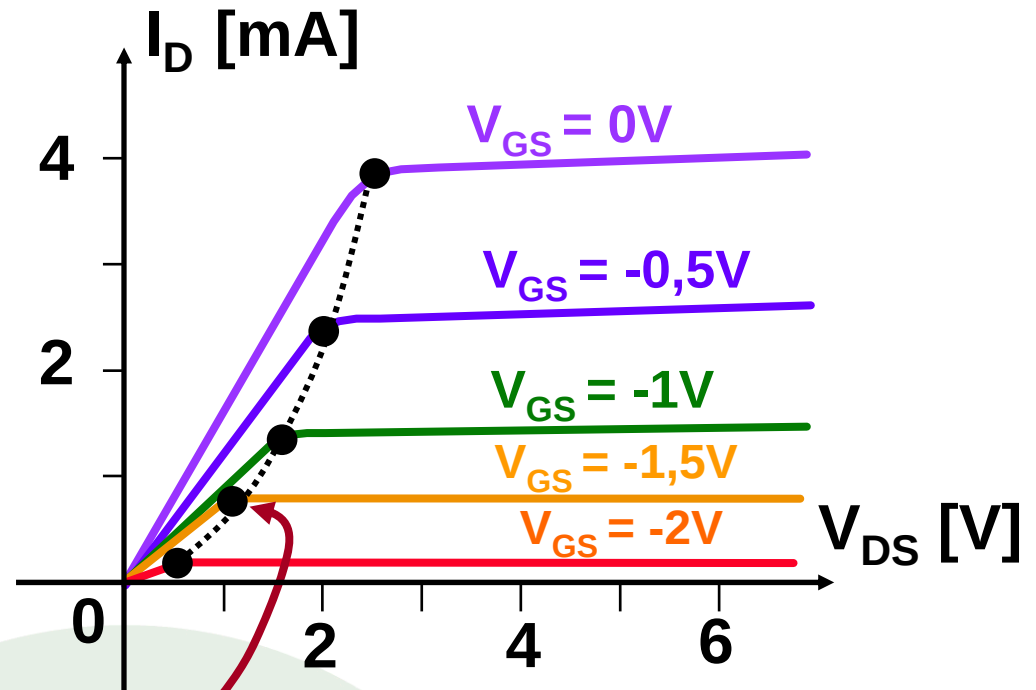


Curvas características de un JFET (canal N)

Referencias
normalizadas



•Curvas de salida



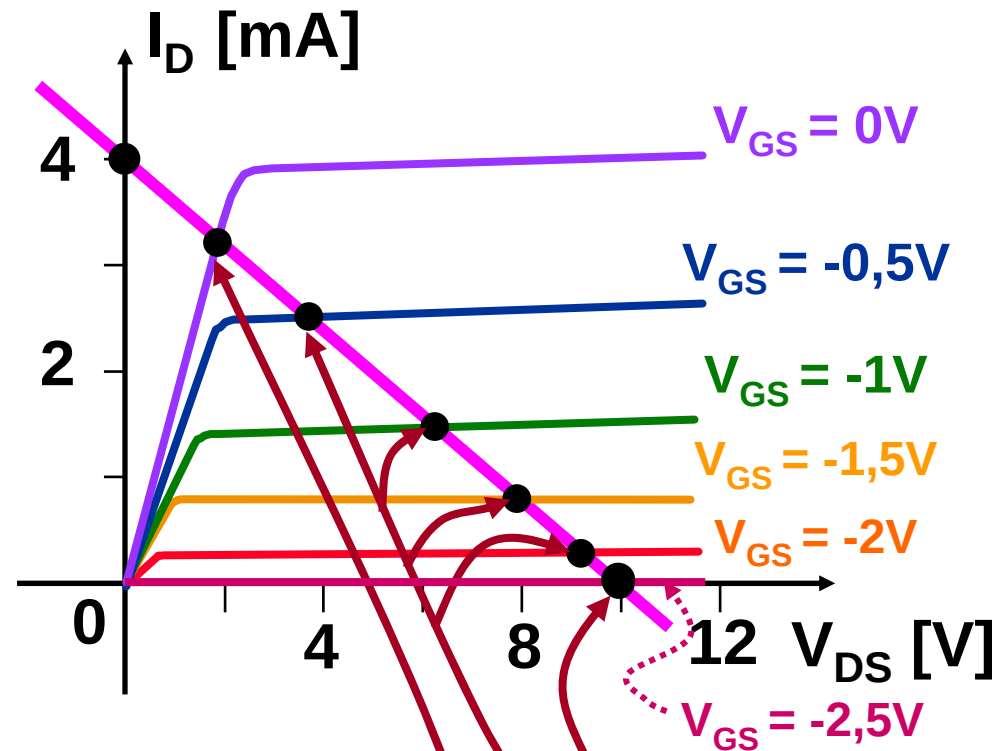
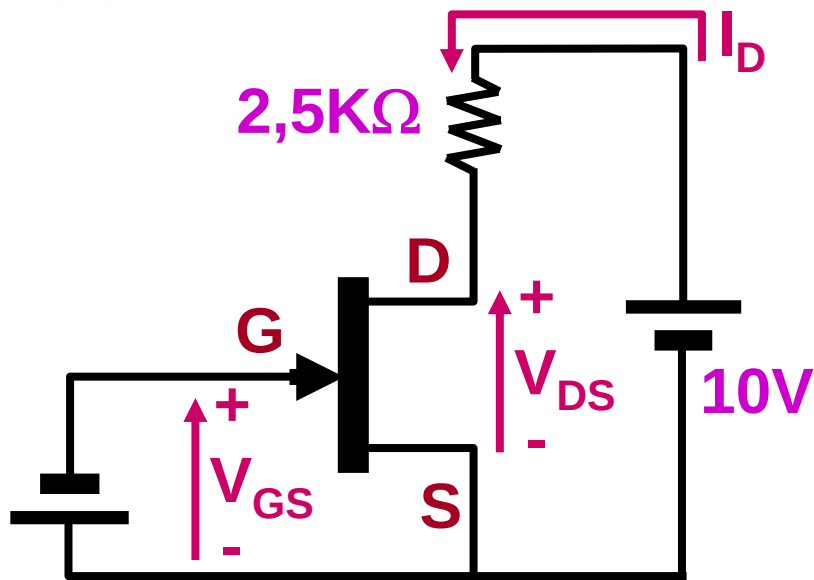
Contracción del canal

SE COMPORTA COMO UN TRANSISTOR BIPOLAR DONDE LA TENSIÓN DE PUERTA (U_{GS}) JUEGA EL PAPEL DE LA CORRIENTE DE BASE.
PODEMOS DECIR QUE ES UN DISPOSITIVO CONTROLADO POR TENSIÓN.



Universidad
de Oviedo

Análisis gráfico de un JFET en fuente común



$$V_{GS} = 0V > -0,5V > -1V > -1,5V > -2V > -2,5V$$

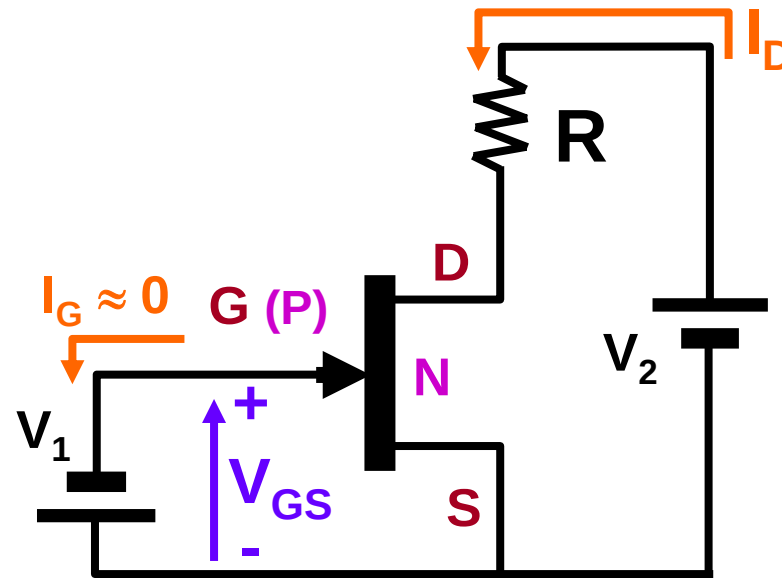
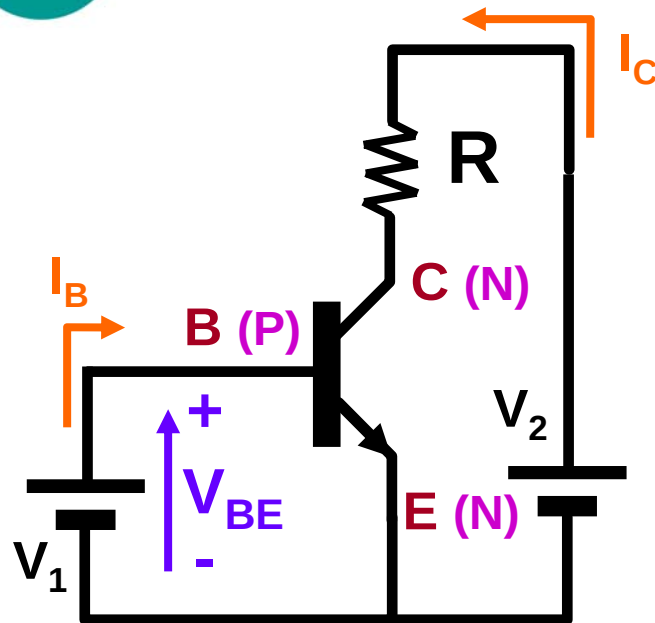
Comportamiento resistivo

Comportamiento como fuente de corriente

Comportamiento como circuito abierto



Comparación entre transistores bipolares y JFET



- En ambos casos, las tensiones de entrada (V_{BE} y V_{GS}) determinan las corrientes de salida (I_C e I_D).
- En zona de comportamiento como fuente de corriente, es útil relacionar corrientes de salida y entrada (transistor bipolar) o corriente de salida con tensión de entrada (JFET).
- La potencia que la fuente V_1 tiene que suministrar es mucho más pequeña en el caso del JFET (la corriente es casi cero, al estar polarizada inversamente la unión puerta-canal).



Comunicaciones

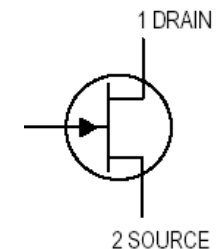
Alta impedancia de entrada

Amplificadores de ganancia elevada

Baja potencia

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Drain – Source Voltage	V_{DS}	25	Vdc
Drain – Gate Voltage	V_{DG}	25	Vdc
Reverse Gate – Source Voltage	V_{GSR}	–25	Vdc
Gate Current	I_G	10	mAdc
Total Device Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	310 2.82	mW mW/ $^\circ\text{C}$
Junction Temperature Range	T_J	125	$^\circ\text{C}$
Storage Channel Temperature Range	T_{stg}	–65 to +150	$^\circ\text{C}$



CASE 29–04, STYLE 5
TO–92 (TO–226AA)

2N5457

*Motorola Preferred Device



- ✓ Los jfet tanto de canal n como de canal p son actualmente poco utilizados.
- ✓ El jfet es más rápido al ser un dispositivo unipolar (conducción no determinada por la concentración de minoritarios).
- ✓ El jfet puede usarse como resistencia controlada por tensión, ya que tiene una zona de trabajo con característica resistiva
- ✓ ¡¡¡ Cuidado con el termino saturación del canal, no confundir con región de saturación en el transistor bipolar!!!

Puede resultar un poco confusa la nomenclatura.

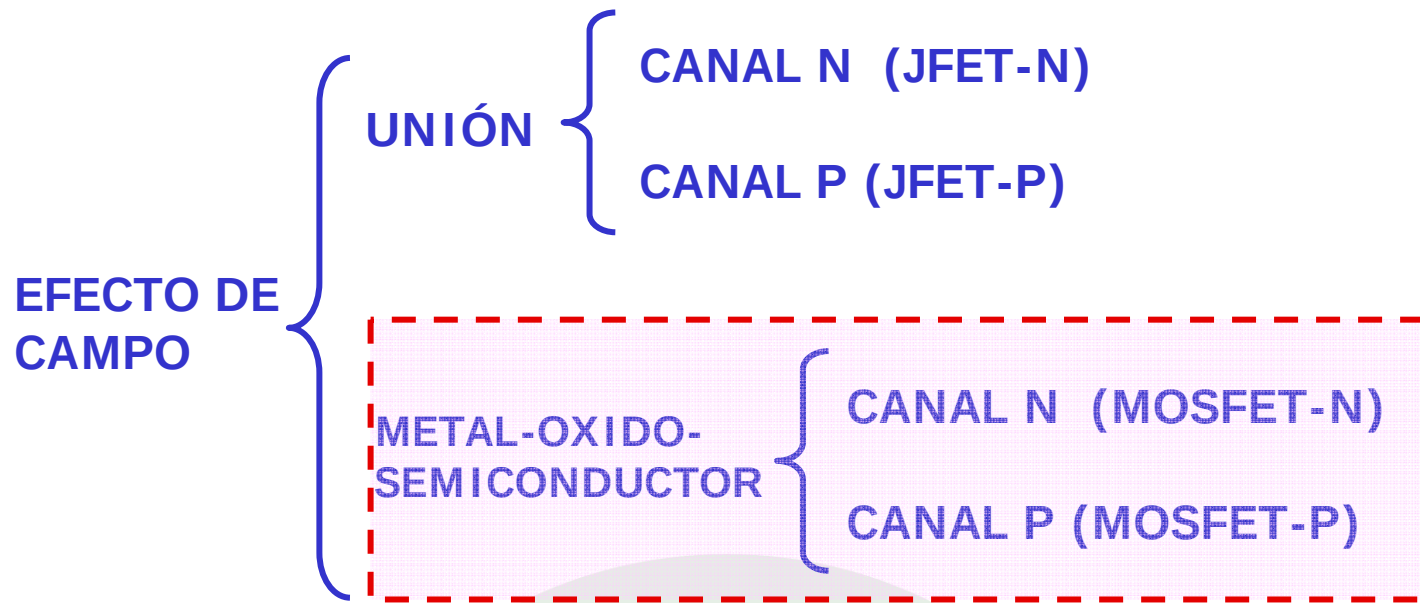
- ✓ Al igual que pasa con los transistores bipolares, en igualdad de condiciones, el jfet de canal n es mas rápido que el de canal p.

(Razón: movilidad de electrones mayor que la de huecos)



Universidad
de Oviedo

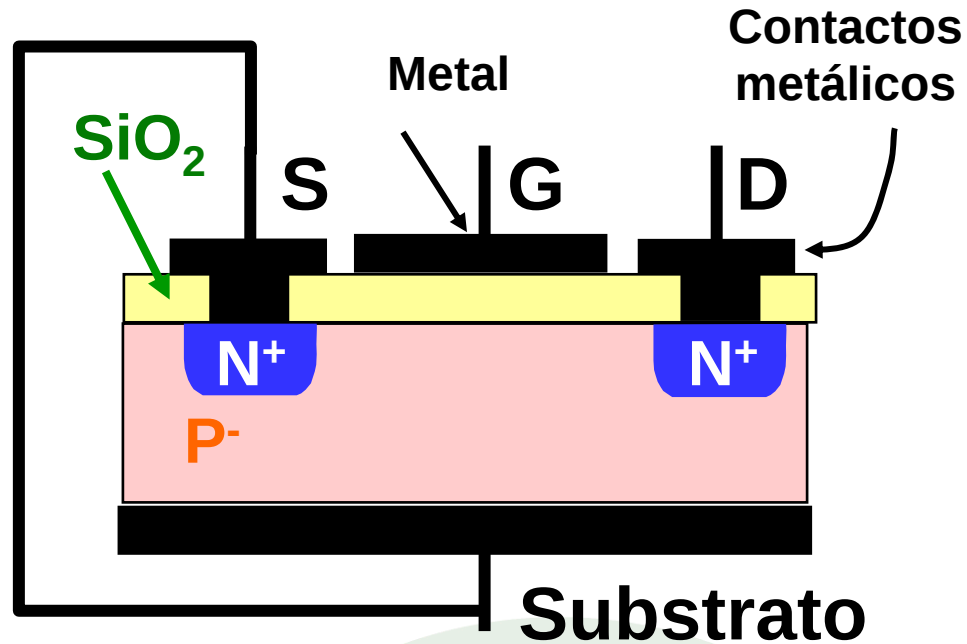
TRANSISTORES MOSFET
(MOS - Metal Oxide Semiconductor +
FET - Field Effect Transistor)



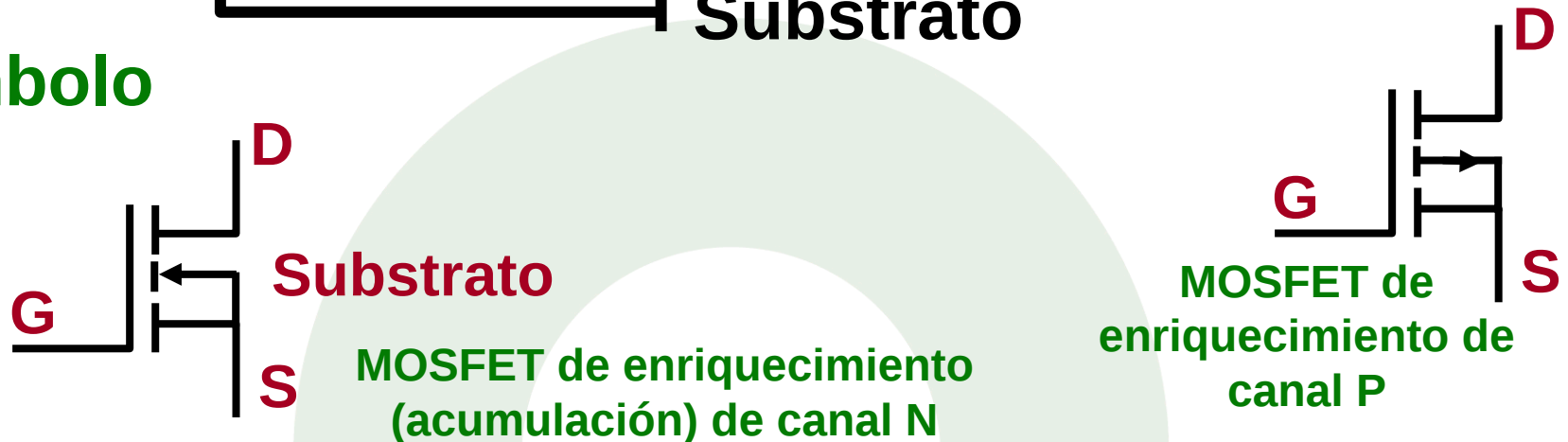
Dr Martín Atalla y Dr Dawon Kahng desarrollaron en primer MOSFET en los laboratorios Bell en 1960



Estructura

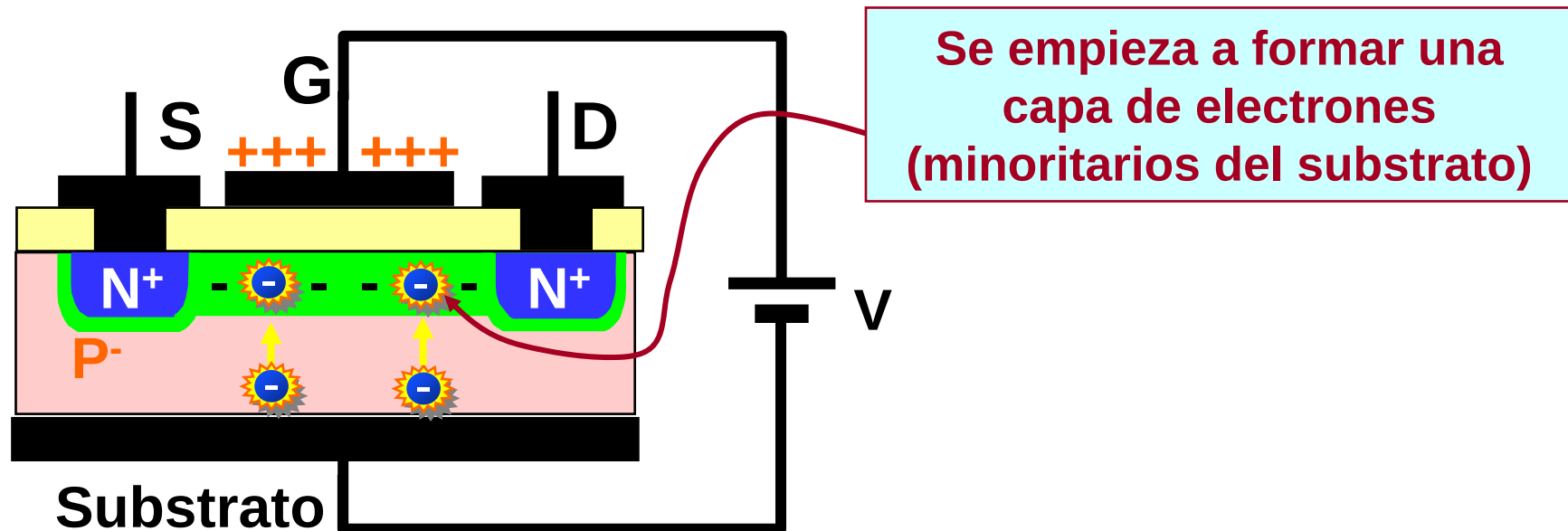


Símbolo





Principios de operación de los MOSFET

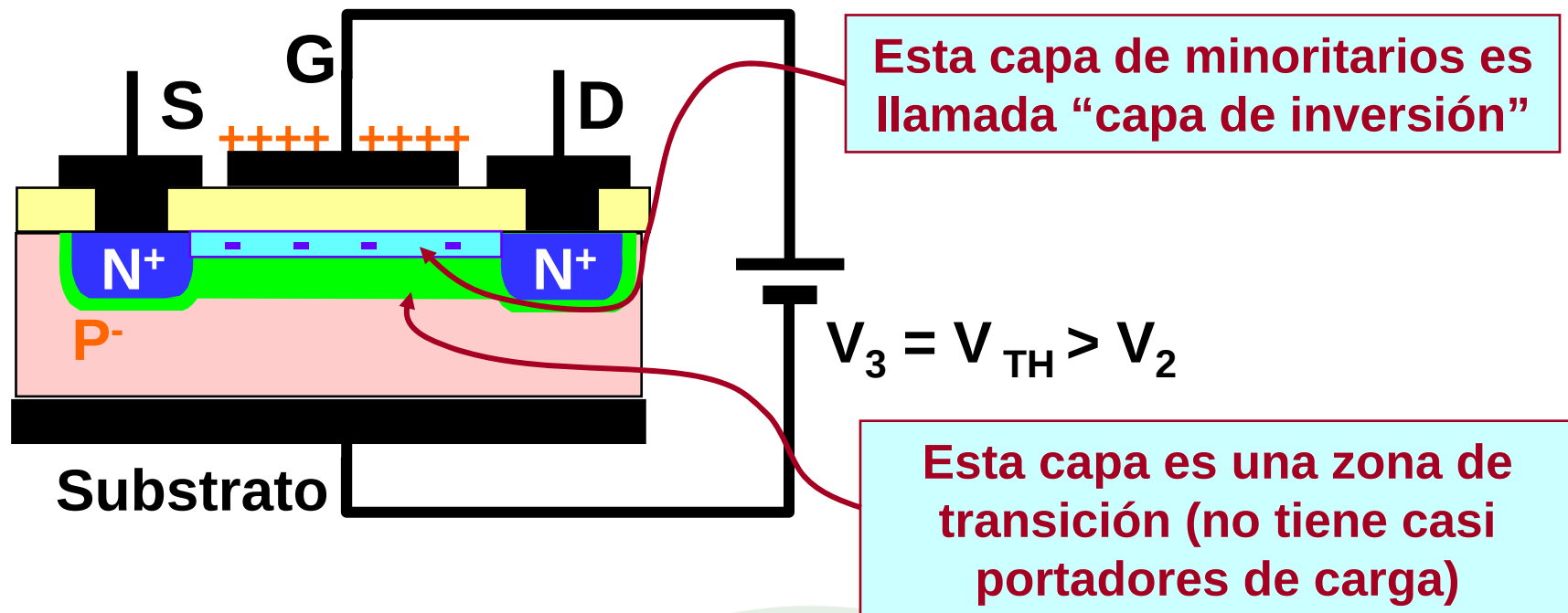


Por atracción electrostática la zona bajo la puerta (CANAL) se enriquece de cargas negativas (minoritarios de la zona P).

El CANAL, así enriquecido, se comporta como una zona N (CANAL N)



Principios de operación de los MOSFET

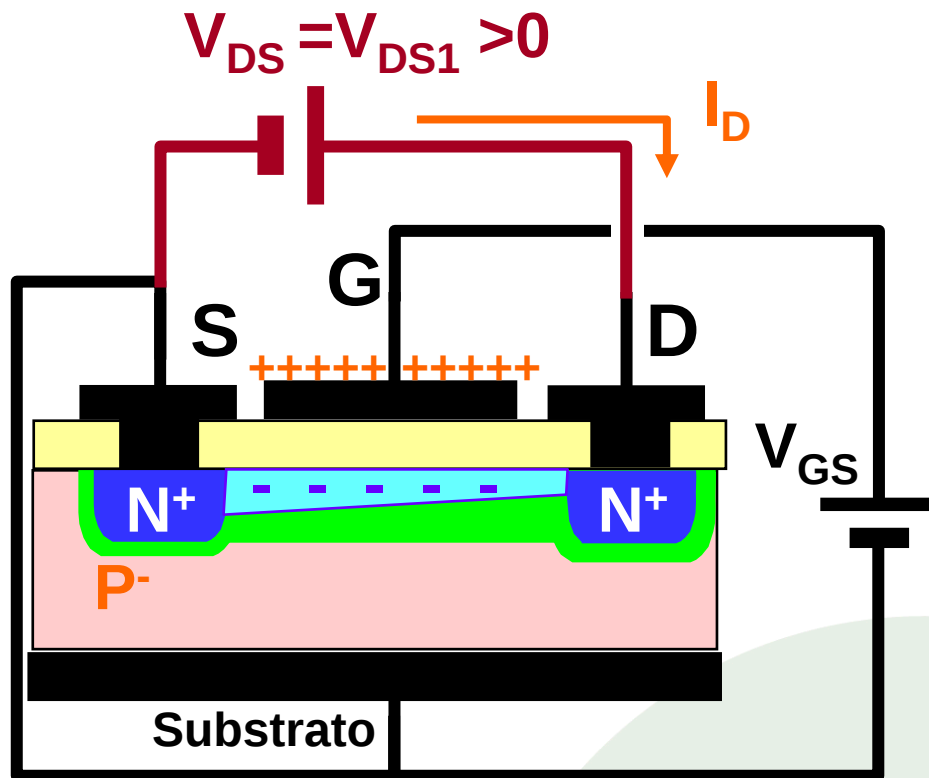


Al aumentar la tensión de puerta (V_{GS}), aumenta el canal.

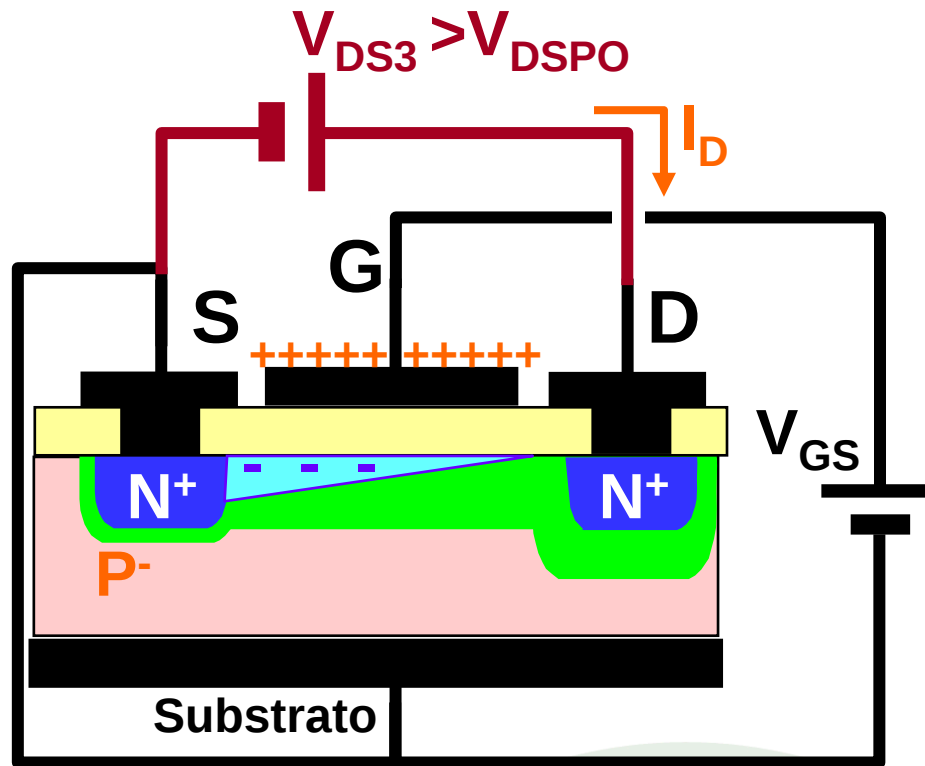
La situación es parecida al JFET, solo que ahora vamos aumentando el canal a medida que polarizamos positivamente la puerta (G)



Principios de operación de los MOSFET



- El canal se empieza a contraer según aumenta la tensión V_{DS} .
- La situación es semejante a la que se da en un JFET.



Aparecen dos tendencias contrapuestas que se compensan:

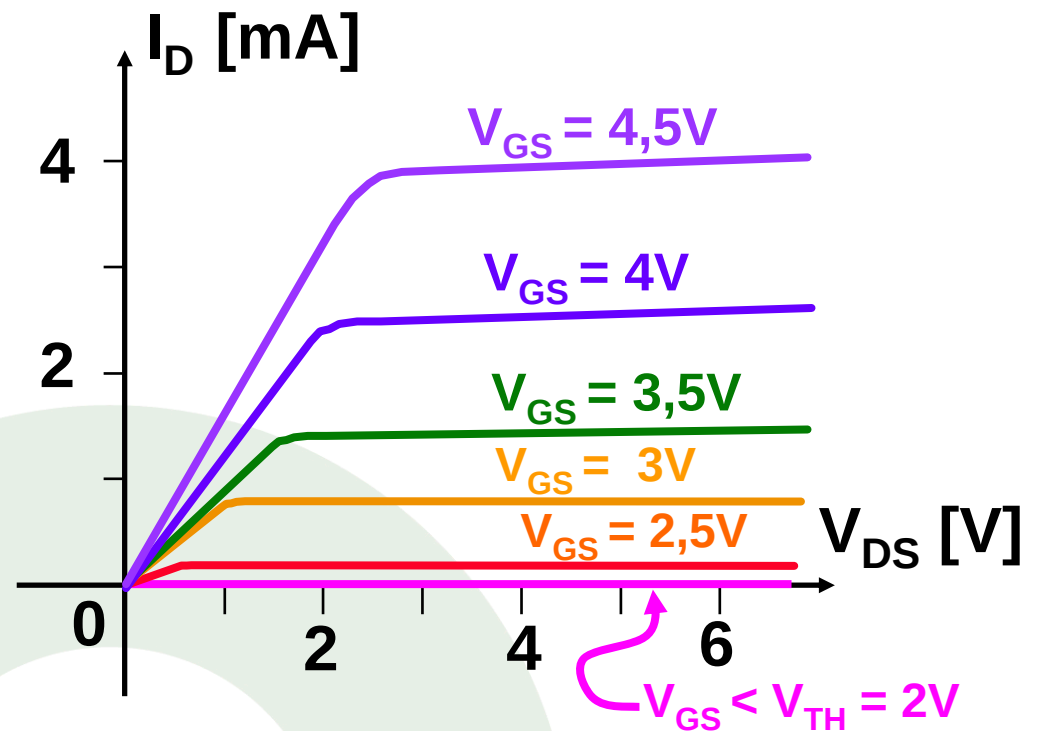
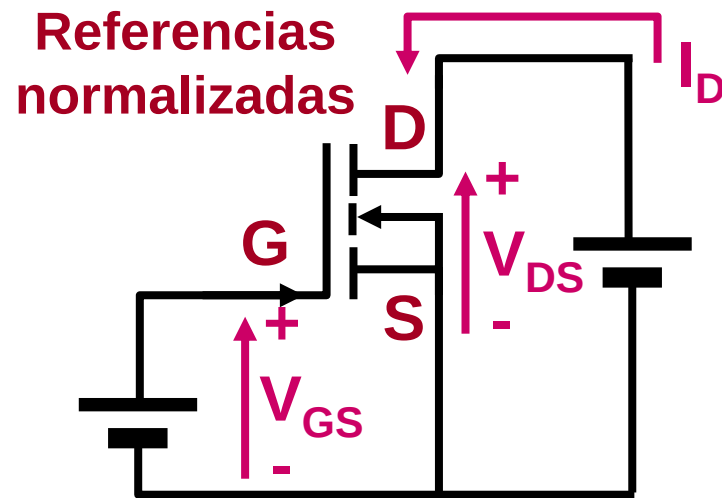
- Aumento de la corriente por aumentar la tensión V_{DS}
- Disminución de la corriente por el estrechamiento del canal

Resultado: comportamiento como fuente de corriente



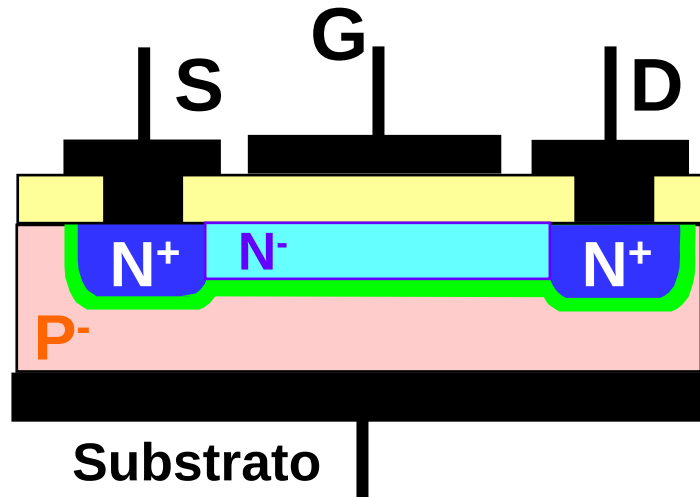
Curvas características de un MOSFET de acumulación o enriquecimiento de canal N

Curvas de salida

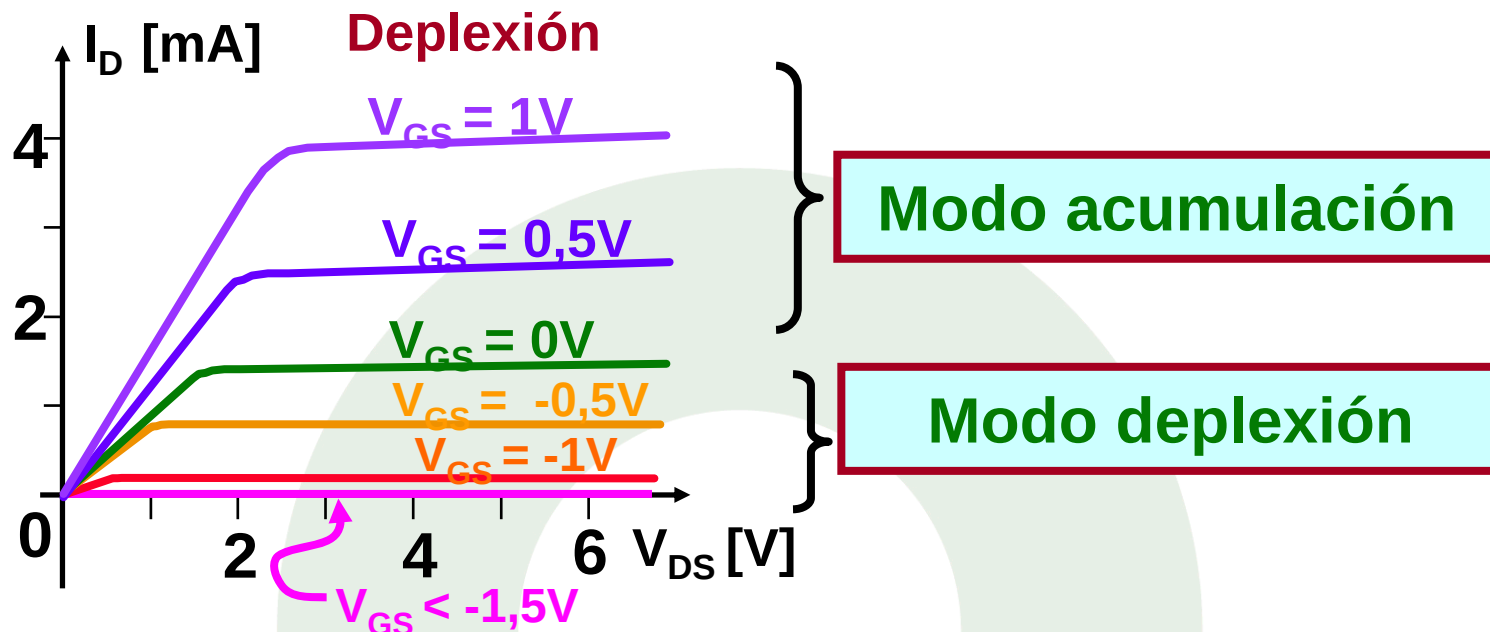




Los MOSFET de empobrecimiento o depleción



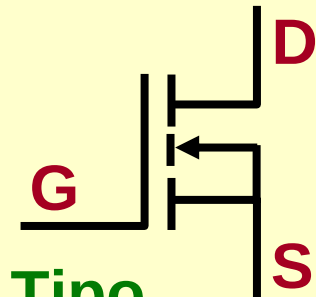
- Existe canal sin necesidad de aplicar tensión a la puerta. Se podrá establecer circulación de corriente entre drenador y fuente sin necesidad de colocar tensión positiva en la puerta.



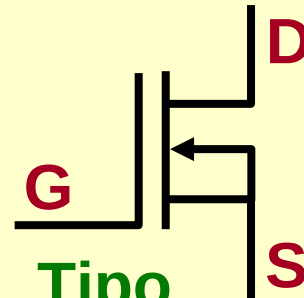


Universidad
de Oviedo

Símbolos de los MOSFET

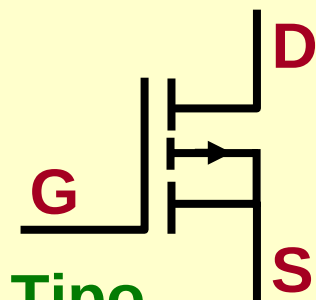


Tipo
enriquecimiento

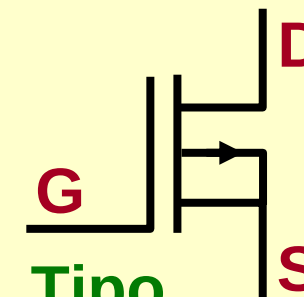


Tipo
deplexión

Canal N



Tipo
enriquecimiento

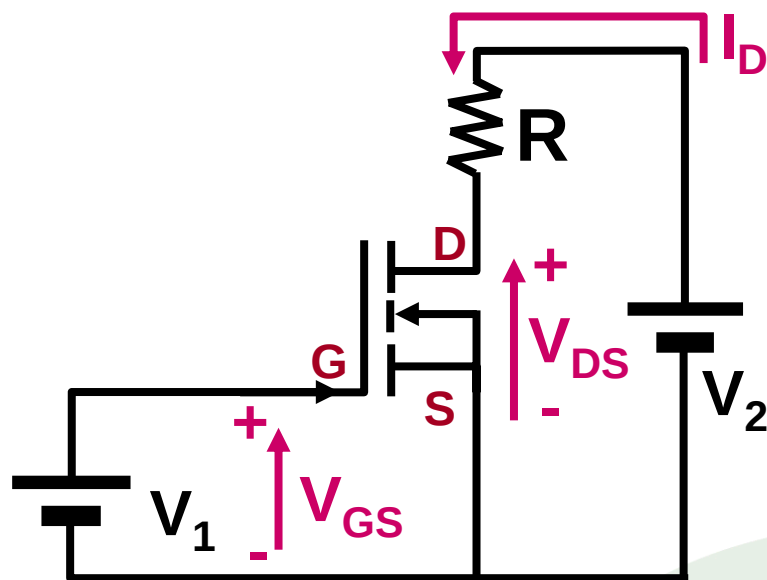


Tipo
deplexión

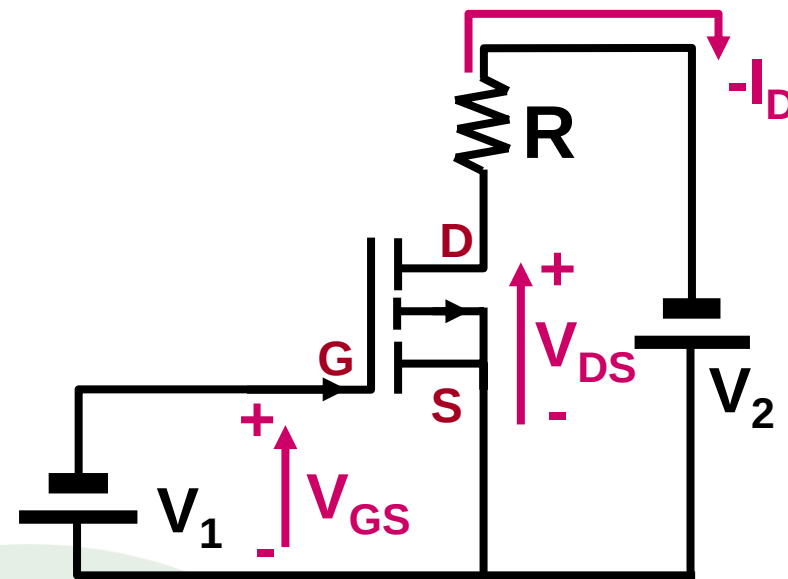
Canal P



Circuitos de polarización



Canal N



Canal P

Hay que invertir los sentidos reales de tensiones y corrientes para operar en los mismas zonas de trabajo.

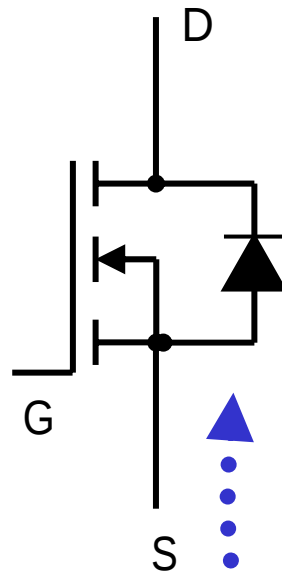
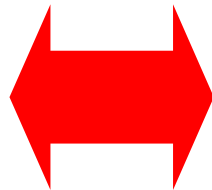
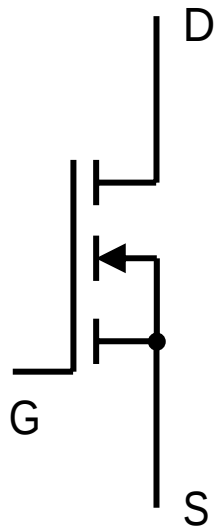


Universidad
de Oviedo

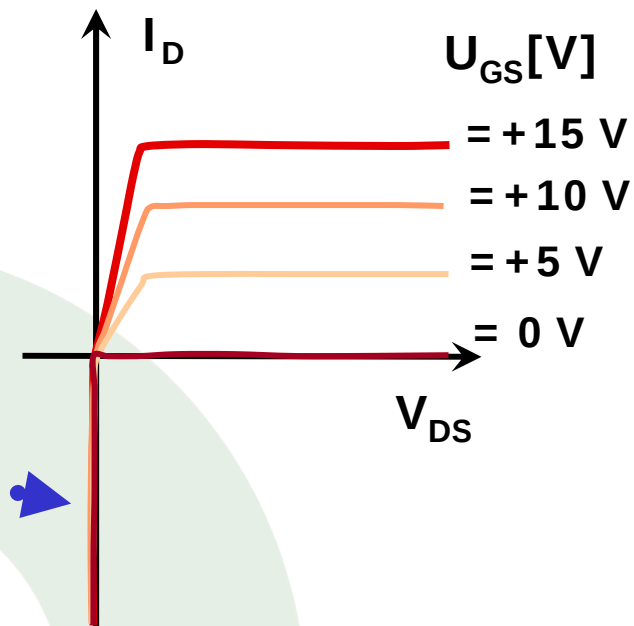
MOSFET DE CANAL N (¿ Que pasa con el substrato?)

COMENTARIO:

Aunque a veces se dibuje el símbolo con un diodo, tener en cuenta que NO ES UN COMPONENTE APARTE.



Diodo parásito
(Substrato - Drenador)





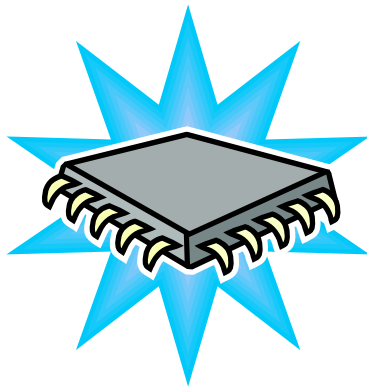
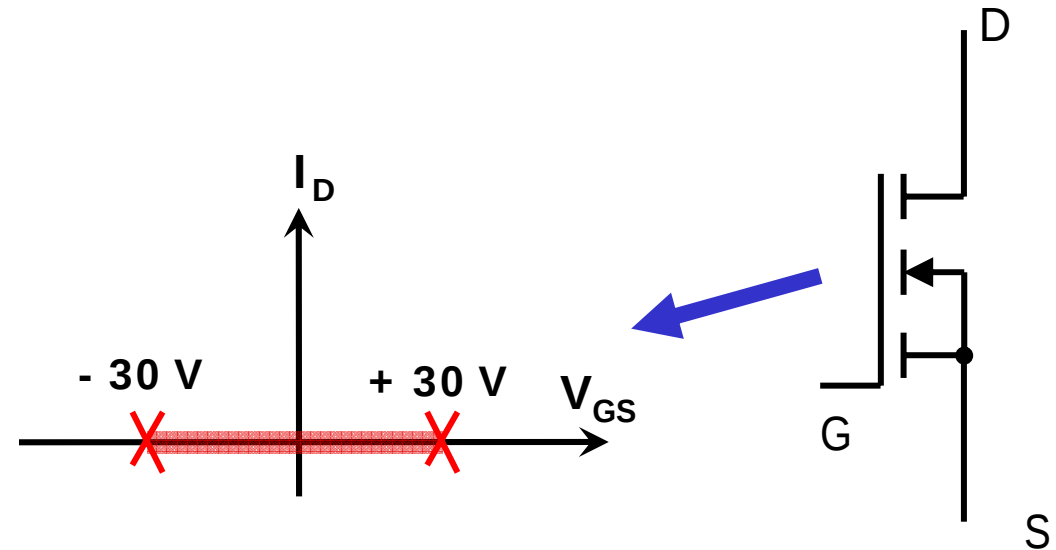
Universidad
de Oviedo

MOSFET DE CANAL N (precauciones con la puerta)

La puerta (G) es muy sensible.

Puede perforarse con tensiones bastante pequeñas (valores típicos de 30 V).

No debe dejarse nunca al aire y debe protegerse adecuadamente.



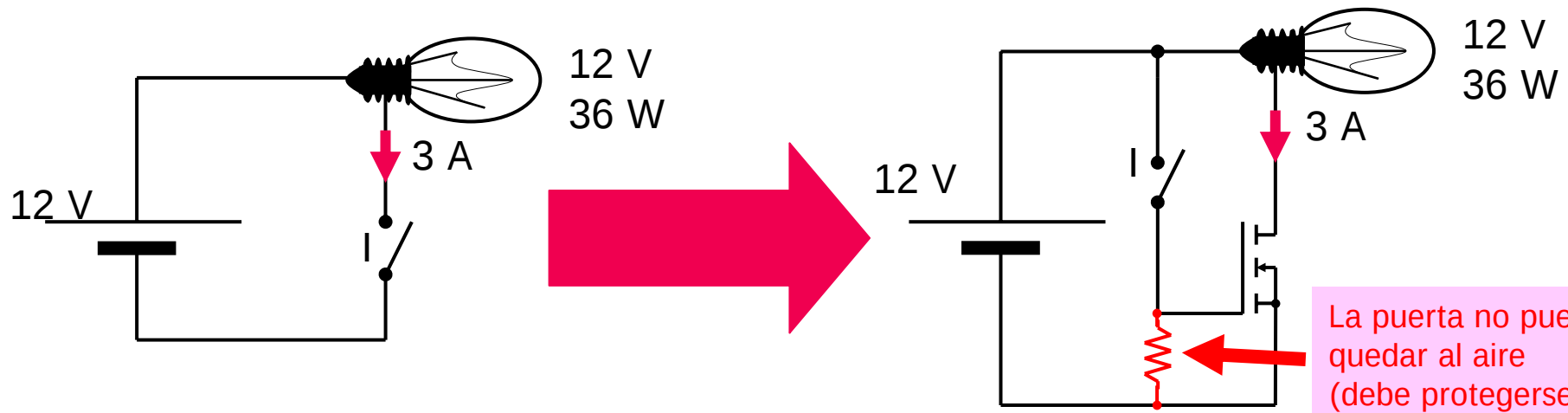
CAUTION, ELECTROSTATIC SENSITIVE !!!





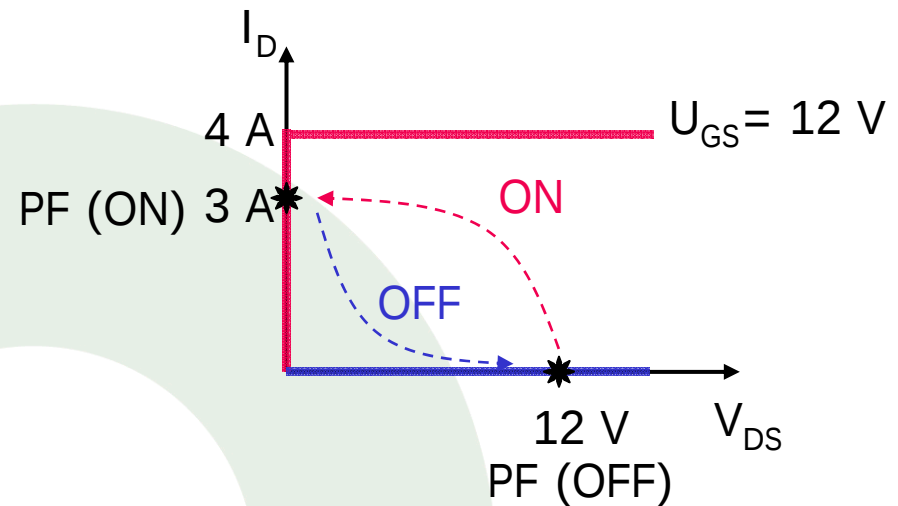
Universidad
de Oviedo

USOS DEL MOSFET - Canal N: Como interruptor



Sustituimos el interruptor principal por un transistor.

iii LA CORRIENTE DE PUERTA ES NULA (MUY PEQUEÑA) !!!

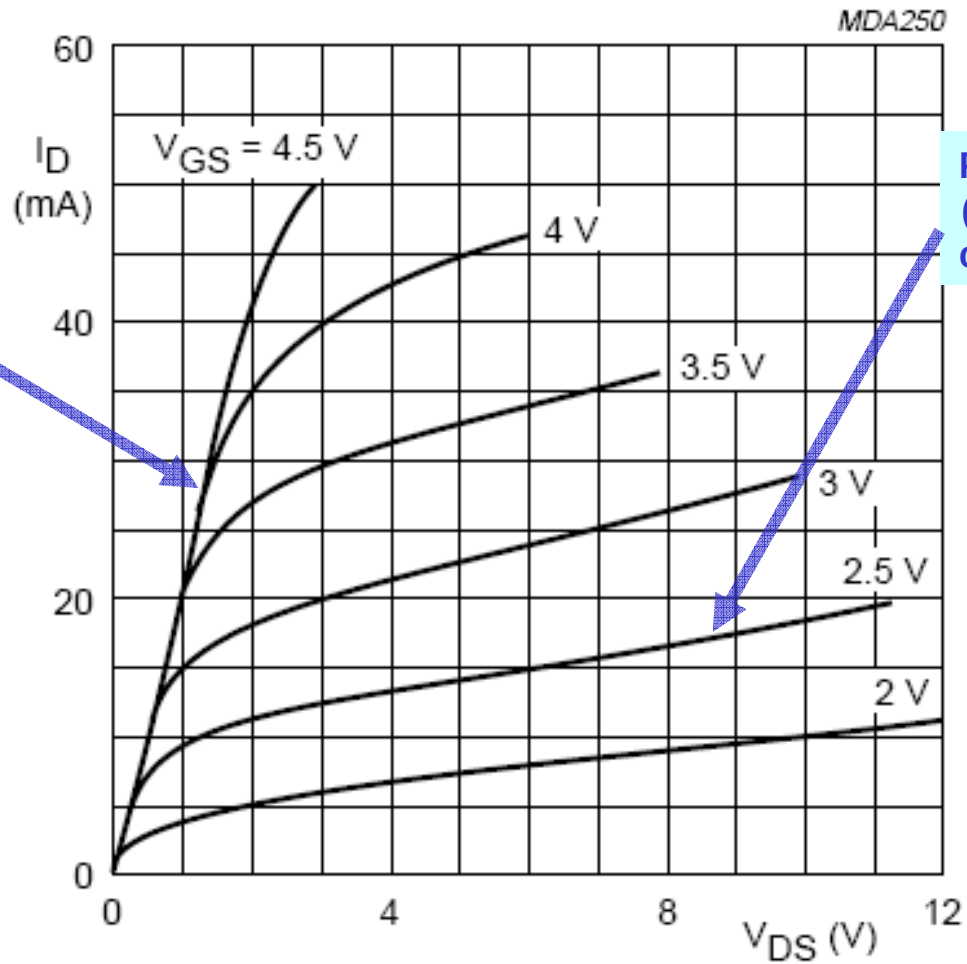




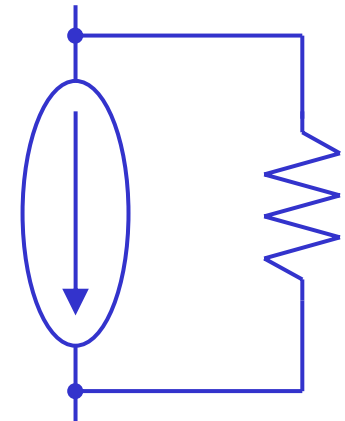
Universidad
de Oviedo

CURVA DE SALIDA TÍPICA DE UN MOSFET DE CANAL N DE POCA CORRIENTE

Comportamiento
resistivo



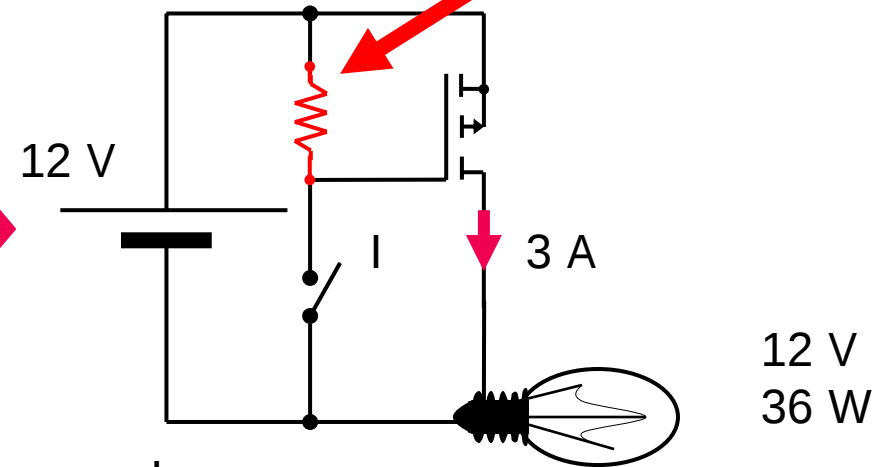
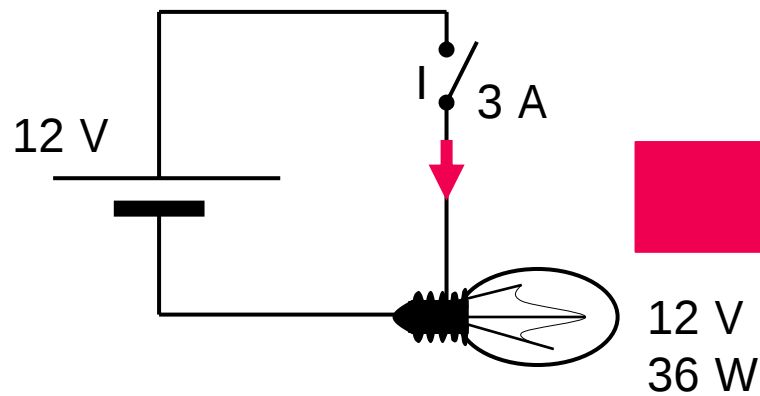
Fuente de corriente
(aumenta significativamente
con la tensión V_{DS})





Universidad
de Oviedo

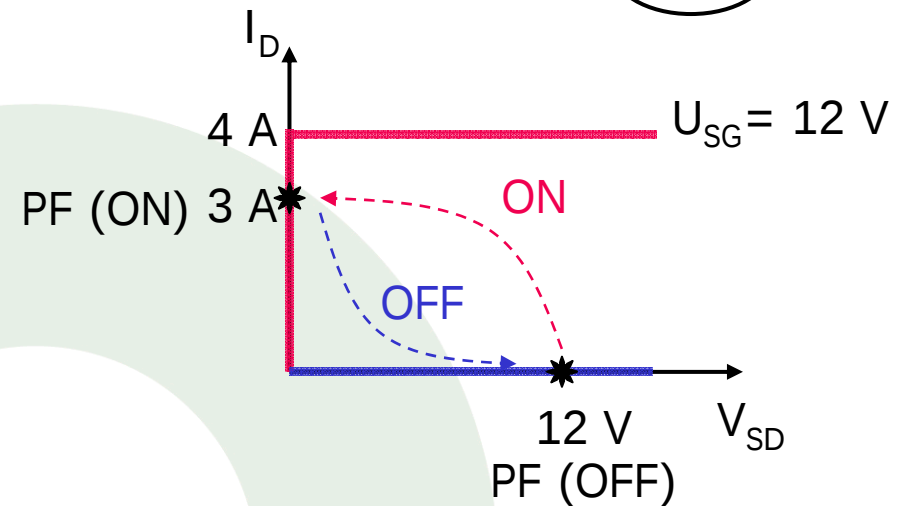
USOS DEL MOSFET - Canal P: Como interruptor



La puerta no puede
quedar al aire (debe
protegerse)

Sustituimos el interruptor principal por un transistor.

!!! LA CORRIENTE DE PUERTA ES NULA
(MUY PEQUEÑA) !!!





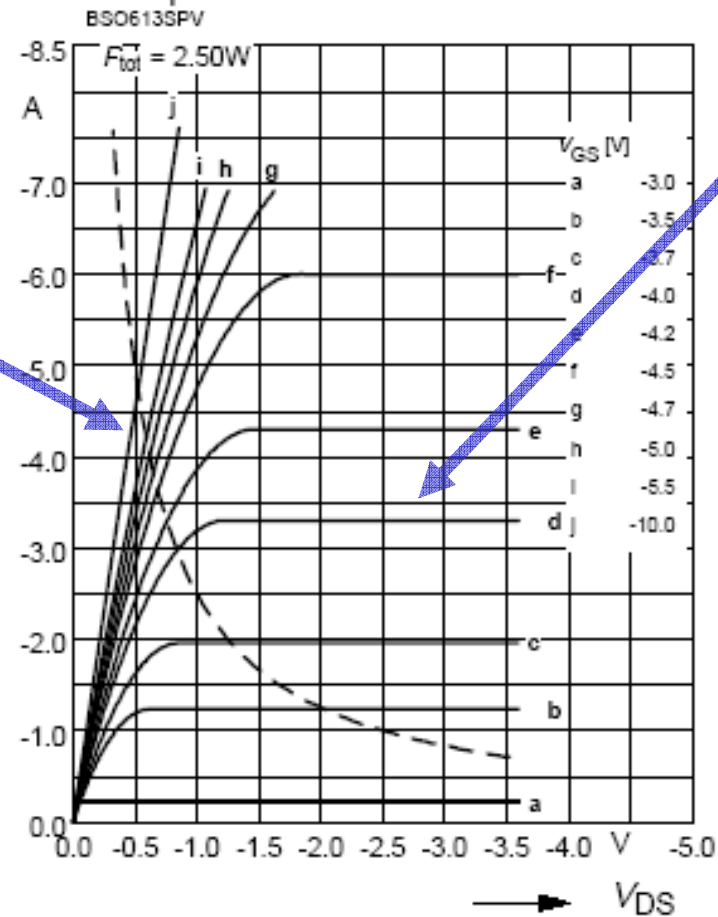
CURVA DE SALIDA TÍPICA DE UN MOSFET DE CANAL P

Typ. output characteristic

$I_D = f(V_{DS}); T_J = 25^\circ\text{C}$

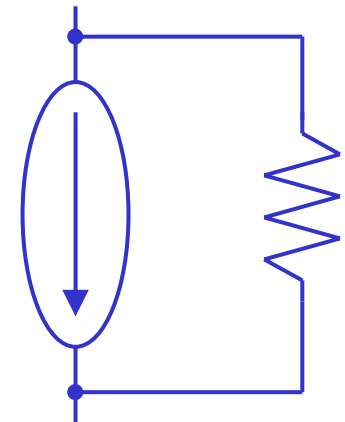
parameter: $t_p = 80\ \mu\text{s}$

BSO613SPV



Comportamiento
resistivo

Fuente de corriente
(aumenta significativamente
con la tensión V_{SD})

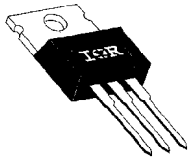




Universidad
de Oviedo

Mosfet comerciales.

Potencias y tensiones de funcionamiento



TO220

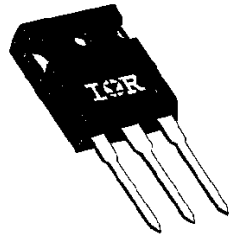
IRF540:

$U_{DS} = 100V$

$I_D = 28A$

$R_{DS} = 7.7m\Omega$

$P = 150W$



TO247

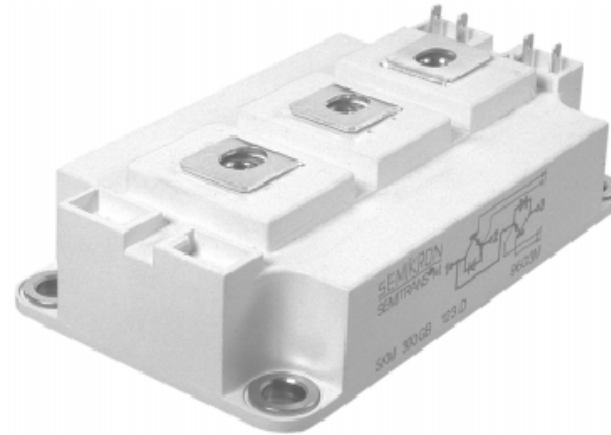
IRF460:

$U_{DS} = 600V$

$I_D = 28A$

$R_{DS} = 0.58 \Omega$

$P = 180W$



SEMITRANS M3

SKM 253 B 020:

$U_{DS} = 200V$

$I_D = 250A$

$R_{DS} = 8.6 m\Omega$

$P = 1000W$



Comparación entre Bipolar y Mosfet

MOSFET:

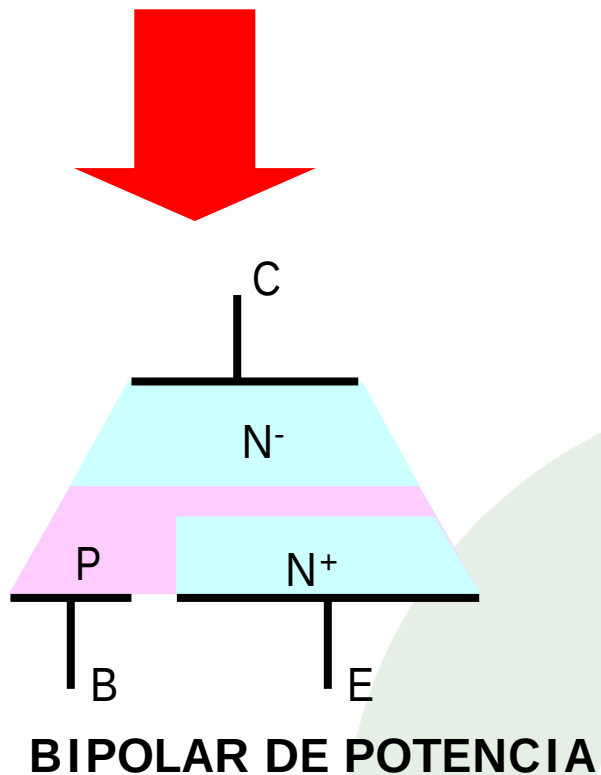
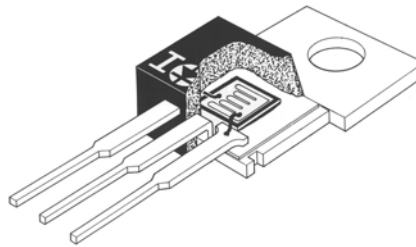
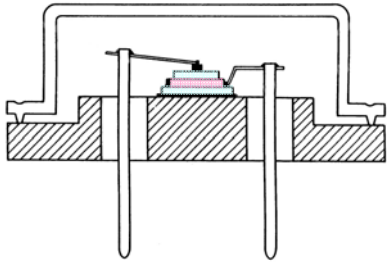
- ☐ Alta velocidad de conmutación
- ☐ Controlado por tensión
- ☐ Circuitos de control simples
- ☐ Coeficiente de temperatura negativo
- ☐ Fácil paralelizado
- ☐ Impedancias de Entrada Elevadas ($10^9 - 10^{11} \Omega$)
- ☐ Ganancias Elevadas $10^5 - 10^6$
- ☐ Temperatura máxima de funcionamiento 200°C

BIPOLAR:

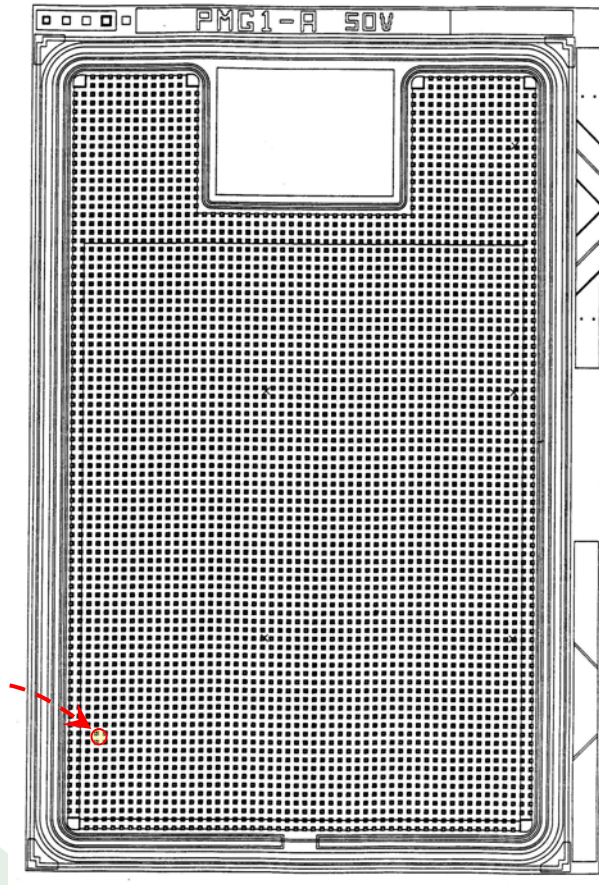
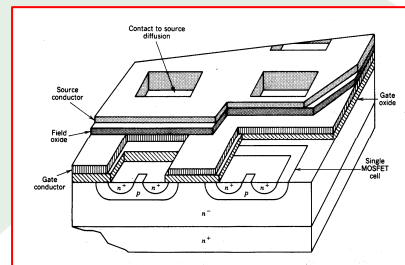
- ☐ Baja velocidad de conmutación
- ☐ Controlado por corriente
- ☐ Circuitos de control complicados (potencia)
- ☐ Coeficiente de temperatura positivo
- ☐ Difícil paralelizado
- ☐ Impedancias de Entrada Elevadas ($10^3 - 10^4 \Omega$)
- ☐ Ganancias Elevadas $10^1 - 10^2$
- ☐ Temperatura máxima de funcionamiento 150°C



Universidad
de Oviedo



Cada punto
representa
un MOSFET



MOSFET DE POTENCIA

(Muchos pequeños MOSFET
en paralelo, realmente es un
"Circuito Integrado")

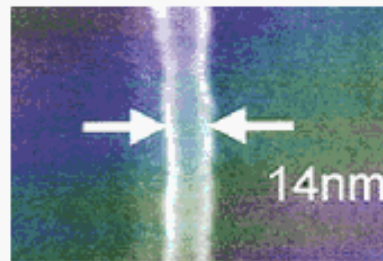
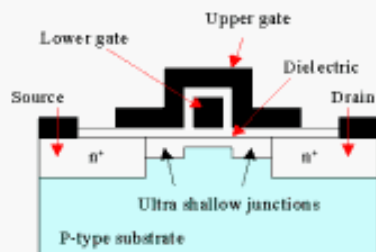


Universidad
de Oviedo

DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS: PEQUEÑOS Y GRANDES SEGÚN LA APLICACIÓN

EL MAS PEQUEÑO

Smallest Known Transistor Made
by NEC in 1997



0.014 micron lower gate width Photo courtesy: NEC Corporation

Hong Xiao, Ph. D.

www2.usf.edu/cc/tc.us/HongXiao/Book.htm

17

UNO GRANDE

Unos de los 12 SCR para un “pequeño”
rectificador trifásico de 500 MW y 500 KV
(Inga-Shaba, ZAIRE)

