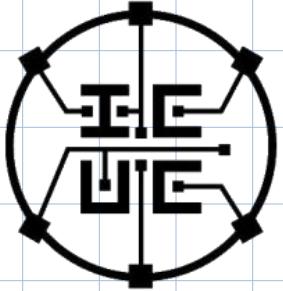




3.01



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

El diodo como válvula de corriente

Dependencias:

- 1.14 Curva (recta) de carga
- 1.16 Rieles de alimentación de un circuito

angel@uc.cl

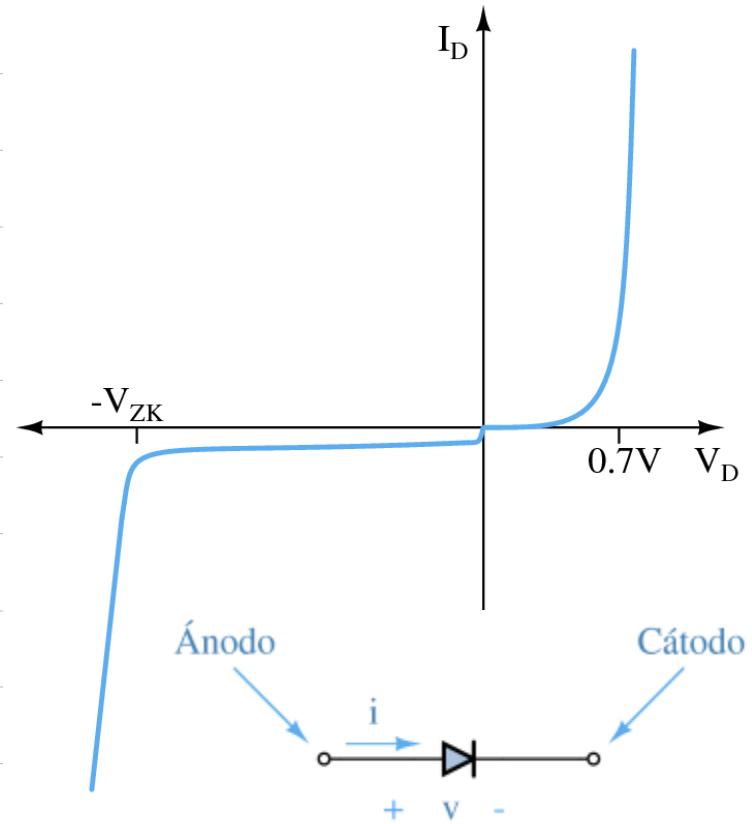
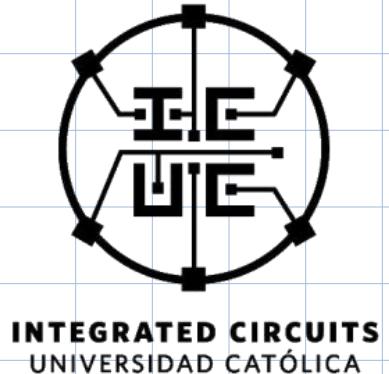
Electrónica en cápsulas

El diodo: nuestro primer elemento circuital no lineal

- El diodo es un elemento circuital cuya relación voltaje-corriente no es lineal:

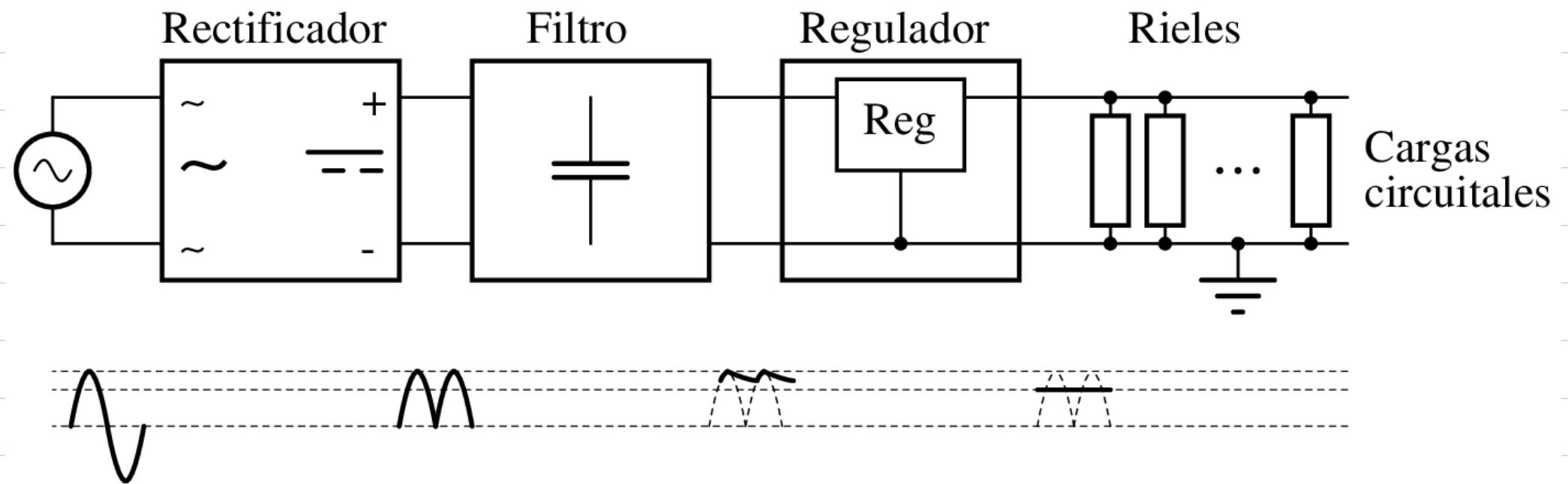
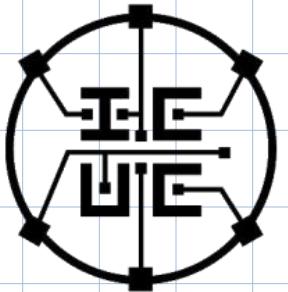
$$I_D \approx I_S \cdot e^{\frac{V_D}{nV_T}}$$

- ¿Para qué nos sirve un elemento no lineal?
Veamos algunas aplicaciones en las siguientes láminas...



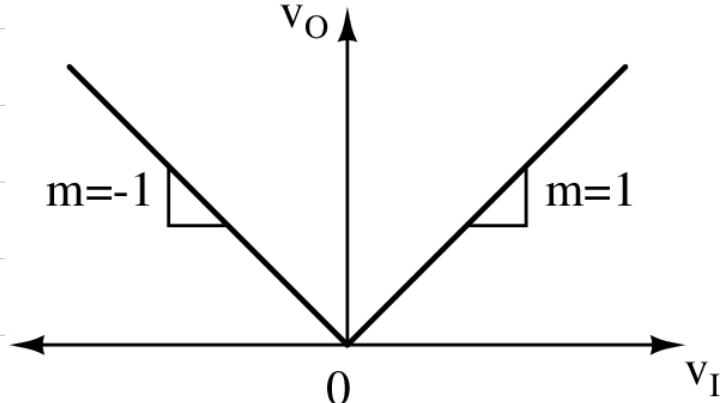
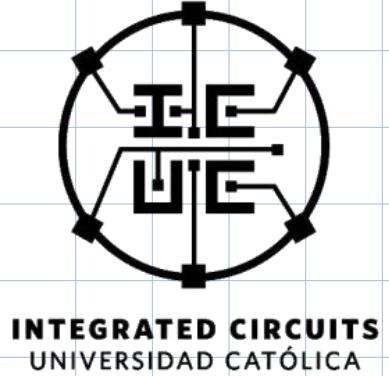
Rectificación (1.16)

Recordemos el diagrama de bloques de una fuente de corriente lineal



La rectificación es una operación no lineal

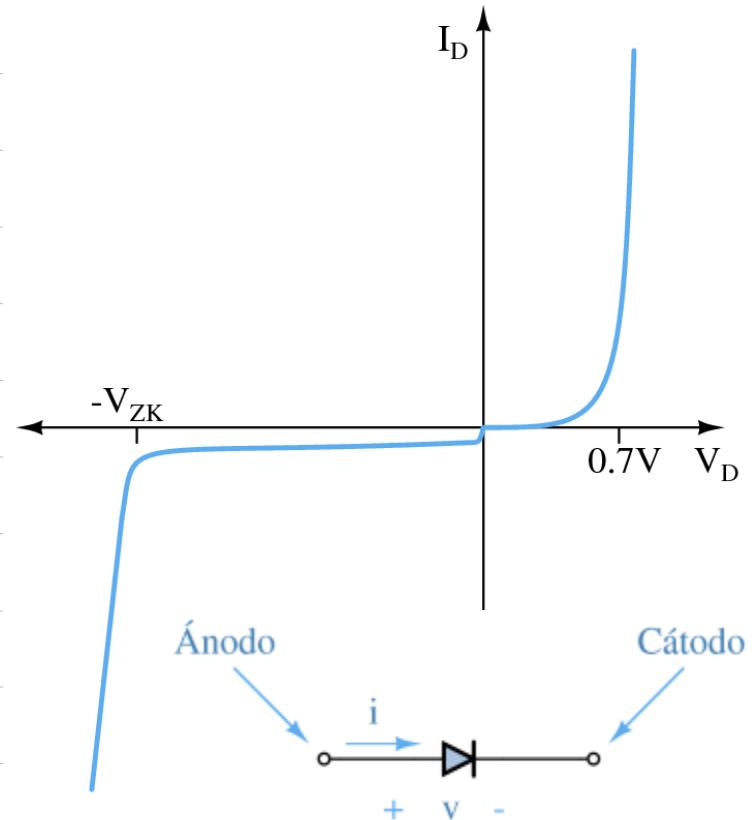
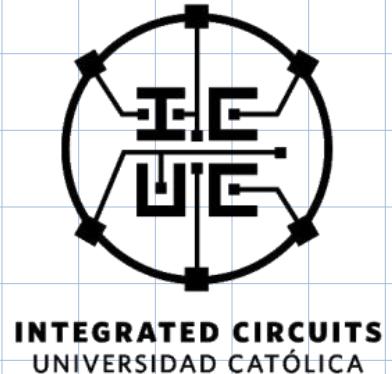
- Para rectificar usamos diodos
 - Se comportan como cortocircuitos para voltajes positivos
 - Se comportan como circuitos abiertos para voltajes negativos
- Veamos un ejemplo circuitual



¿Cuál será la resistencia equivalente del diodo?

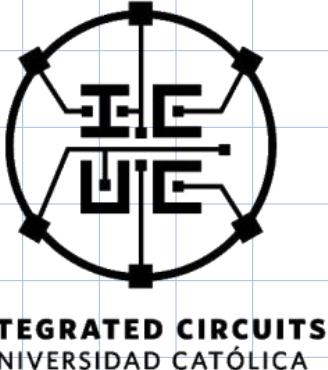
Resistencia equivalente

- La resistencia equivalente depende del punto de operación
 - La resistencia **incremental** puede ser muy pequeña o muy grande según el voltaje del diodo
 - La resistencia absoluta también depende considerablemente del voltaje de operación
- Por lo tanto, el diodo es una especie de switch que se abre o se cierra dependiendo de su voltaje
 - Es una válvula para la corriente



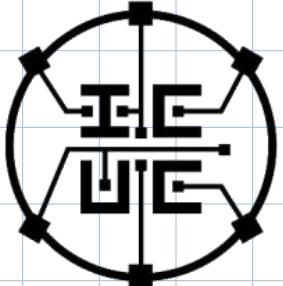
¿Qué veremos en este capítulo?

- Introducción a la física de semiconductores
- Funcionamiento del diodo
- Modelos matemáticos para el diodo
 - Modelo incremental del diodo
- Aplicaciones de diodos:
 - Rectificadores de voltaje
 - Limitadores de voltaje
 - Duplicadores de voltaje
 - Etc.
- Otros tipos de diodos





3.02



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Introducción a física de semiconductores: Terminología

Dependencias:

- 3.01 El diodo como válvula de corriente

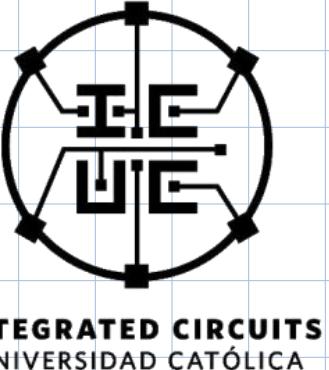
angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

¿Semi... conductores?

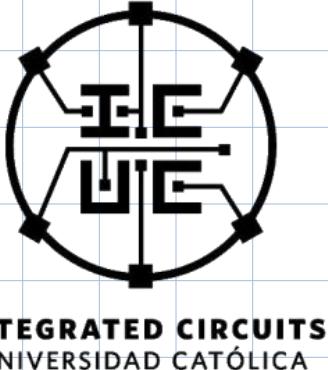
- Los semiconductores son materiales que **conducen moderadamente** la electricidad, porque tienen una conductividad eléctrica que está entre la de los conductores y la de los aislantes...
 - ...y que además **puede ser variada**
- La mayoría de los materiales semiconductores son sólidos cristalinos
 - También existen semiconductores amorfos, orgánicos y líquidos
 - Ejemplos de semiconductores: silicio, germanio, arseniuro de galio, etc.
- Dispositivos semiconductores – fabricados con materiales semiconductores – son la base de la electrónica moderna
 - Transistores, diodos (fotodiódos, LEDs), celdas solares, circuitos integrados
 - ¡Gracias a ellos existe este curso!

¿Cuál es el semiconductor más usado en el mundo?



¿Resistividad eléctrica ρ ?

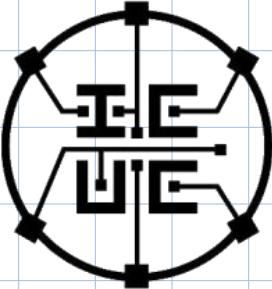
- A diferencia de la resistencia, que es una propiedad del elemento circuital, la **resistividad es una propiedad del material**
 - Y por lo tanto puede variar punto a punto
- Para calcular la resistencia de un elemento es necesario tomar en cuenta la resistividad sobre todos los caminos posibles para la corriente



Conductividad σ

Material	Conductividad (Siemens/cm)	Comentario
Plata	$630 \cdot 10^3$	El mejor conductor metálico conocido
Cobre	$596 \cdot 10^3$	El mejor en precio/conductividad
Oro	$452 \cdot 10^3$	Usado en contactos, no se corroe fácilmente
Aluminio	$378 \cdot 10^3$	Usado en cables de alto voltaje
Aqua de mar	$48 \cdot 10^{-3}$	Concentración de 35 g/kg a 20 °C
Aqua de la llave	$5 - 500 \cdot 10^{-6}$	Rango típico
Aqua destilada	$55 \cdot 10^{-9}$	
Aire	$30 - 80 \cdot 10^{-18}$	

- El silicio tiene conductividades entre $2 \cdot 10^{-6}$ S/cm y 20 S/cm
- **¿Qué otras cantidades físicas varían en 7 órdenes de magnitud?**

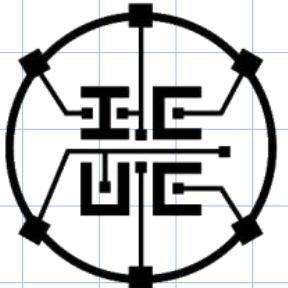


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

La conductividad es proporcional a la **concentración de portadores de carga** y a la **movilidad de los portadores de carga** en un medio

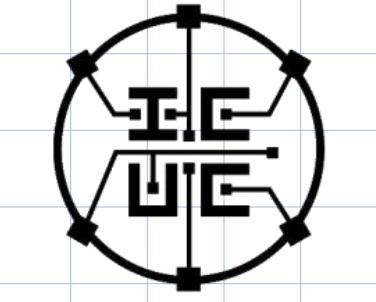
¿Portadores de carga?

- Por ahora diremos que los portadores de carga en un material son los electrones
- No todos los electrones pueden desplazarse por el material...
- Necesitamos recordar un poco de química para entender cómo están dispuestos los electrones en un material semiconductor



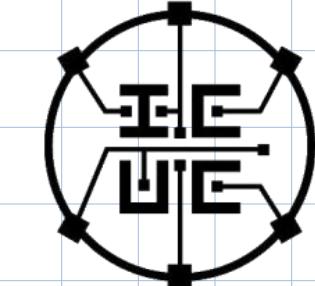
Terminología

- Número atómico
- Peso atómico
 - ¿Por qué el peso atómico de algunos elementos es fraccionario?
- Estructura electrónica, orbitales, valencia y electrones de valencia
 - Ej: silicio: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$
- Enlaces covalentes
- Cristales
- Conductividad eléctrica
 - Conductor (10^{22} electrones libres / cm^3) ($0 < \text{e. valencia} < 4$)
 - Aislante (10^{10} electrones libres / cm^3) ($\text{e. valencia} > 4$)
 - Semiconductor (**4 electrones de valencia – tetravalente**)

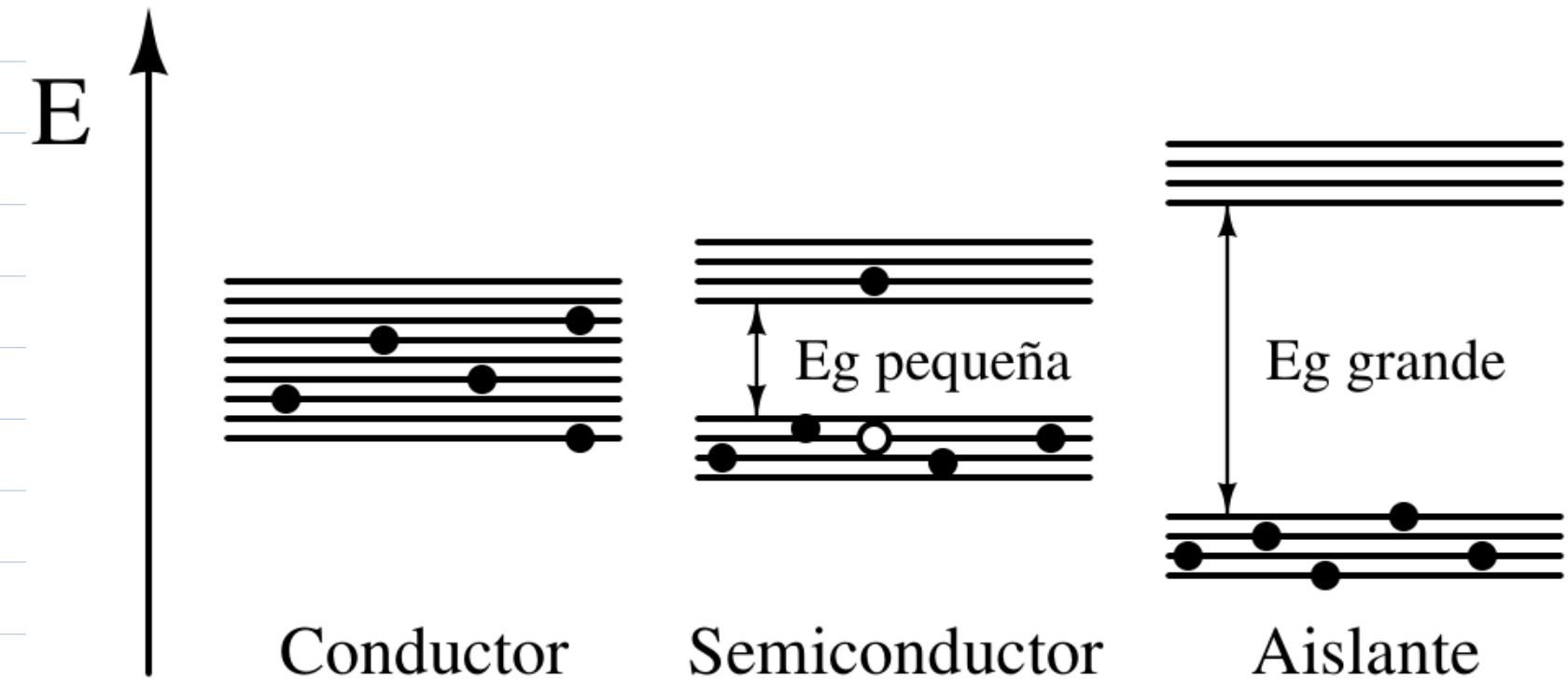


5 B 10.811 Boro	6 C 12.0107 Carbono	7 N 14.0067 Nitrógeno
13 Al 26.981539 Aluminio	14 Si 28.0855 Silicio	15 P 30.973762 Fósforo
31 Ga 69.723 Galio	32 Ge 72.63 Germanio	33 As 74.9216 Arsénico
49 In 114.818 Indio	50 Sn 118.71 Estadio	51 Sb 121.76 Antimonio

Bandas de valencia y conducción; energía de separación de banda



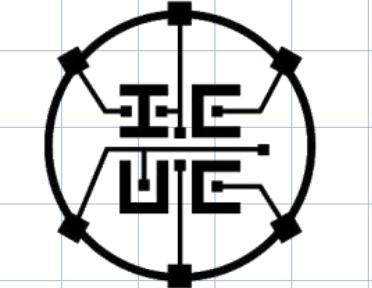
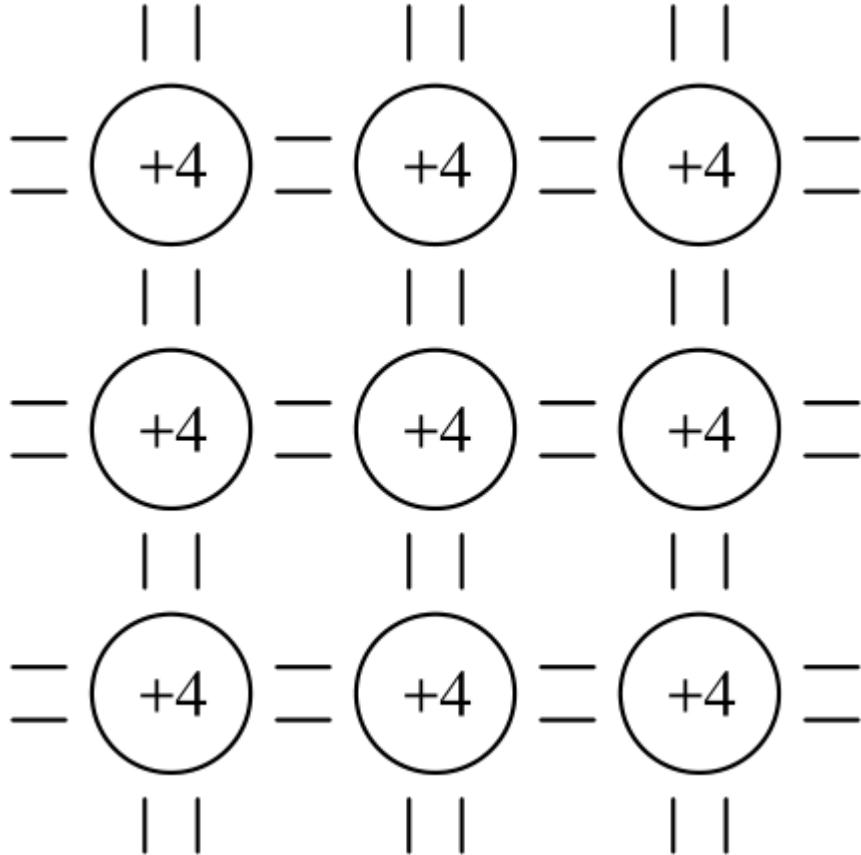
INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



Material	E_G
Silicio	1.12
Arseniuro de Galio	1.42
Germanio	0.66
Dióxido de silicio (SiO_2)	9
Nitruro de Silicio (Si_3N_4)	5
Carbón	5.47

Enlaces covalentes y estructura cristalina a 0 K

- Cada átomo de silicio tiene 4 electrones de valencia
- Cada electrón de valencia es compartido con otro átomo formando un enlace covalente
- A tan baja temperatura los electrones están quietos en cada átomo
- La estructura cristalina tiene carga neta nula
- **Próxima cápsula: ¿Qué sucede a mayor temperatura?**

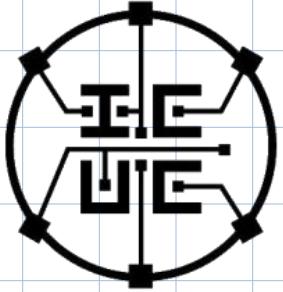


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

(en realidad la estructura cristalina forma un tetraedro regular)



3.03



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Semiconductores intrínsecos

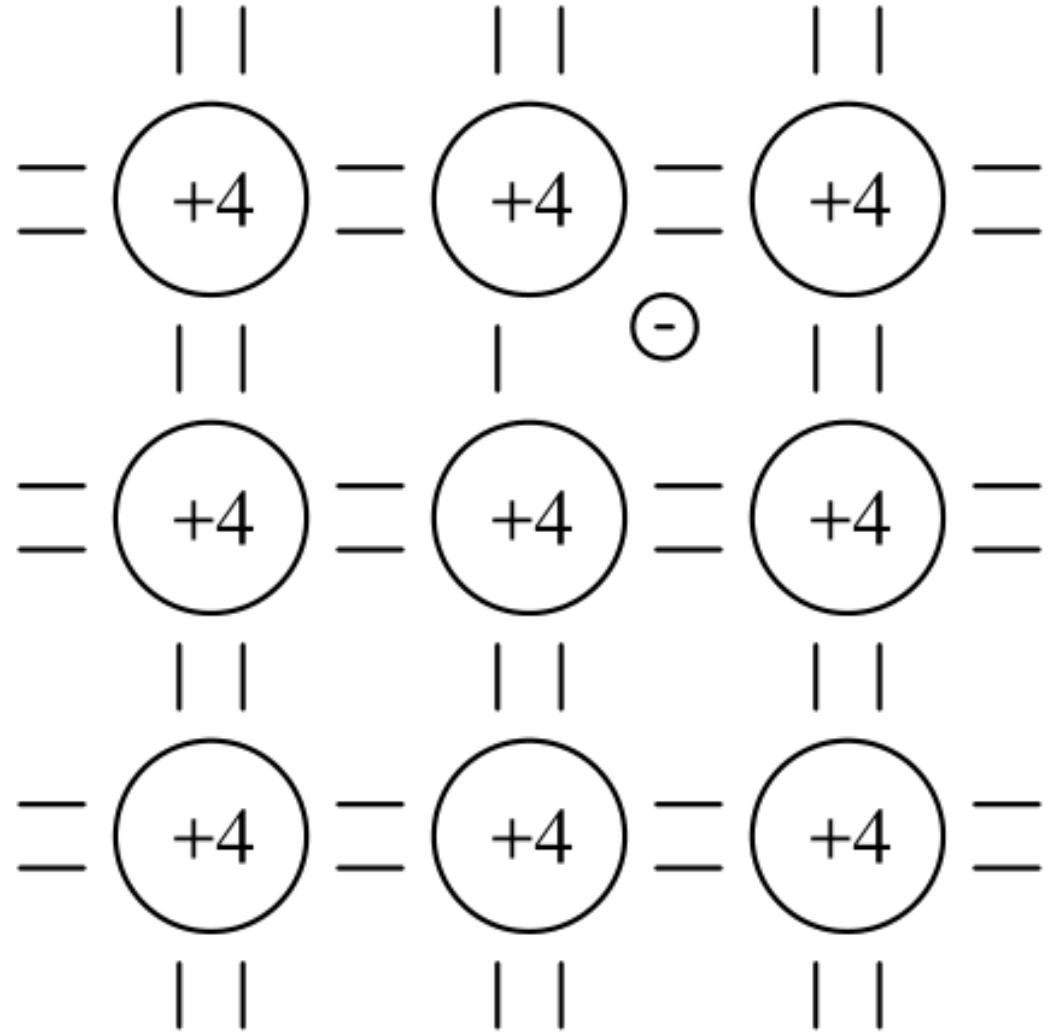
Dependencias:

- 3.02 Intro a física de semiconductores: Terminología

angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

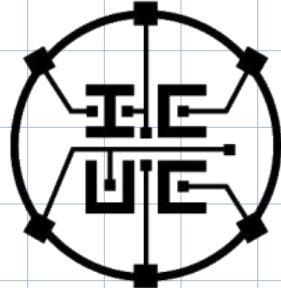
Aparición de portadores de corriente



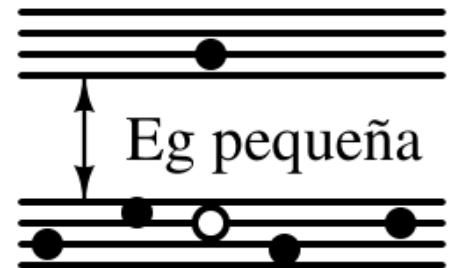
A temperatura ambiente algunos electrones pasan a banda de conducción y dejan un hueco

- El electrón libre y el hueco pueden conducir corriente
- **Ambos son portadores de carga**

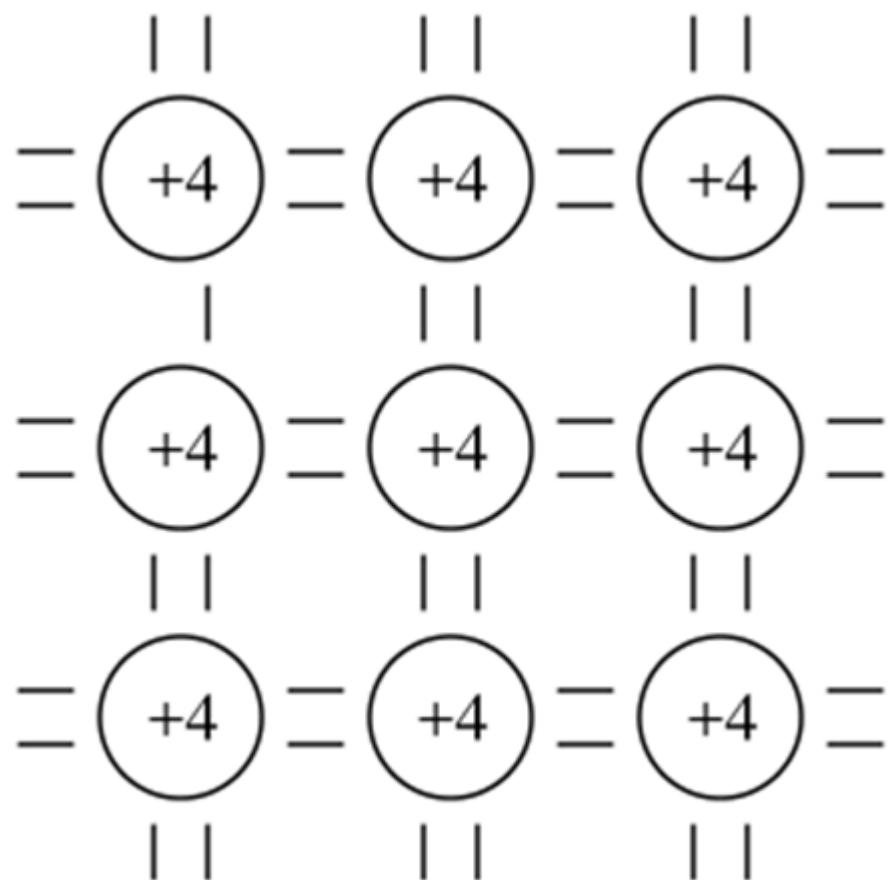
¿Cuál es la carga neta de la figura a la izquierda?
¿Cuál es la carga neta del átomo del centro?
¿Cuál es la carga neta en torno al hueco?



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

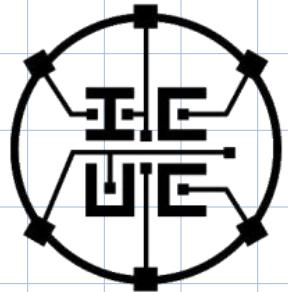


¿Cómo un hueco puede ser un portador de carga eléctrica?



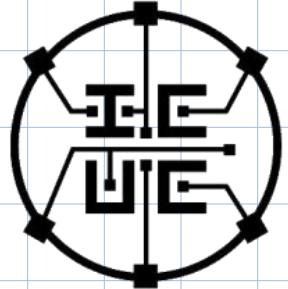
Si bien el hueco es la ausencia de un electrón en un enlace covalente, para todos los efectos prácticos el hueco es un portador de carga

- Tiene carga positiva igual a la del electrón en valor absoluto
- Tiene una concentración en un material
- Tiene movilidad diferente a la del electrón libre
- Tiene constante de difusión diferente a la del electrón libre

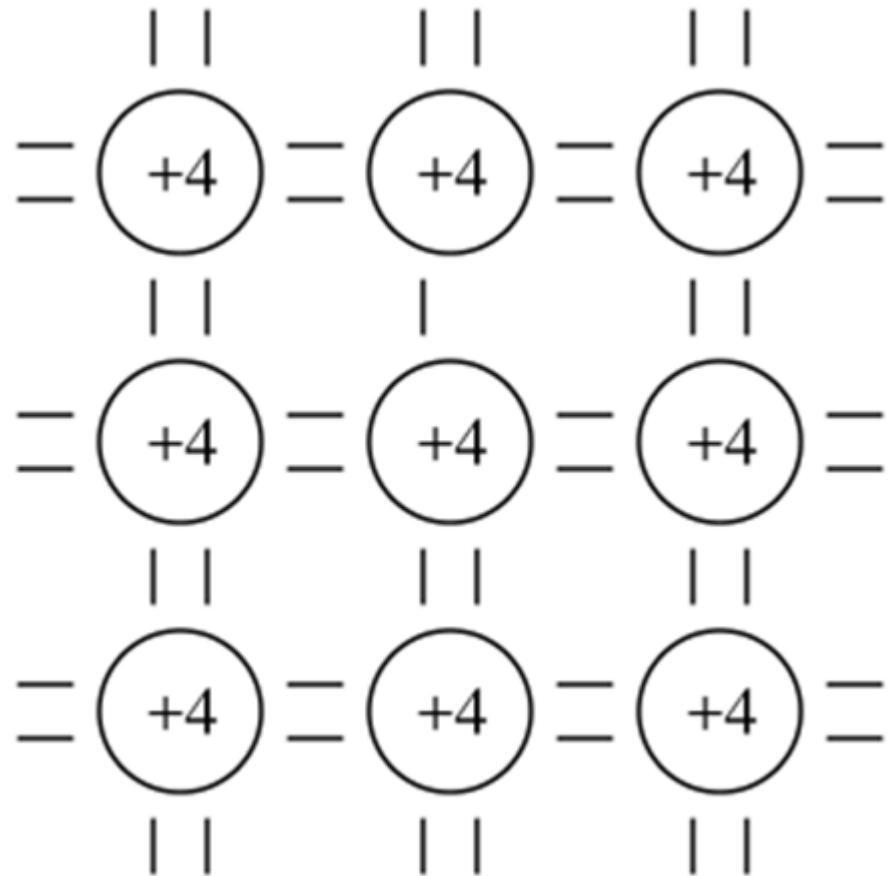


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

¿Cómo un hueco puede ser un portador de carga eléctrica?



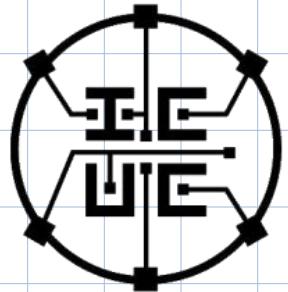
INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



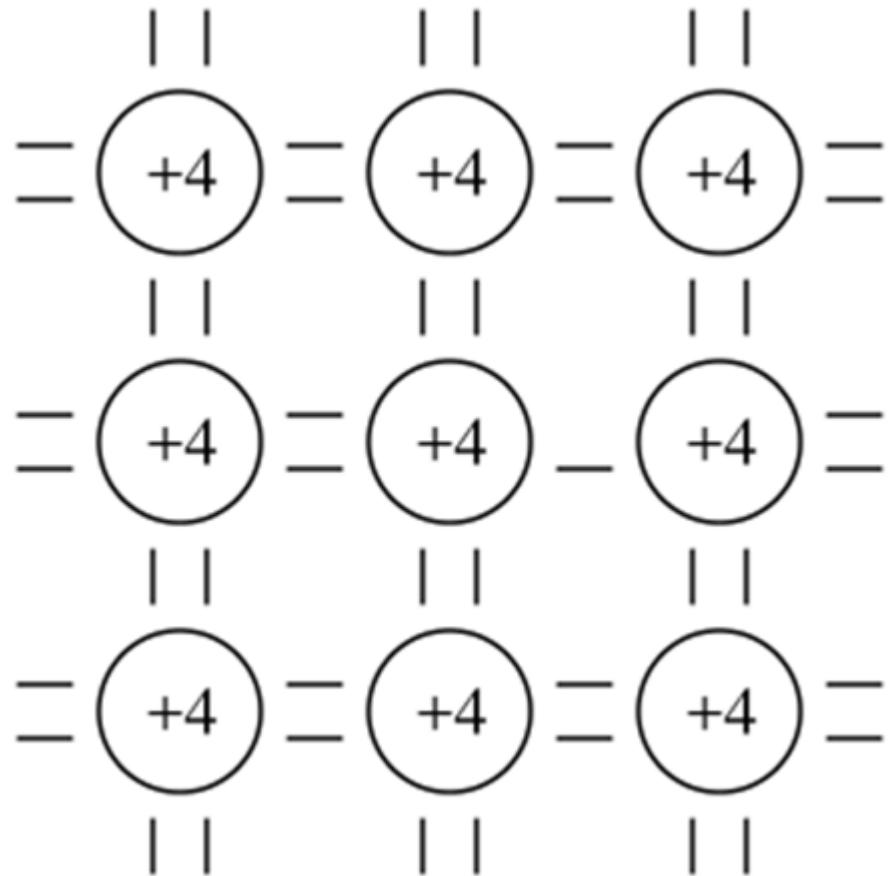
Si bien el hueco es la ausencia de un electrón en un enlace covalente, para todos los efectos prácticos el hueco es un portador de carga

- Tiene carga positiva igual a la del electrón en valor absoluto
- Tiene una concentración en un material
- Tiene movilidad diferente a la del electrón libre
- Tiene constante de difusión diferente a la del electrón libre

¿Cómo un hueco puede ser un portador de carga eléctrica?



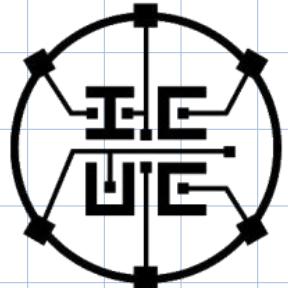
INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



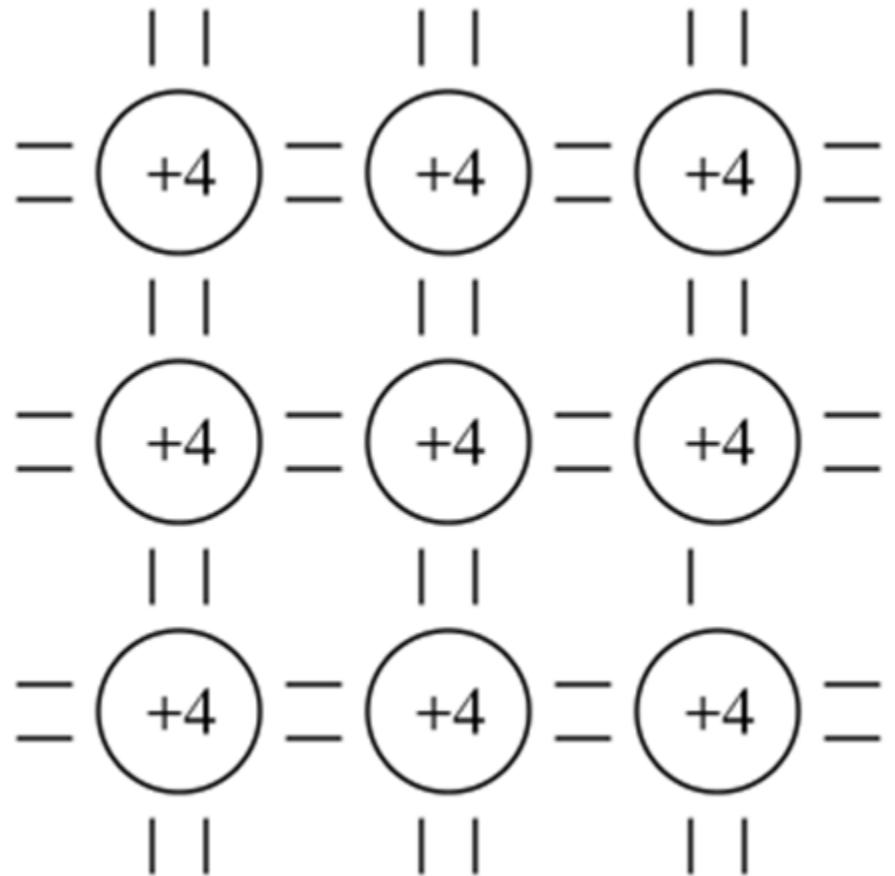
Si bien el hueco es la ausencia de un electrón en un enlace covalente, para todos los efectos prácticos el hueco es un portador de carga

- Tiene carga positiva igual a la del electrón en valor absoluto
- Tiene una concentración en un material
- Tiene movilidad diferente a la del electrón libre
- Tiene constante de difusión diferente a la del electrón libre

¿Cómo un hueco puede ser un portador de carga eléctrica?



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



Si bien el hueco es la ausencia de un electrón en un enlace covalente, para todos los efectos prácticos el hueco es un portador de carga

- Tiene carga positiva igual a la del electrón en valor absoluto
- Tiene una concentración en un material
- Tiene movilidad diferente a la del electrón libre
- Tiene constante de difusión diferente a la del electrón libre

Un semiconductor puro es un semiconductor intrínseco

- Un semiconductor puro tiene **igual número de electrones libres y de huecos**
- A una temperatura absoluta T (K), la **concentración intrínseca** o número de electrones libres y huecos por unidad de volumen es

$$n_i^2 = B \cdot T^3 e^{-\frac{E_G}{kT}}$$

$$B(Si) = 5.4 \cdot 10^{31} \left[\frac{1}{cm^2 K} \right]^3$$

$$E_G(Si) = 1.12[eV]$$

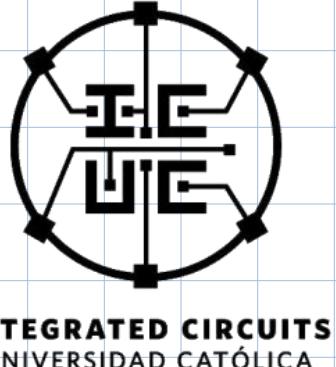
n_i = concentración de portadores de carga en material intrínseco

B = constante del material

E_G = energía de separación de banda

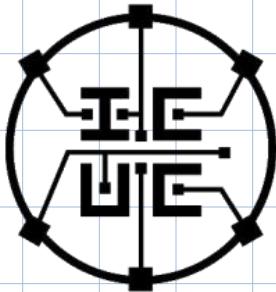
k = constante de Boltzmann

$$k = 8.62 \cdot 10^{-5} \left[\frac{eV}{K} \right]$$



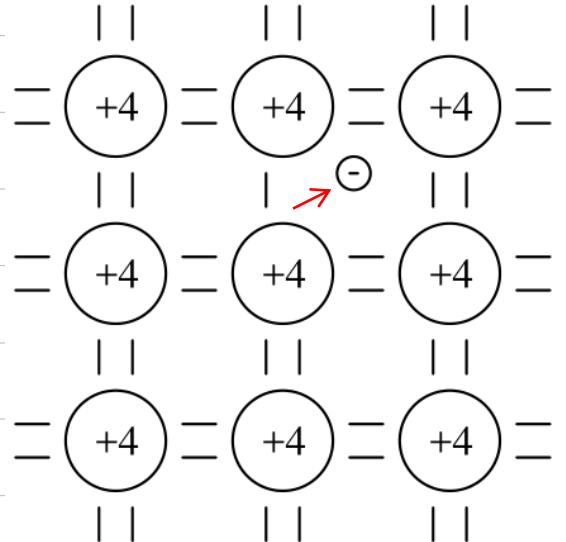
Ionización térmica y recombinación

- En equilibrio térmico, muchos electrones saltan a la banda de conducción y dejan un hueco (ionización)
- En la misma cantidad de tiempo, aproximadamente el mismo número de electrones libres caen a la posición de un hueco (recombinación)
- Permanentemente hay una concentración de $n = n_i$ electrones libres y $p = n_i$ huecos en el material

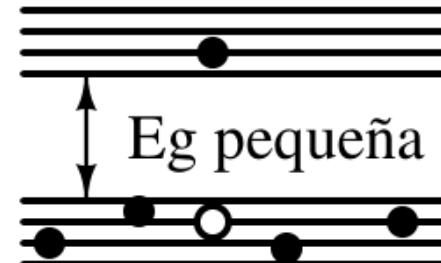
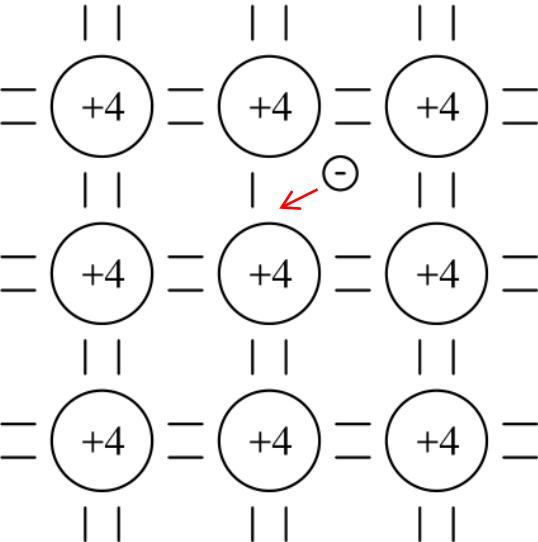


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Ionización térmica

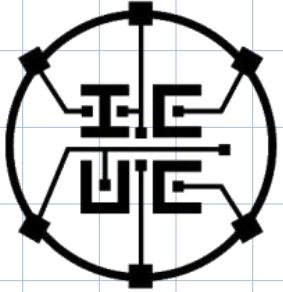


Recombinación





3.04



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Semiconductores extrínsecos

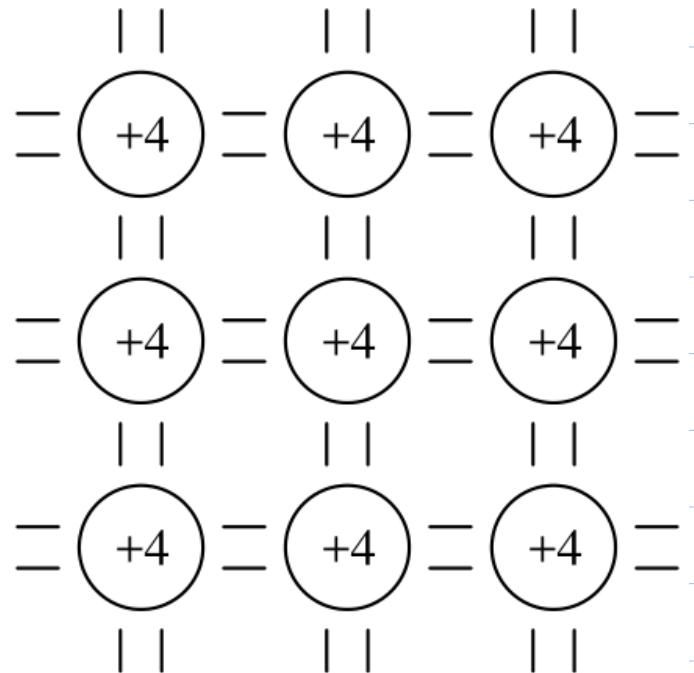
Dependencias:

- 3.02 Intro a física de semiconductores: Terminología
- 3.03 Semiconductores intrínsecos

angel@uc.cl

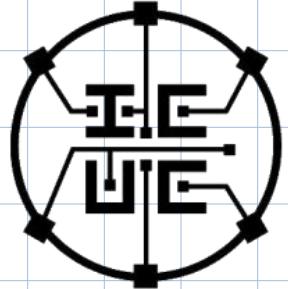
Electrónica en cápsulas

Volvamos a mirar la tabla periódica



5 B 10.811 Boro	6 C 12.0107 Carbono	7 N 14.0067 Nitrógeno
13 Al 26.981539 Aluminio	14 Si 28.0855 Silicio	15 P 30.973762 Fósforo
31 Ga 69.723 Galio	32 Ge 72.63 Germanio	33 As 74.9216 Arsénico
49 In 114.818 Indio	50 Sn 118.71 Estaño	51 Sb 121.76 Antimonio

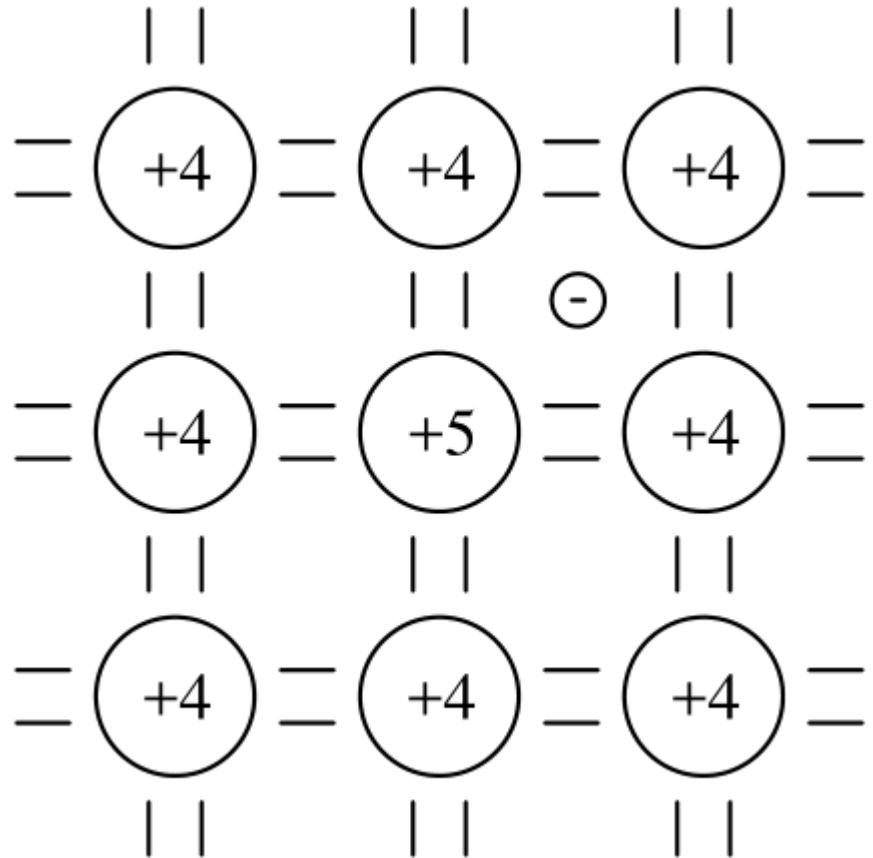
¿Qué sucedería si añadimos al material algunos átomos de la columna de la derecha o de la izquierda del silicio?



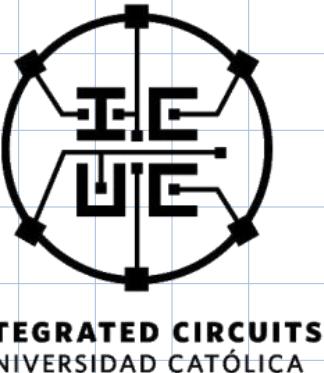
INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Añadamos una concentración N_D de átomos pentavalentes: Material tipo N

- El átomo pentavalente tiene un electrón más de los necesarios para formar enlaces covalentes
- Ese electrón queda libre para conducir corriente

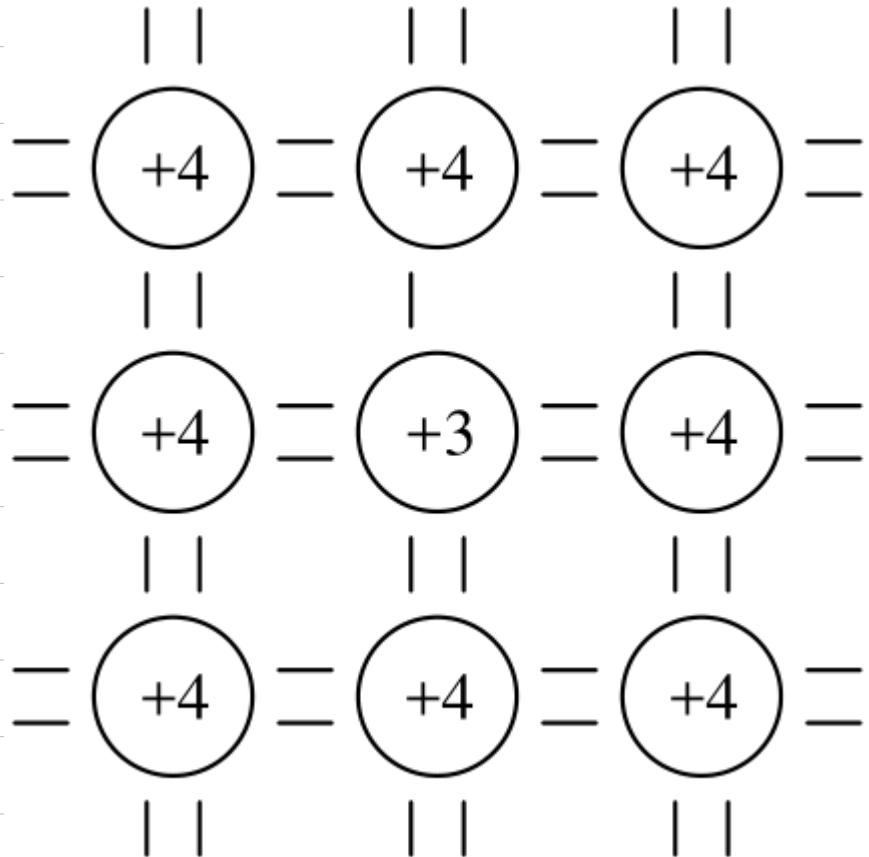


¿Cuál es la carga neta de la estructura representada en la figura?



Añadamos una concentración N_A de átomos trivalentes: Material tipo P

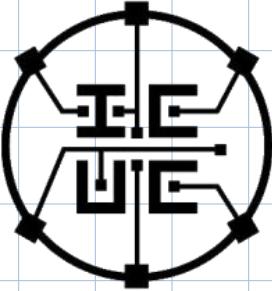
- El átomo trivalente tiene un electrón menos de los necesarios para formar enlaces covalentes
- Esa ausencia de electrón es un hueco que puede conducir corriente



¿Cuál es la carga neta de la estructura representada en la figura?

Semiconductores extrínsecos: están dopados con impurezas intencionales

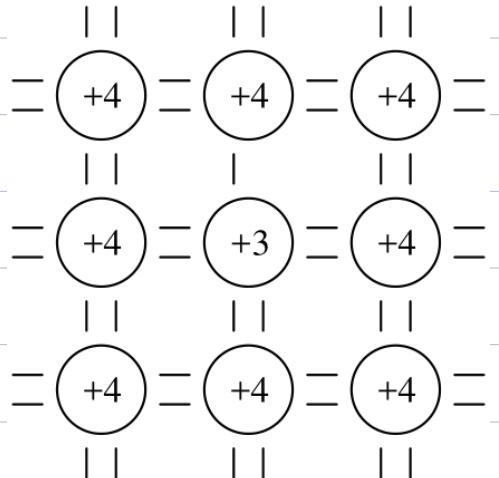
Ley de Acción de Masas: Para un material determinado, el producto $n \cdot p$ depende sólo de la temperatura



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

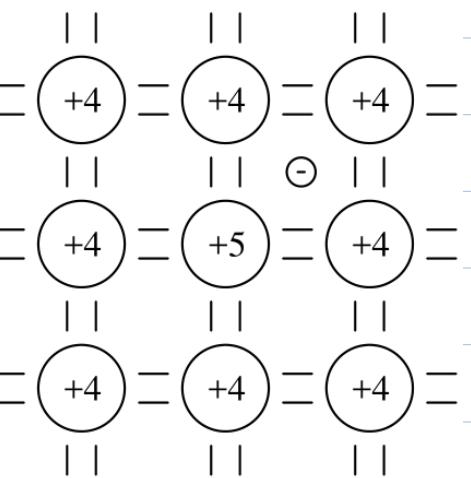
$$n \cdot p = n_i^2$$

Material tipo P: $n \ll p$



$$n_n \approx N_D \rightarrow p_n \approx \frac{n_i^2}{N_D}$$

Material tipo N: $n \gg p$



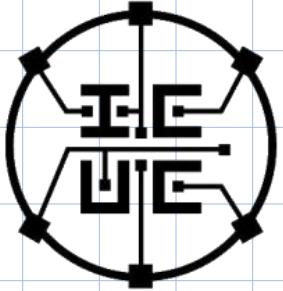
$$p_p \approx N_A \rightarrow n_p \approx \frac{n_i^2}{N_A}$$

Recordemos de (3.03):

$$n_i^2 = B \cdot T^3 e^{-\frac{E_G}{kT}}$$



3.05



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Corrientes de desplazamiento

Dependencias:

- 3.02 Intro a física de semiconductores: Terminología
- 3.04 Semiconductores extrínsecos

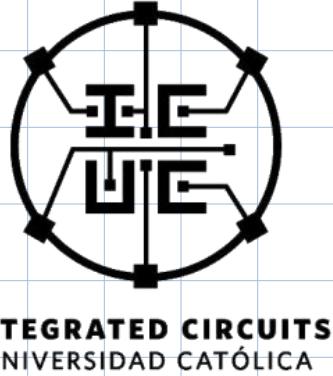
angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

Dos tipos de corriente

- En los semiconductores existen dos tipos de corriente:
 - Corrientes de difusión
 - Corrientes de desplazamiento
- Ambas pueden ocurrir debido al movimiento de electrones o al movimiento de huecos
- Las corrientes de desplazamiento explican la resistividad de los materiales
- Ambos tipos de corrientes son relevantes en el funcionamiento de dispositivos semiconductores

Para analizar estas corrientes lo haremos en su forma diferencial: hablaremos de densidades de corriente por unidad de área



Corrientes de desplazamiento I_s

Se deben al movimiento de portadores de carga
debido a un campo eléctrico externo E

$$I = -q \cdot n \cdot v_n \cdot A$$

Dividiendo por el área y aplicando a las corrientes de huecos

$$J_n = -q \cdot n \cdot v_n$$

$$J_p = +q \cdot p \cdot v_p$$

Pero...

$$v_n = -\mu_n \cdot E$$

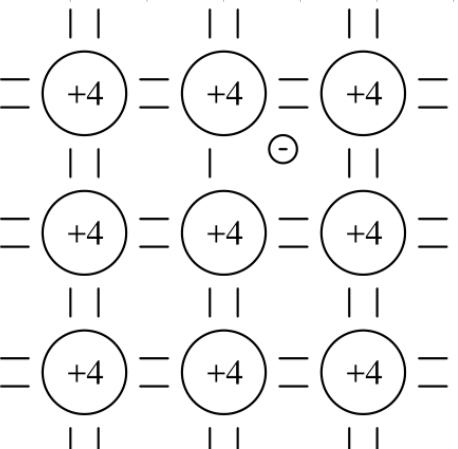
$$v_p = +\mu_p \cdot E$$

Luego

$$J_n = +q \cdot n \cdot \mu_n \cdot E$$

$$J_p = +q \cdot p \cdot \mu_p \cdot E$$

Podemos despejar la conductividad: $\sigma = q \cdot (p \cdot \mu_p + n \cdot \mu_n)$



n = concentración de electrones libres

p = concentración de huecos

A = área o sección transversal

J_n = densidad de corriente debida a electrones

J_p = densidad de corriente debida a huecos

v_n = velocidad promedio de electrones libres

v_p = velocidad promedio de huecos

E = campo eléctrico externo

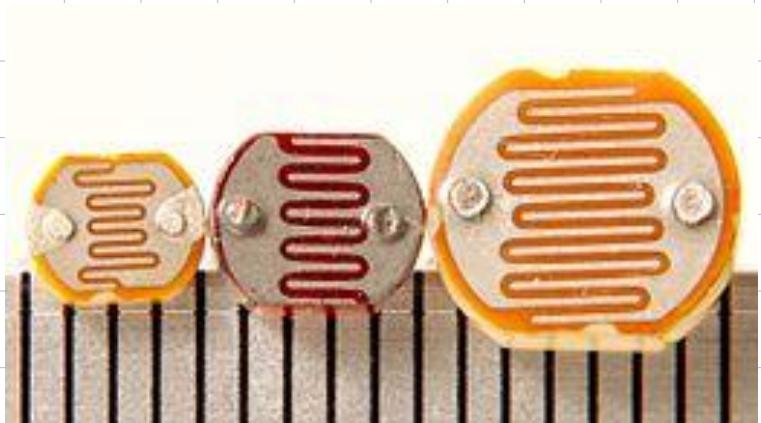
$$\mu_n(Si) = 1350 \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$$

$$\mu_p(Si) = 480 \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$$

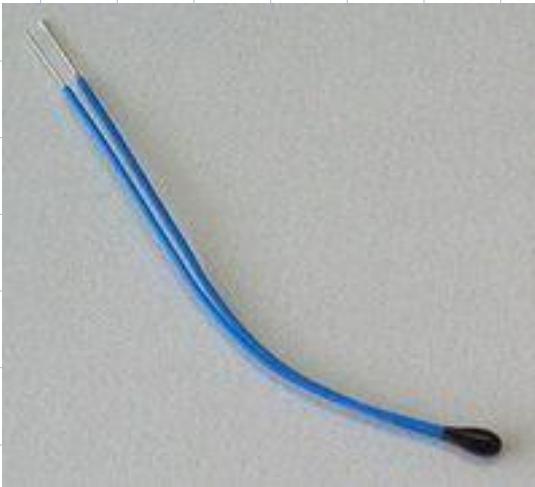
Valores referenciales

Ejemplos de corrientes de desplazamiento en materiales semiconductores

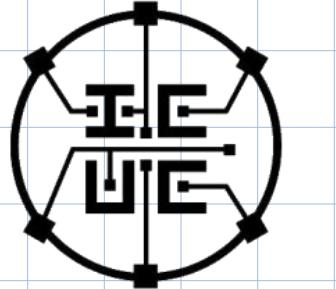
- LDR o fotorresistor (extrínsecos o intrínsecos)
- Termistor
 - PTAT (PTC) o NTC
 - No todos los termistores son semiconductores



By Junkyardsparkle (Own work) [CC0],
via Wikimedia Commons

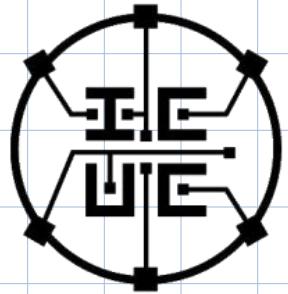


By Ansgar Hellwig (photo taken with Canon PowerShot G3) [CC BY-SA 2.0 de (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/de/deed.en>)], via Wikimedia Commons





3.06



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Corrientes de difusión

Dependencias:

- 3.02 Intro a física de semiconductores: Terminología
- 3.04 Semiconductores extrínsecos
- 3.05 Corrientes de desplazamiento

angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

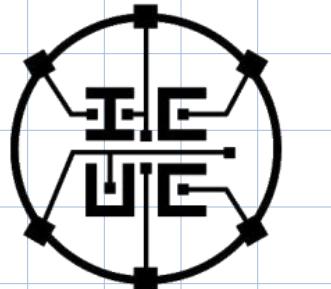
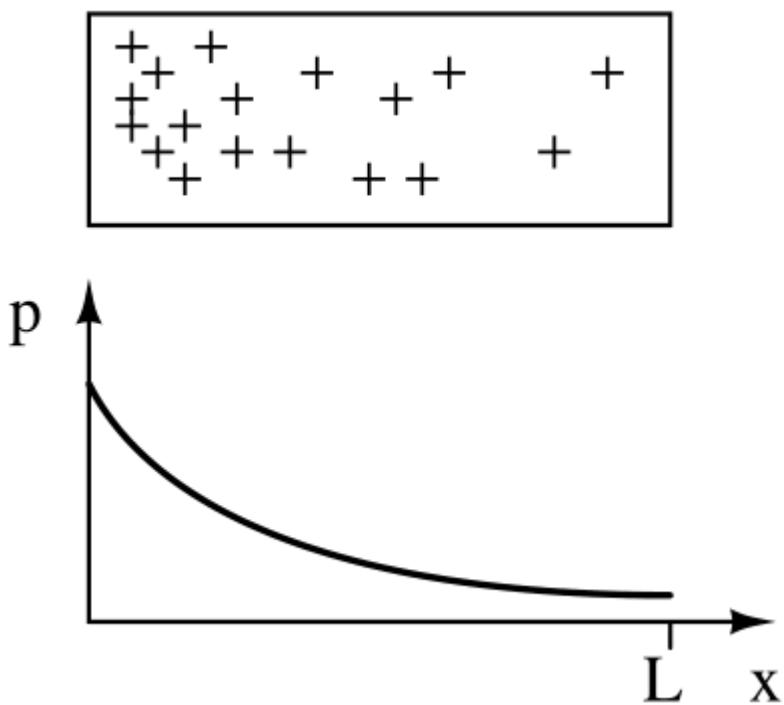
Corrientes de difusión

Difusión: Movimiento aleatorio de los portadores, asociado con la agitación térmica

Corriente de Difusión I_D :
Movimiento de cargas desde zonas de alta concentración hacia zonas de baja concentración

$$J_n = +qD_n \frac{dn}{dx}$$

$$J_p = -qD_p \frac{dp}{dx}$$



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

$$D_n(Si) = 34 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

$$D_p(Si) = 12 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

Valores referenciales

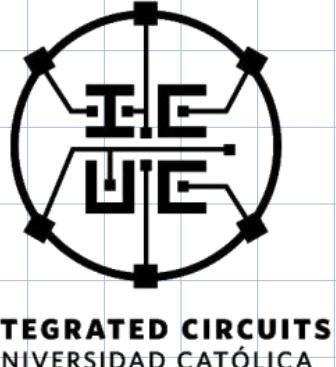
Relación de Einstein

Relación entre movilidad y coeficiente de difusión

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{q} = V_T$$

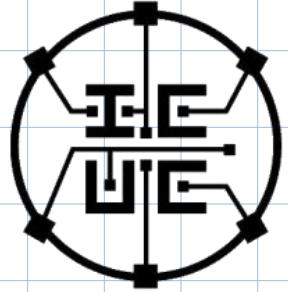
Voltaje térmico

- bajo coeficiente de difusión implica que los portadores se moverán lentamente...
- Aumento de temperatura reduce movilidad, porque reduce caminos libres para los portadores
 - Reducción de caminos libres también reduce coeficiente de difusión





3.07



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

El diodo de unión – curva y modelo de gran señal

Dependencias:

- 3.01 El diodo como válvula de corriente

angel@uc.cl

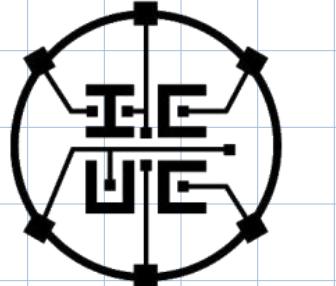
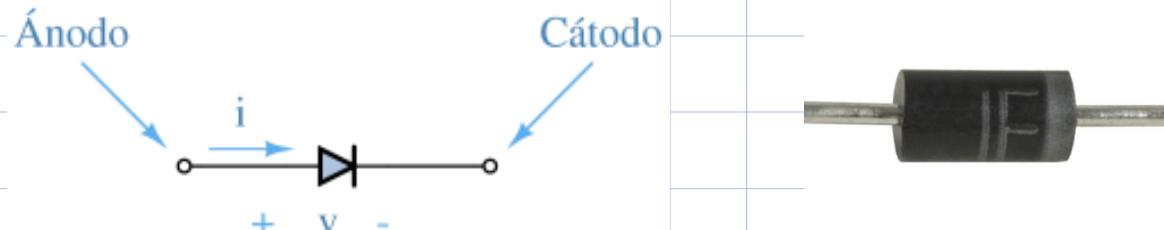
Electrónica en cápsulas

El diodo

El diodo es un dispositivo electrónico de dos terminales que conduce corriente eléctrica en una sola dirección (idealmente).

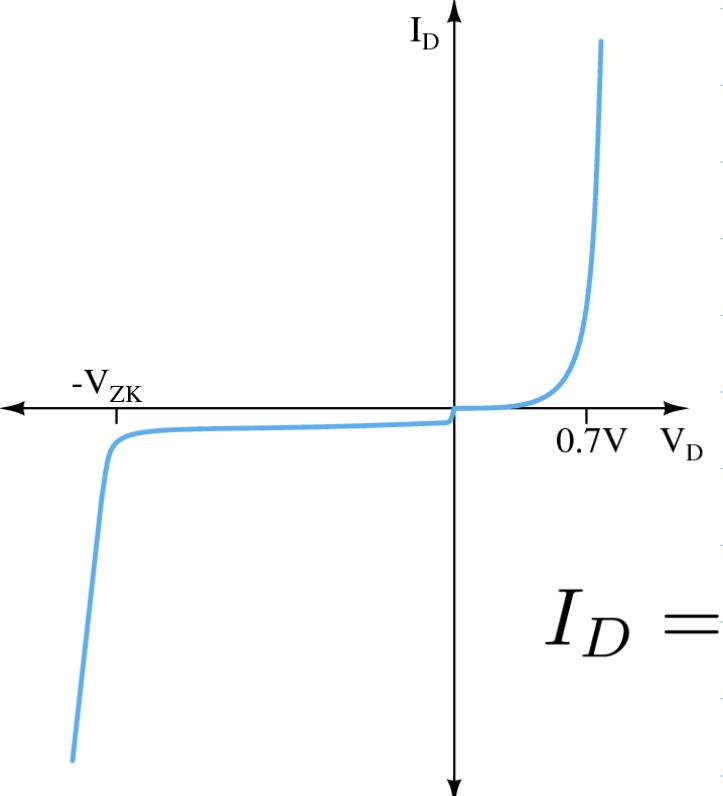
La función más común de los diodos es la rectificación (conversión de ac a dc), pero también son usados en detección, producción de luz, regulación de voltaje, capacitancia variable (útil en **VCO**), etc.

Los diodos son dispositivos no lineales. La mejor forma de estudiarlos es a través de su curva de transferencia estática.



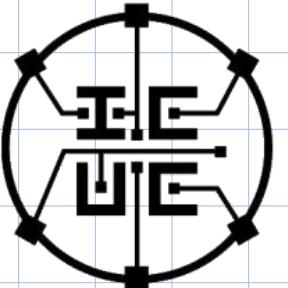
Curva del diodo y regiones de operación

Región de Operación	Característica
Polarización inversa	Switch abierto, $I_D \approx -(I_S + I_{\text{leak}})$, I_D es idealmente cero; alta impedancia
Polarización directa	Switch cerrado, $V_D \approx 0.7V$ (silicio), V_D es idealmente cero; baja impedancia
Ruptura	Switch cerrado, $V_D \approx -V_{ZK}$, baja impedancia



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

Supongamos polarización directa. ¿En cuánto cambia el voltaje del diodo cuando la corriente aumenta en 10x? Veamos...



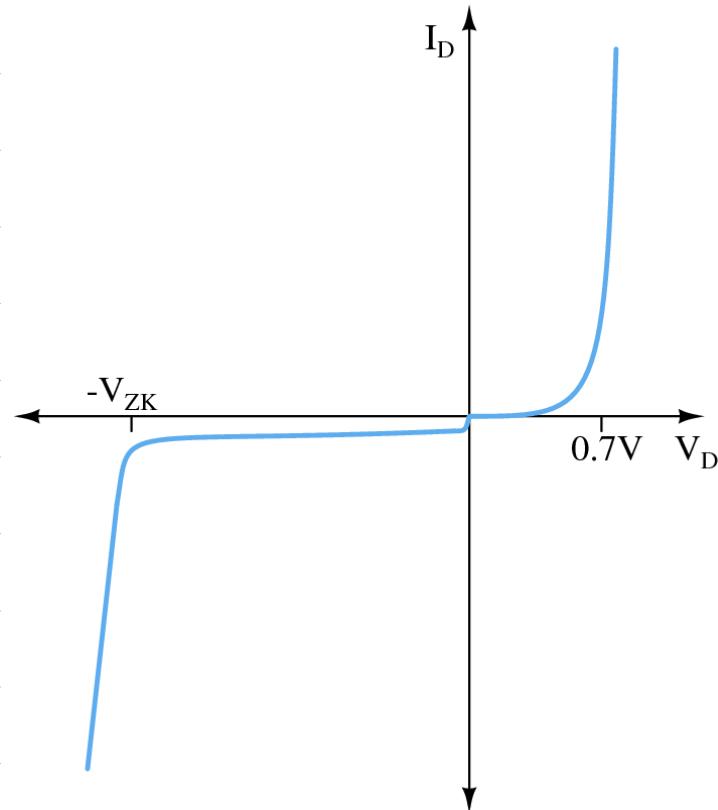
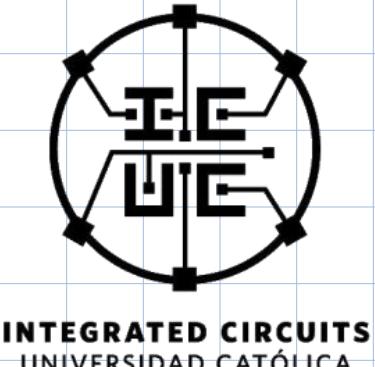
Ecuación para voltaje y consecuencias

- Despejando V_D :

$$V_D = nV_T \ln \left(\frac{I_D}{I_S} + 1 \right) \approx nV_T \ln \left(\frac{I_D}{I_S} \right)$$

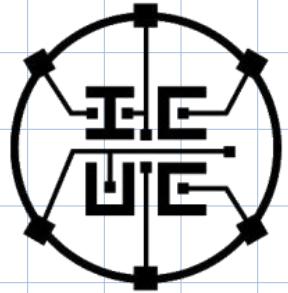
- Veamos cómo es el cambio de voltaje para una razón de corrientes de 10x:

- Este resultado es aproximadamente 25mV a temperatura ambiente para $n=1$





3.08



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

La unión PN

Dependencias:

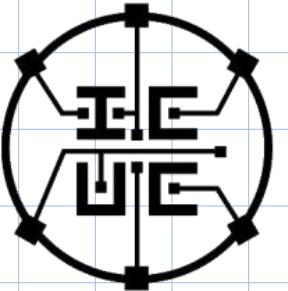
- 3.02 Intro a física de semiconductores: Terminología
- 3.04 Semiconductores extrínsecos

angel@uc.cl

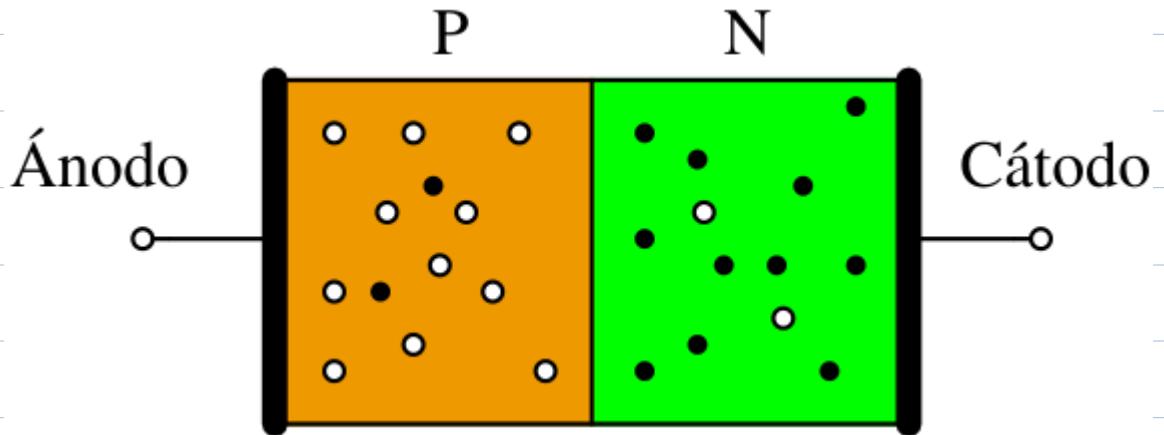
Electrónica en cápsulas

La unión PN

- Es la unión entre un material tipo P y un material tipo N
 - Se logra mediante la creación de regiones tipo P y N adyacentes en un cristal semiconductor
 - Otros tipos de interacción en semiconductores: contacto óhmico, contacto en un punto (point contact)
 - La unión PN es de gran importancia en electrónica
 - En la región p hay un exceso de huecos. En la región n hay un exceso de electrones libres.
- ¿Qué pasará en la unión misma?**

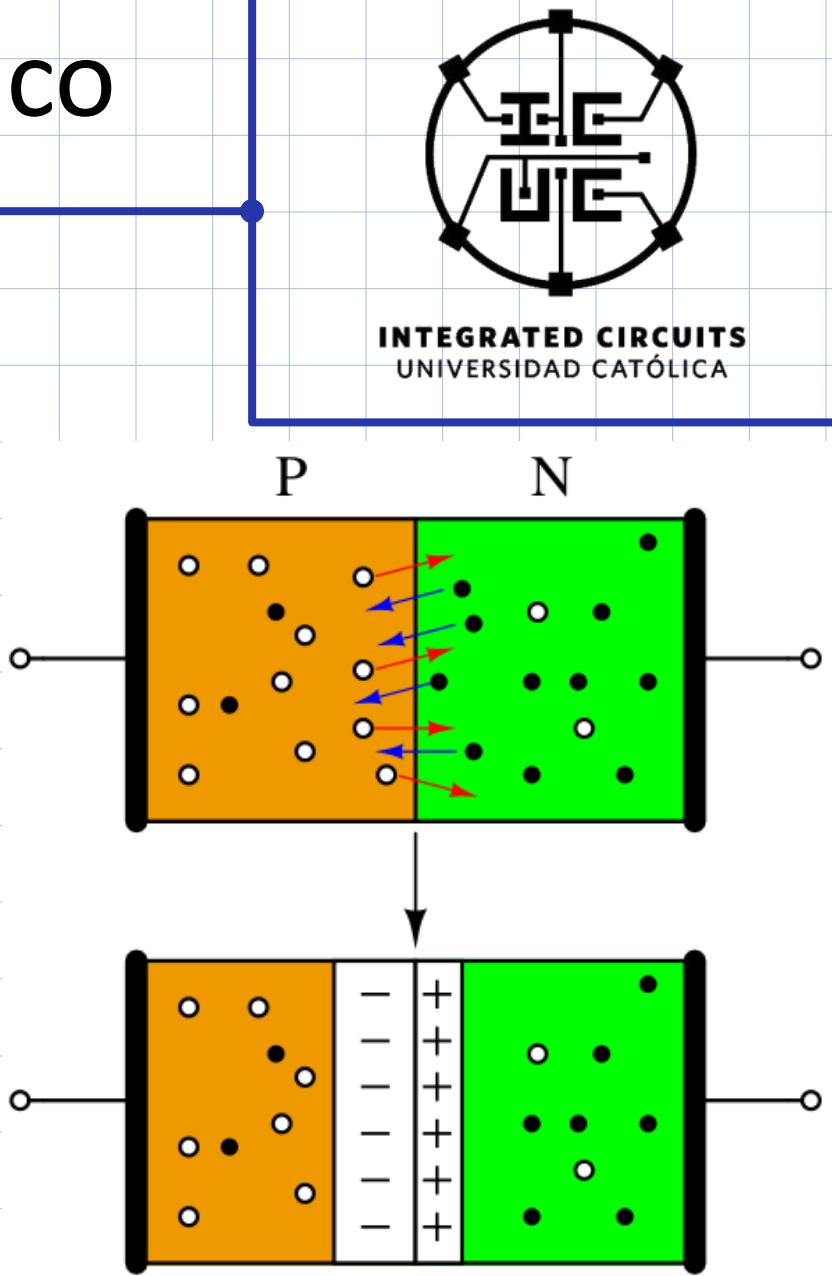


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



La unión PN en equilibrio térmico

- Huecos (portadores mayoritarios en región P) se **difunden a la derecha**
 - Corriente de difusión hacia la derecha
- Electrones (portadores mayoritarios en región N) se **difunden a la izquierda**
 - Corriente de difusión hacia la derecha
- En torno a la unión queda **carga neta al descubierto**
 - Esto produce una **barrera de potencial** que se opone a que continúe la difusión
 - En torno a la unión no quedan portadores de carga – se forma una **región de agotamiento**



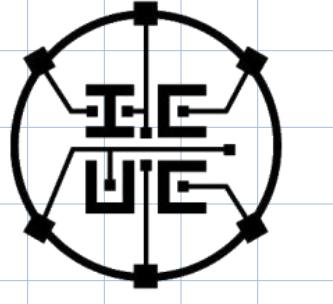
Voltaje integral de la unión V_{bi}

- Debido a la carga latente al descubierto en la unión, aparece un campo eléctrico
- La integral de dicho campo es, en efecto, un voltaje entre los extremos de la región de agotamiento
- Ese voltaje V_{bi} representa una **barrera de potencial** que los portadores de carga tienen que superar para que haya conducción de corriente
 - A V_{bi} se le suma (o resta) el voltaje de polarización externo del diodo
 - Por eso el diodo requiere un cierto voltaje en polarización directa para conducir

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2}$$

típicamente 0.6 V a 0.8 V en silicio,
0.3 V en germanio
y menor que E_G/q (no hay una relación directa)

El diodo no es una batería y no es posible medir V_{bi} externamente

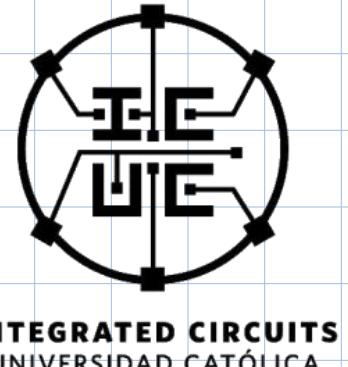


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Ancho de la región de agotamiento (sin voltaje externo)

- Igual cantidad de carga en ambos lados:
- En general, niveles de dopaje en N y P son diferentes
 - Implica diferentes concentraciones y diferentes alcances de la región de agotamiento en cada lado de la unión
 - Modelo simple asume unión abrupta

$$qx_p A N_A = qx_n A N_D \Rightarrow \frac{x_n}{x_p} = \frac{N_A}{N_D}$$



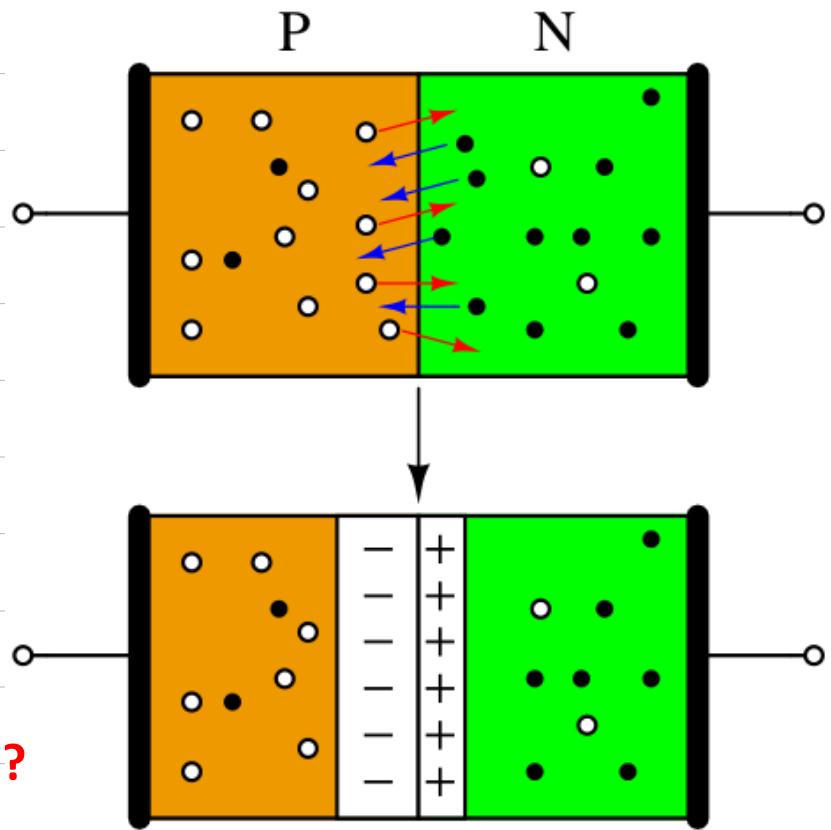
$$W_{\text{dep}} = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) V_{\text{bi}}}$$

permitividad del silicio: $\epsilon_s = 11.7 \times \epsilon_0 = 1.04 \cdot 10^{-12} \text{ F/cm}$

$0.1\mu\text{m} < W_{\text{dep}} < 1\mu\text{m}$

El silicio intrínseco es un dieléctrico; en torno al silicio intrínseco hay regiones conductoras

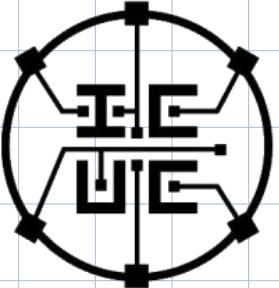
¿A qué componente circuital se asemeja la región de agotamiento?



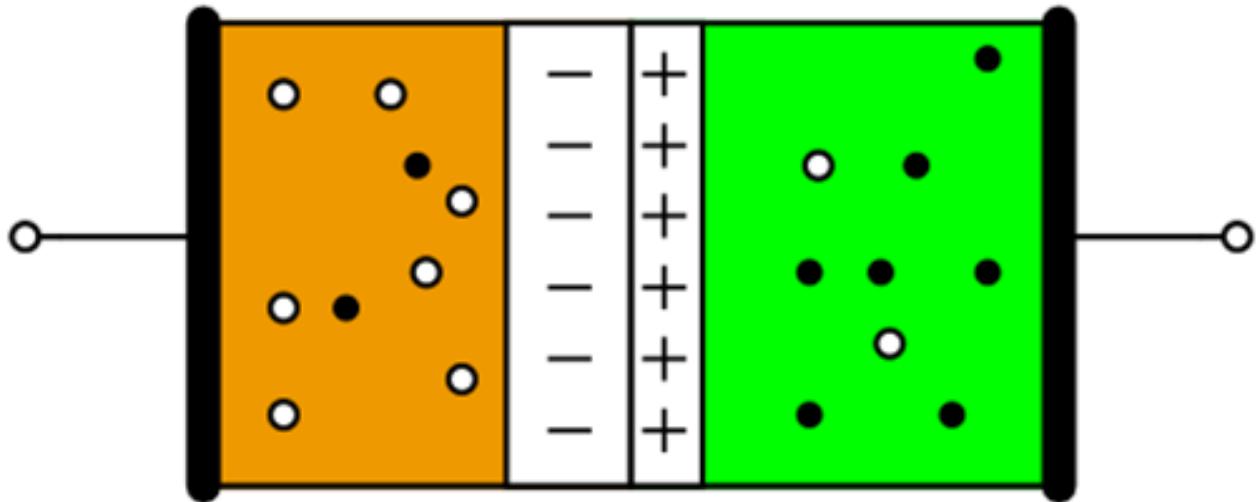
Capacitancia en la unión (sin voltaje externo)

La capacitancia de la unión de agotamiento es

$$C_{j0} = A \sqrt{\frac{\epsilon_s q}{2}} (N_A \parallel N_D) \frac{1}{V_{bi}}$$

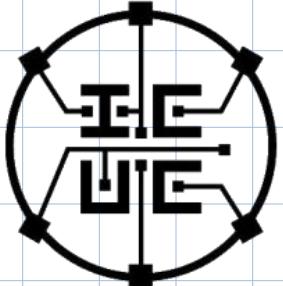


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA





3.09



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

La unión PN en polarización inversa y ruptura

Dependencias:

- 3.02 Intro a física de semiconductores: Terminología
- 3.04 Semiconductores extrínsecos
- 3.07 El diodo de unión, curva y modelos de gran señal
- 3.08 La unión PN

angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

Polarización inversa aplicando voltaje V_R

- Voltaje externo se suma a V_{bi}
 - Consecuentemente, W_{dep} crece

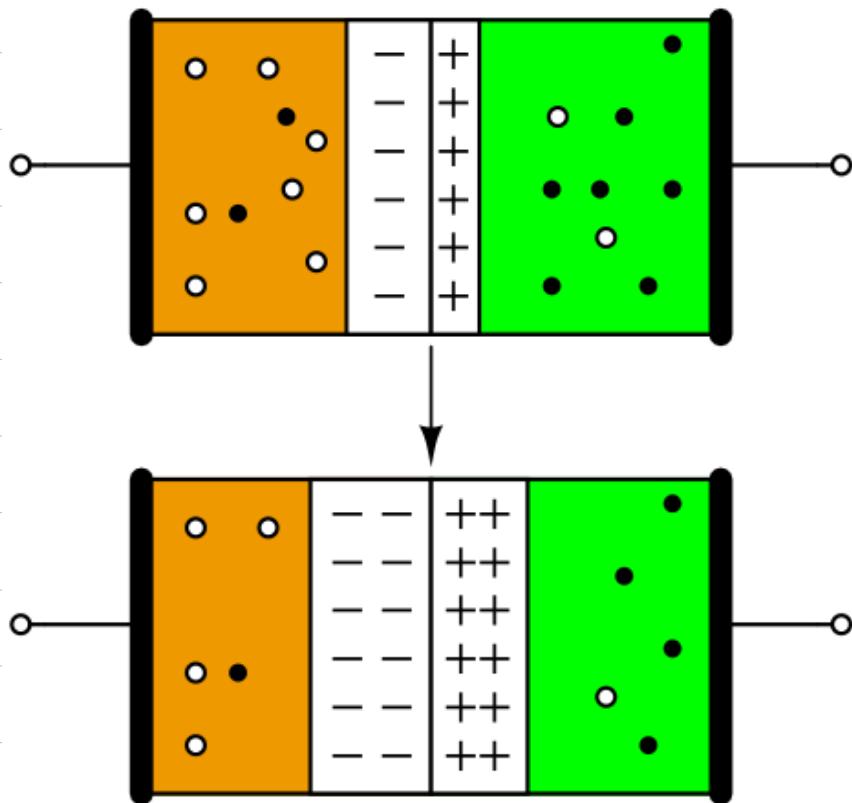
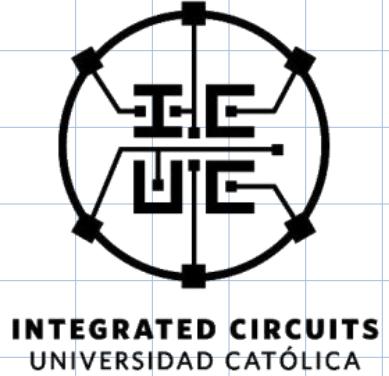
$$W_{dep} = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (V_{bi} + |V_R|)}$$

- $I = I_S - I_D$, muy parecida a I_S , e idealmente, independiente de V
 - En la práctica, $I >> I_S$ debido a fuga, y depende de V en alguna medida
- Capacitancia C_j depende de V :

$$C_j = \frac{C_{j0}}{\left(1 + \frac{|V_R|}{V_{bi}}\right)^m}$$

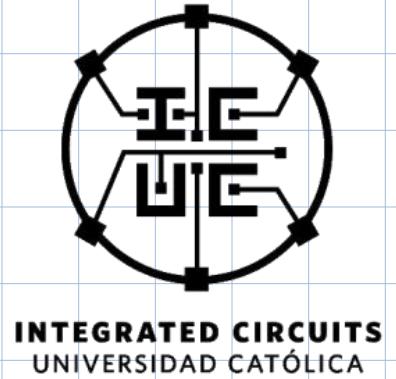
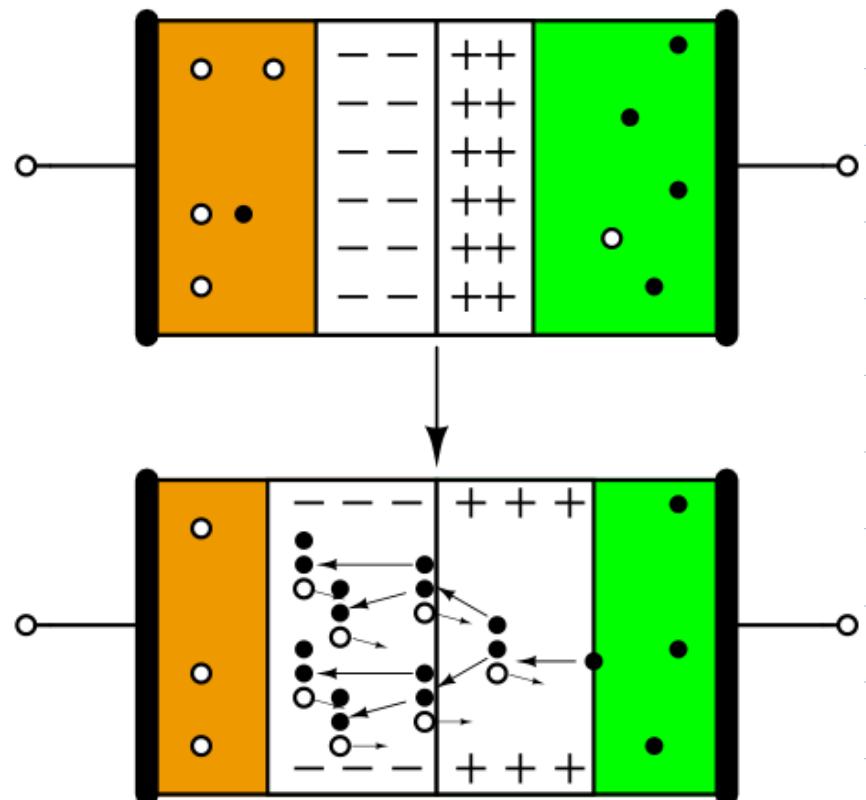
Coeficiente de graduación

$$\text{Recordemos de 3.07: } C_{j0} = A \sqrt{\frac{\epsilon_s q}{2} (N_A \parallel N_D)} \frac{1}{V_{bi}}$$



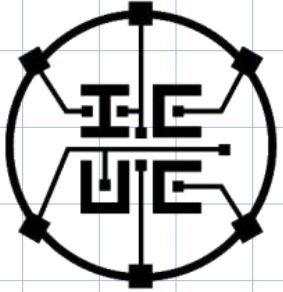
Región de ruptura ($|V_R|$ grande)

- La ruptura ocurre cuando voltaje inverso excede voltaje de ruptura (breakdown) o rodilla (knee) V_{ZK}
- Puede ser debido a efecto túnel (diodos Zener) o efecto avalancha, o una combinación de ambos
- En avalancha, si crece la temperatura, crece $|V_{ZK}|$
- La curva I-V en caso de efecto túnel es menos abrupta que en avalancha y su dependencia de la temperatura es opuesta
- Combinación es insensible a temperatura





3.10



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

La unión PN en polarización directa

Dependencias:

- 3.02 Intro a física de semiconductores: Terminología
- 3.04 Semiconductores extrínsecos
- 3.07 El diodo de unión, curva y modelo de gran señal
- 3.08 La unión PN

angel@uc.cl

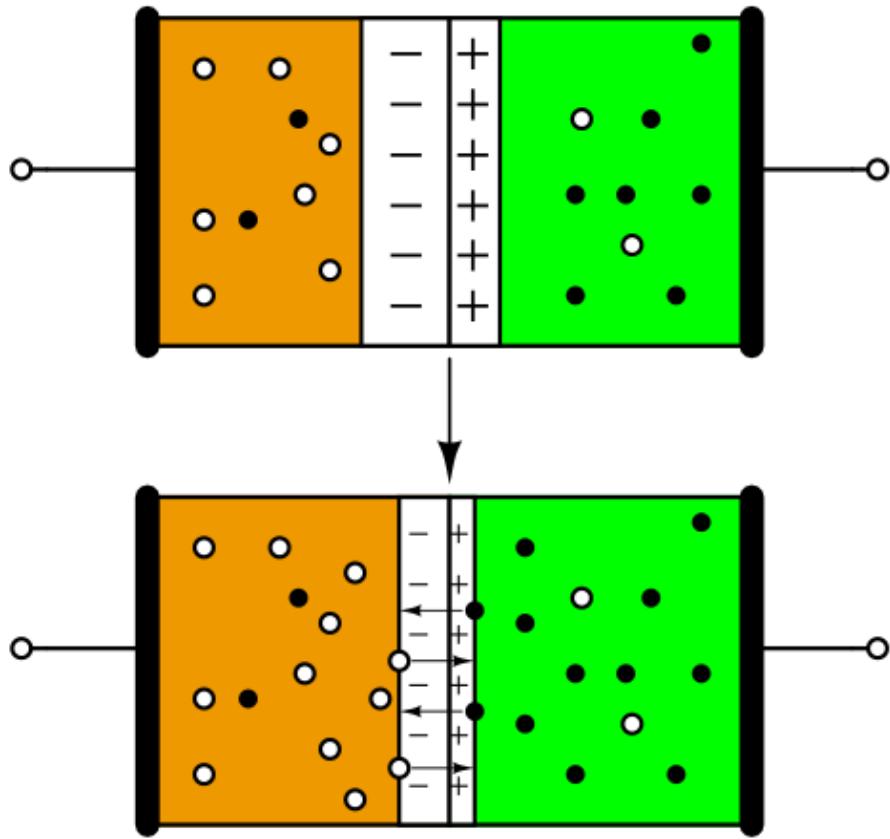
Electrónica en cápsulas

Aplicamos voltaje externo V_D

- Voltaje externo se resta de V_{bi}
 - Consecuentemente, W_{dep} decrece
 - La capacitancia crece

$$C_j \approx 2C_{j0}$$

- La barrera de potencial decrece
- Fuente externa inyecta huecos en región P y electrones en región N
- Ambos portadores mayoritarios cruzan la barrera y se convierten en portadores minoritarios
 - Exceso de e^- en región P
 - Exceso de h^+ en región N
- Recombinación reduce concentraciones lejos de la unión, produciendo gradiente de concentración
 - Crecen corrientes de difusión



Calculemos la corriente I_D (1/2)

Corrientes de difusión de portadores minoritarios predominan;
haciendo un análisis simple (asumiendo distribuciones lineales)

$$J_N = -q \cdot D_N \frac{dn_p(x)}{dx} \quad J_P = +q \cdot D_P \frac{dp_n(x)}{dx}$$

Asumiendo linealidad y longitudes de difusión L_p y L_n ,

$$J_N = -q \cdot D_N \frac{n_p(-W_p) - n_{pe}}{L_n} \quad J_P = +q \cdot D_P \frac{p_{ne} - p_n(W_n)}{L_p}$$

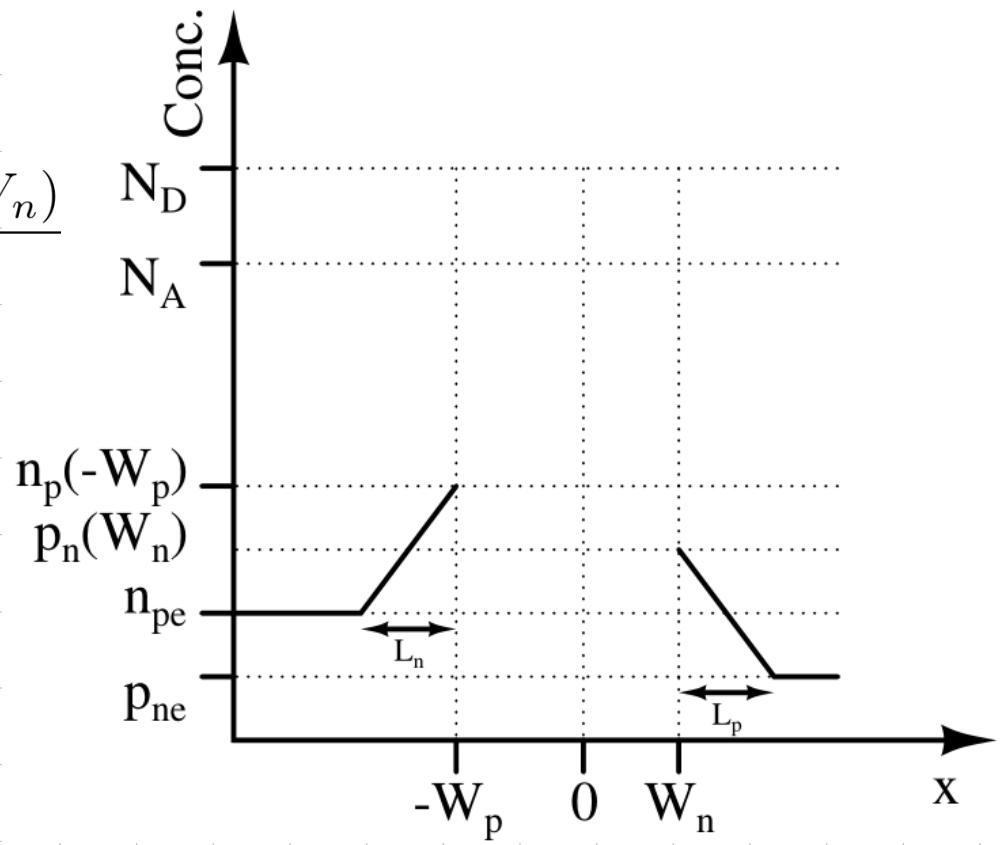
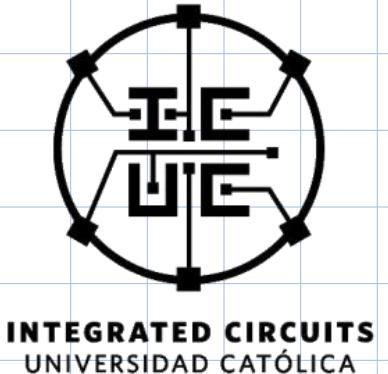
De la física de semiconductores (estadísticas Fermi-Dirac),

$$n_p(-W_p) = n_{pe} e^{V_D/V_T} \quad p_n(W_n) = p_{ne} e^{V_D/V_T}$$

Reemplazando,

$$J_N = q \cdot \frac{D_N}{L_n} \cdot n_{pe} \left(e^{V_D/V_T} - 1 \right)$$

$$J_P = q \cdot \frac{D_P}{L_p} \cdot p_{ne} \left(e^{V_D/V_T} - 1 \right)$$



Calculemos la corriente I_D (2/2)

Sumando ambas componentes,

$$J = J_N + J_P = q \cdot \left(\frac{D_N n_{pe}}{L_n} + \frac{D_P p_{ne}}{L_p} \right) \left(e^{V_D/V_T} - 1 \right)$$

Pero $n_{pe} = n_i^2/N_A$; $p_{ne} = n_i^2/N_D$

$$J = -qn_i^2 \left(\frac{D_N}{L_n N_A} + \frac{D_P}{L_p N_D} \right) \left(e^{V_D/V_T} - 1 \right)$$

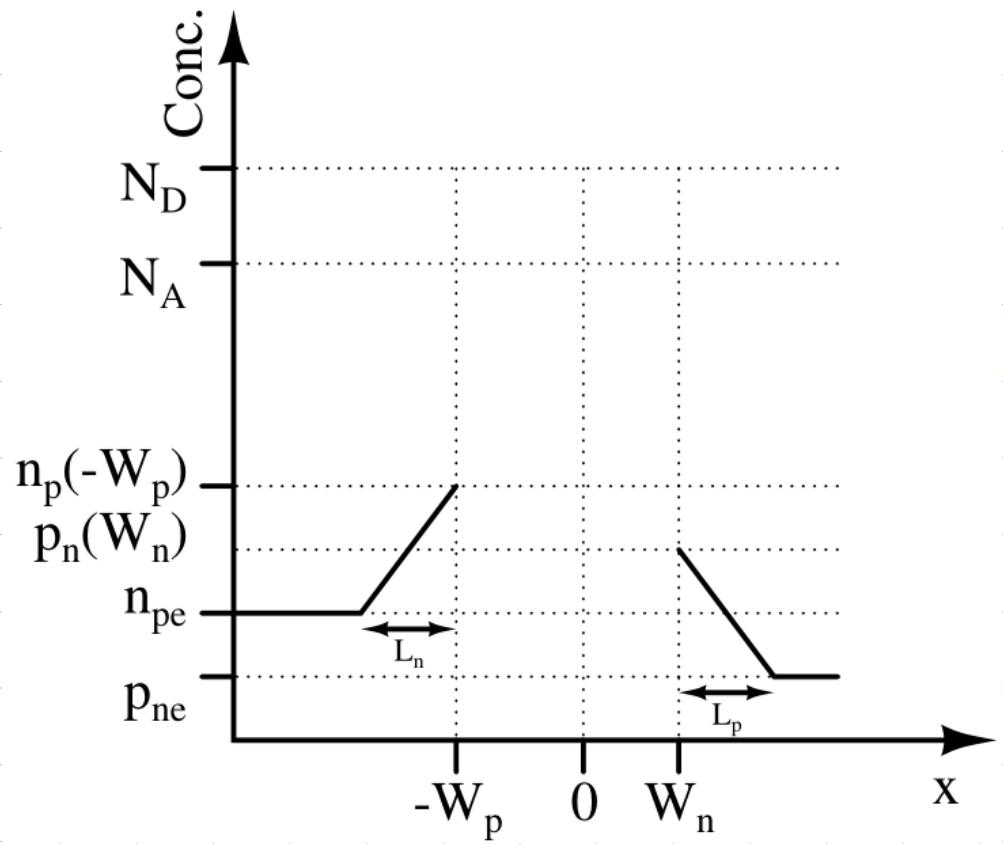
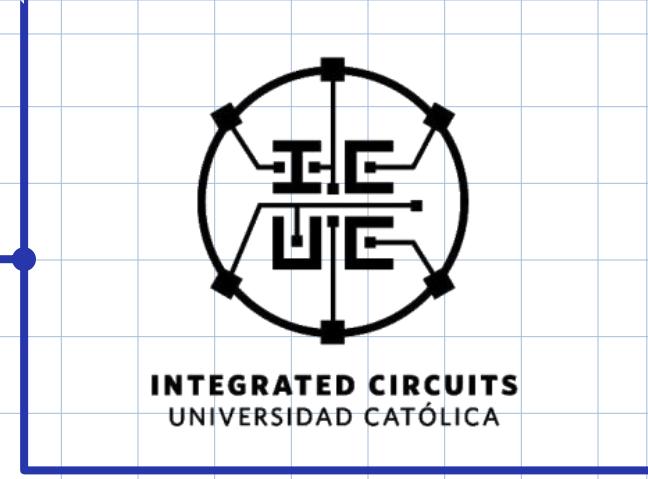
Multiplicamos por el área de la unión A_j y llegamos a

$$I_D = I_S \left(e^{V_D/V_T} - 1 \right)$$

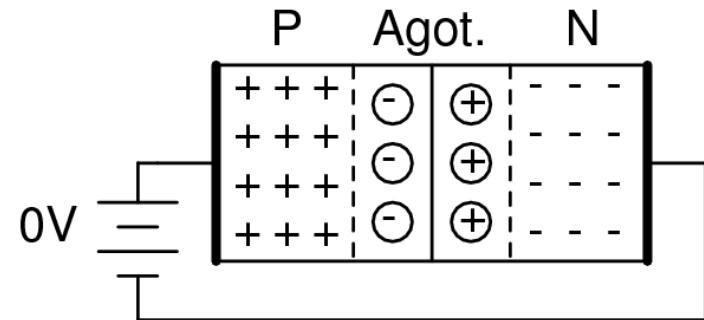
con

$$I_S = A_j q n_i^2 \left(\frac{D_N}{L_n N_A} + \frac{D_P}{L_p N_D} \right)$$

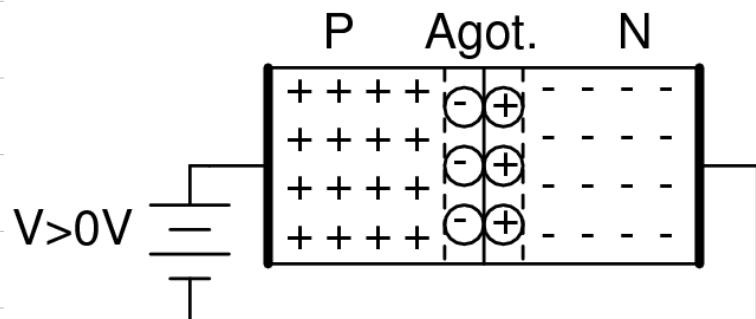
I_S es **corriente de saturación**, corriente a la que satura la conducción en polarización inversa $\sim 1 \text{ fA}$



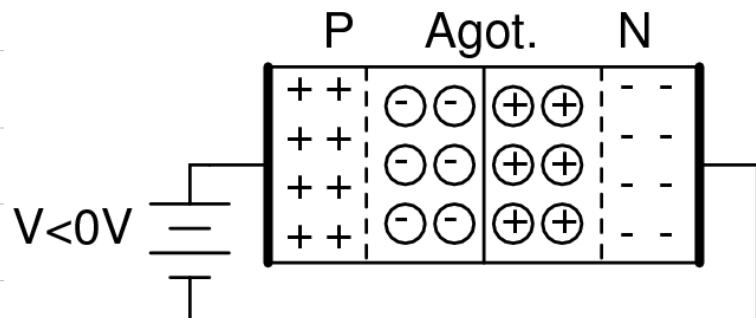
Resumen: Unión PN y voltaje externo



$$I_D = 0 \quad V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$$

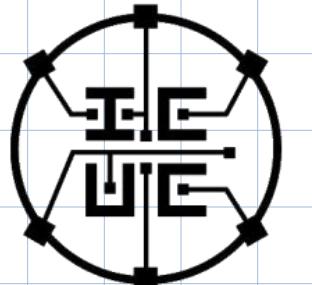


$$C_j \approx 2C_{j0} \quad I_D = I_S \left(e^{V_D/V_T} - 1 \right)$$



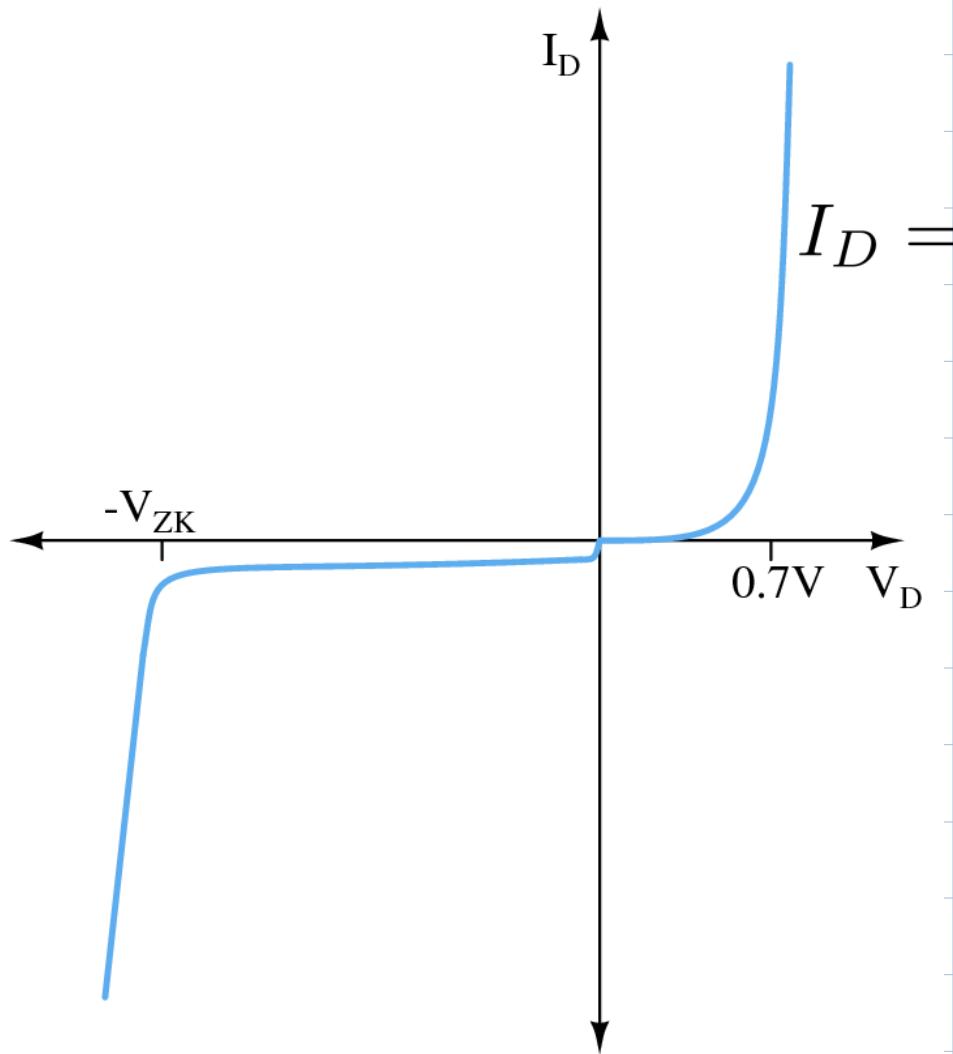
$$I_S = A_j q n_i^2 \left(\frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D} \right)$$

$$I_D \approx -I_S \quad C_j = \frac{C_{j0}}{\left(1 + \frac{|V_R|}{V_{bi}} \right)^m}$$

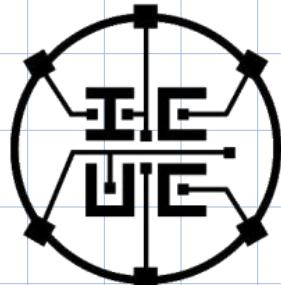


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Resumen: curva del diodo



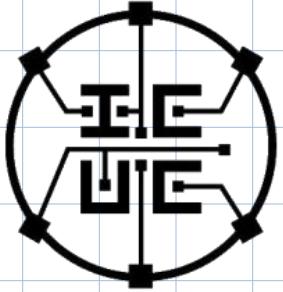
$$I_D = I_S \left(e^{V_D/V_T} - 1 \right)$$



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



3.11



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

La unión PN: otros efectos

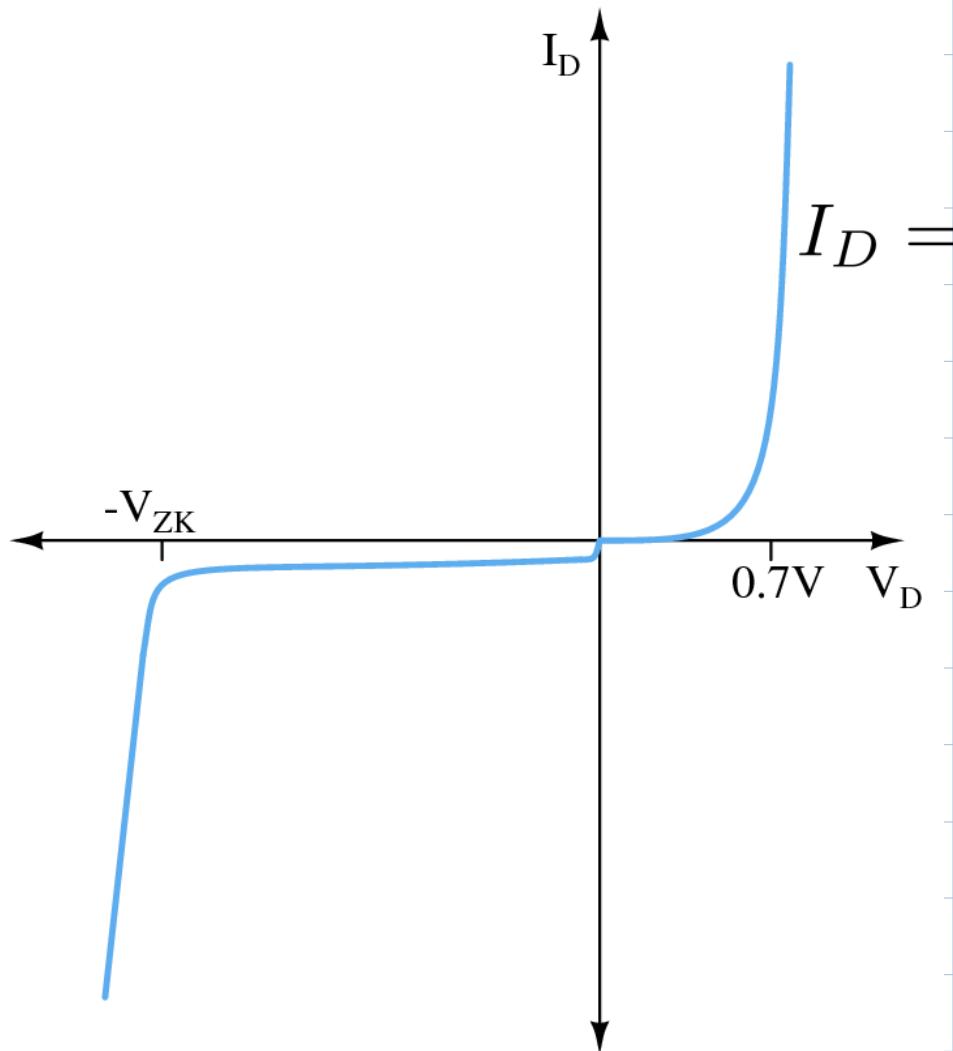
Dependencias:

- 3.03 Semiconductores intrínsecos
- 3.10 La unión PN en polarización directa

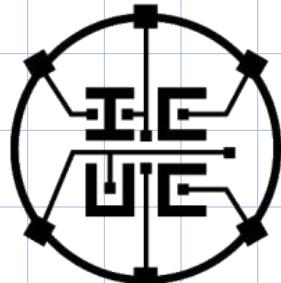
angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

Recordemos: curva del diodo



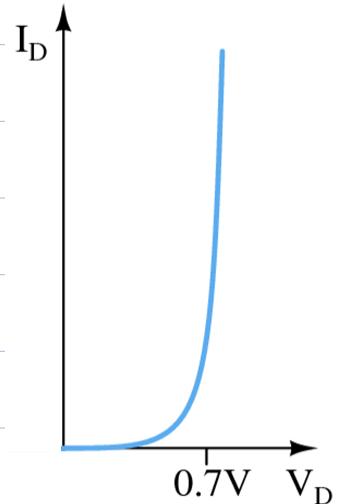
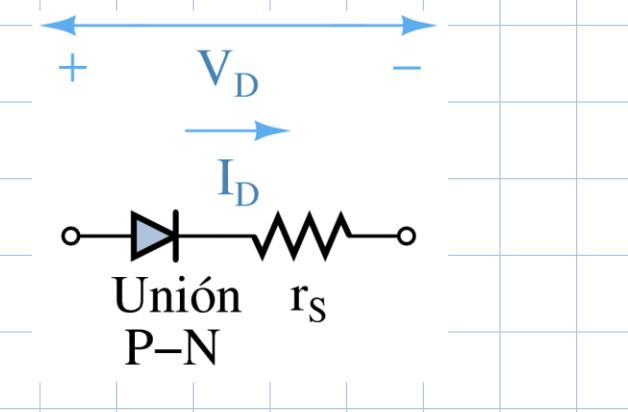
$$I_D = I_S \left(e^{V_D/V_T} - 1 \right)$$



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Efectos “de segundo orden”

- Resistencia parásita



¿Cómo queda
esta curva al
agregar r_s al
modelo?



- Recombinación en la región de agotamiento

– No todos los portadores de carga alcanzan a cruzar la región de agotamiento antes de recombinarse y perderse...

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

n = coeficiente de emisión

Capacitancia de unión en polarización directa

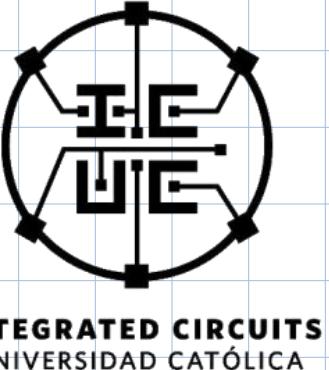
- Al cambiar el voltaje del diodo, diferente cantidad de carga (portadores minoritarios) aparecerá en regiones p y n
 - Implica efecto capacitivo

$$C_d = \left(\frac{\tau_T}{V_T} \right) I_D$$

- τ_T = tiempo medio de tránsito de diodo
 - Relacionado con duración de portadores minoritarios
- Esto se suma a la capacitancia de unión, que en polarización directa toma un valor aproximado

$$C_j \approx 2C_{j0}$$

$$C_{j0} = A \sqrt{\frac{\epsilon_s q}{2}} (N_A \parallel N_D) \frac{1}{V_{bi}}$$



Efectos de la temperatura

Volvamos a mirar la ecuación estática del diodo

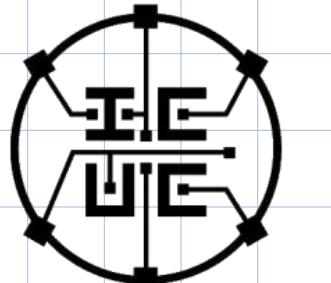
$$I_D = I_S \left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right)$$

En principio pareciera que I_D decrece si T (efecto sobre V_T), pero I_S también depende de T

$$I_S = A_j q n_i^2 \left(\frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D} \right)$$

Aquí n_i^2 depende fuertemente de la temperatura (recordar 3.03)

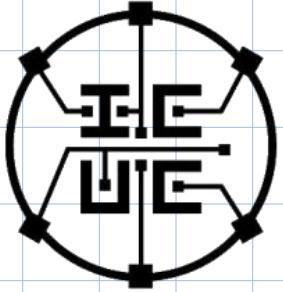
Consecuencia: un diodo de Si tiene un TC de **2.1mV/°C (NTC)**, mientras que uno de Ge tiene un TC de 2.5mV/°C (NTC); la corriente inversa puede aumentar en **10 veces por cada 20°C de aumento en temperatura**



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



3.12



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Modelos circuitales del diodo

Dependencias:

- 3.10 La unión PN en polarización directa
- 3.11 La unión PN: otros efectos

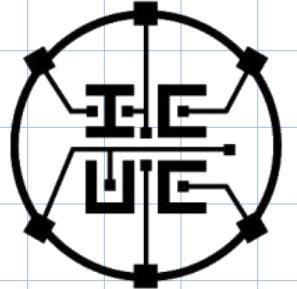
angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

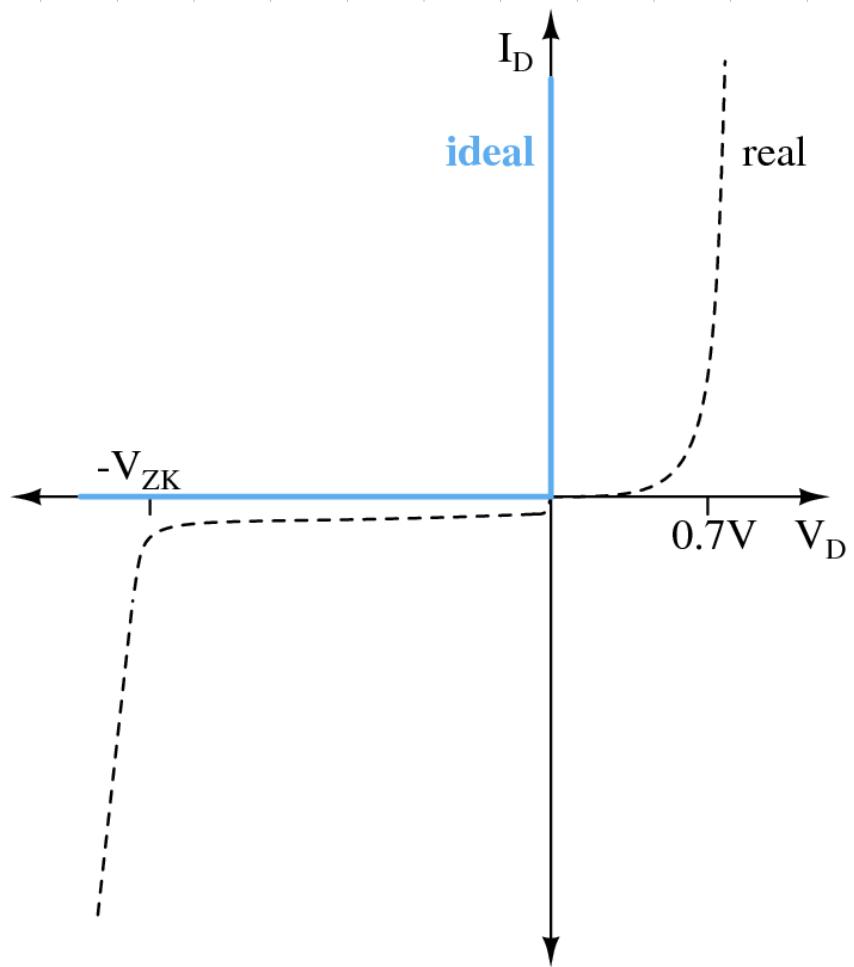
Modelos circuitales del diodo...

¿Cuál usar?

- Existen diversos modelos circuitales:
 - Diodo ideal
 - Diodo con caída constante de voltaje
 - Modelo lineal por partes
 - Modelo exponencial
 - Modelo incremental
- Debemos usar el modelo más simple que nos permita desarrollar la perspectiva que buscamos para el análisis orientado al diseño
 - A veces podemos despreciar algunos parámetros
 - Al usar modelos muy complicados escondemos la perspectiva y nos esforzamos inútilmente en hacer algo que SPICE puede hacer mejor
- Este curso debiera ayudar a desarrollar el criterio para decidir qué modelo usar en cada caso



El diodo ideal



Polarización directa



$$i > 0 \rightarrow v = 0$$

$$+10V$$

$$10mA$$

$$0V$$



$$v < 0 \rightarrow i = 0$$

$$+10V$$

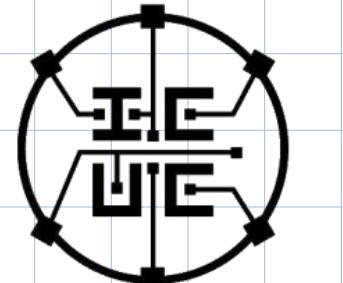
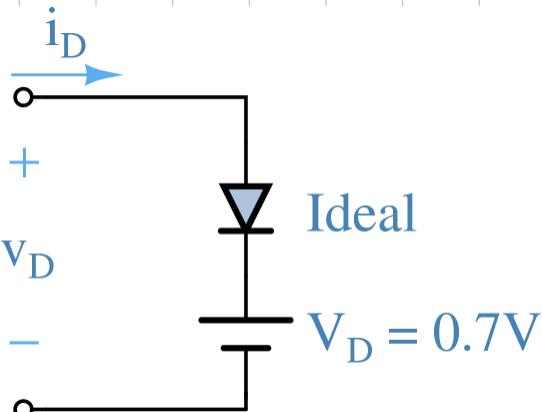
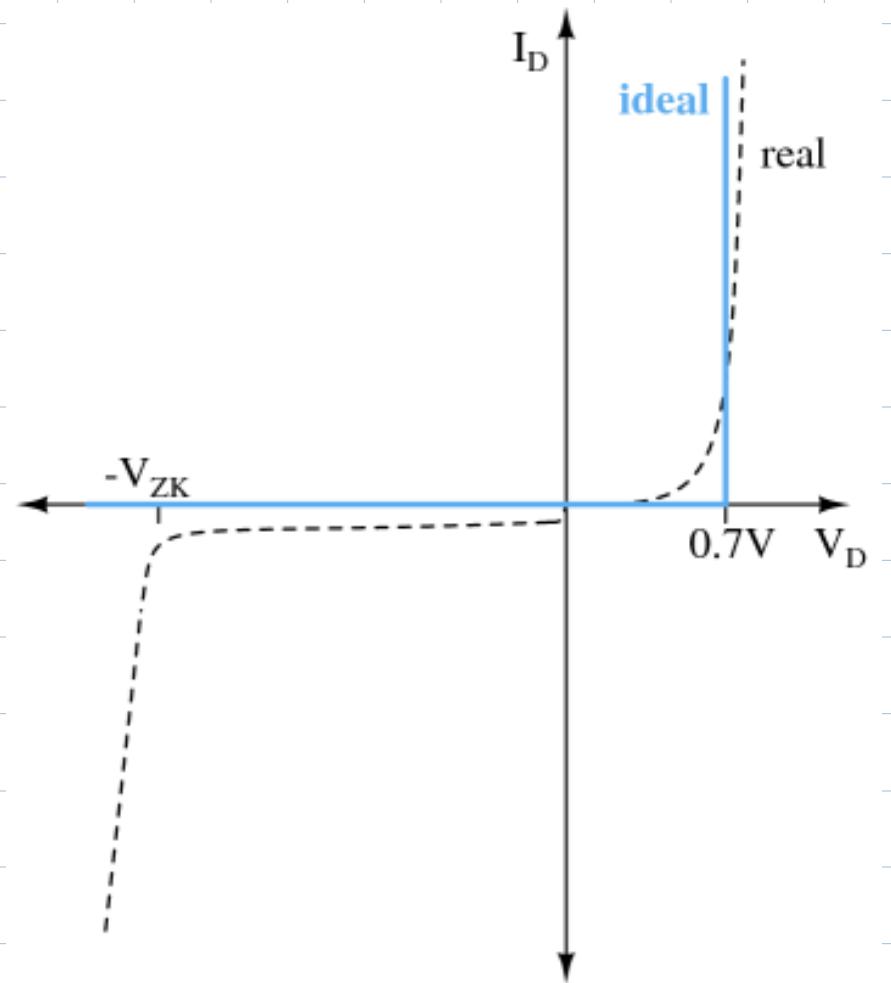
$$0mA$$

$$10V$$

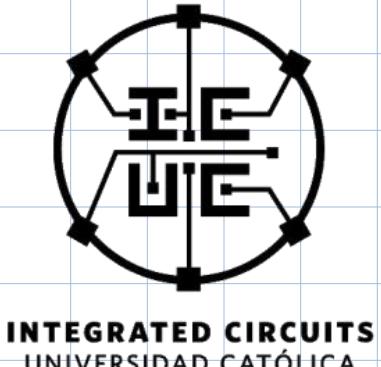
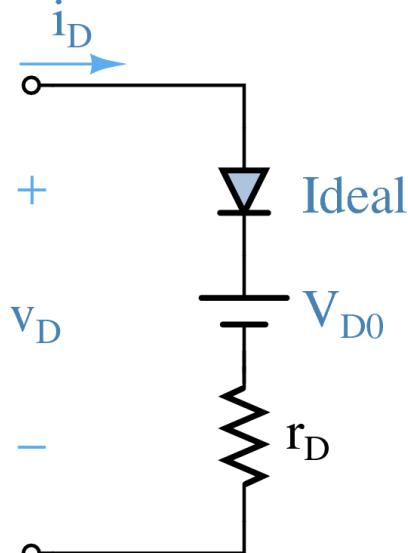
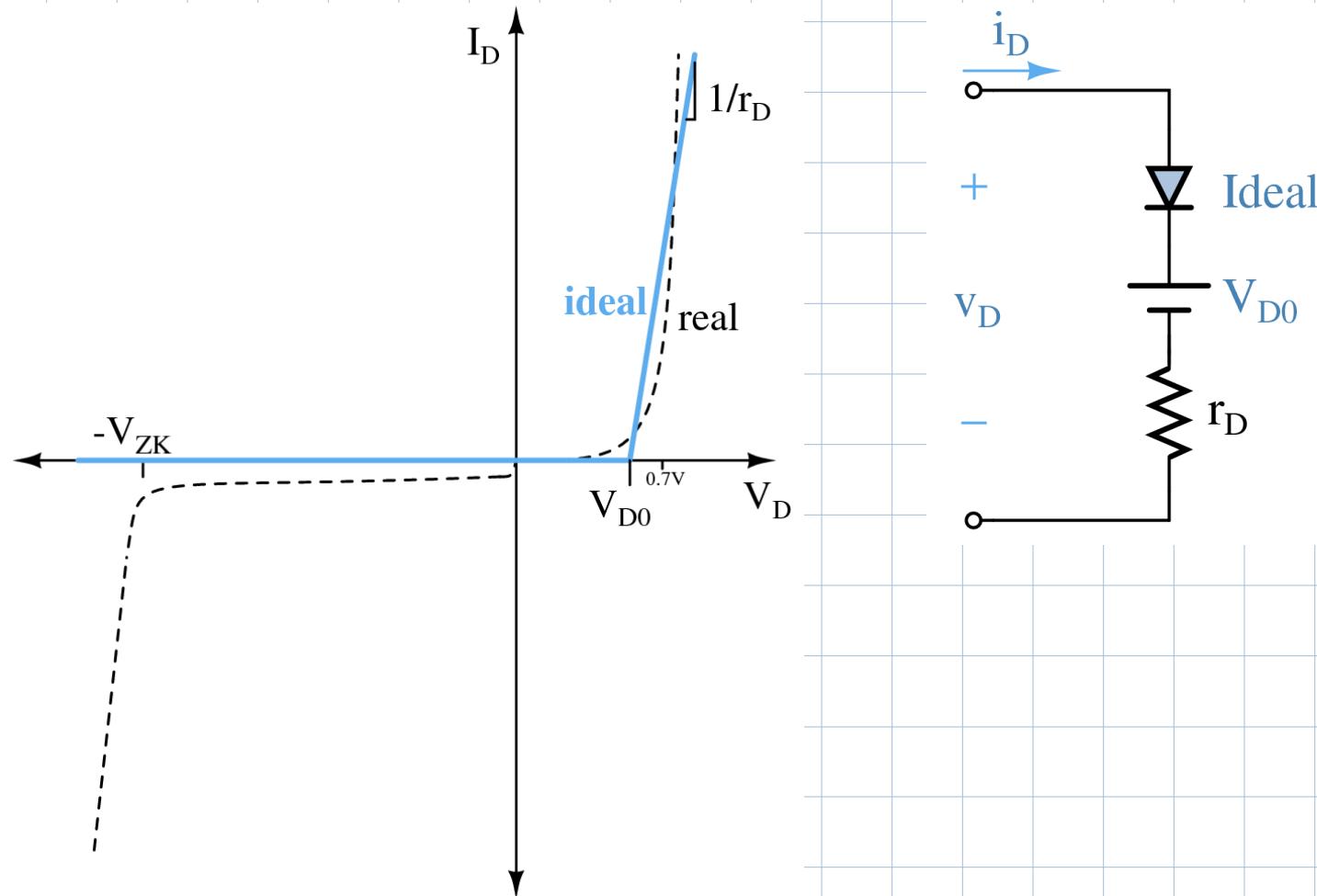
INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Polarización inversa

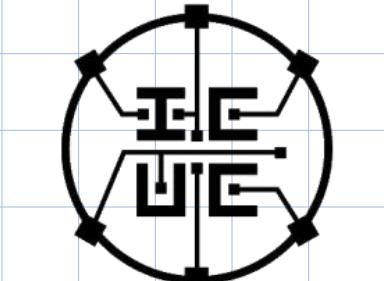
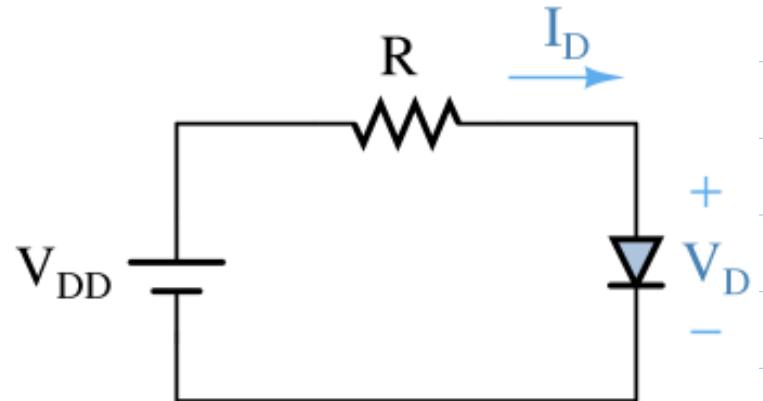
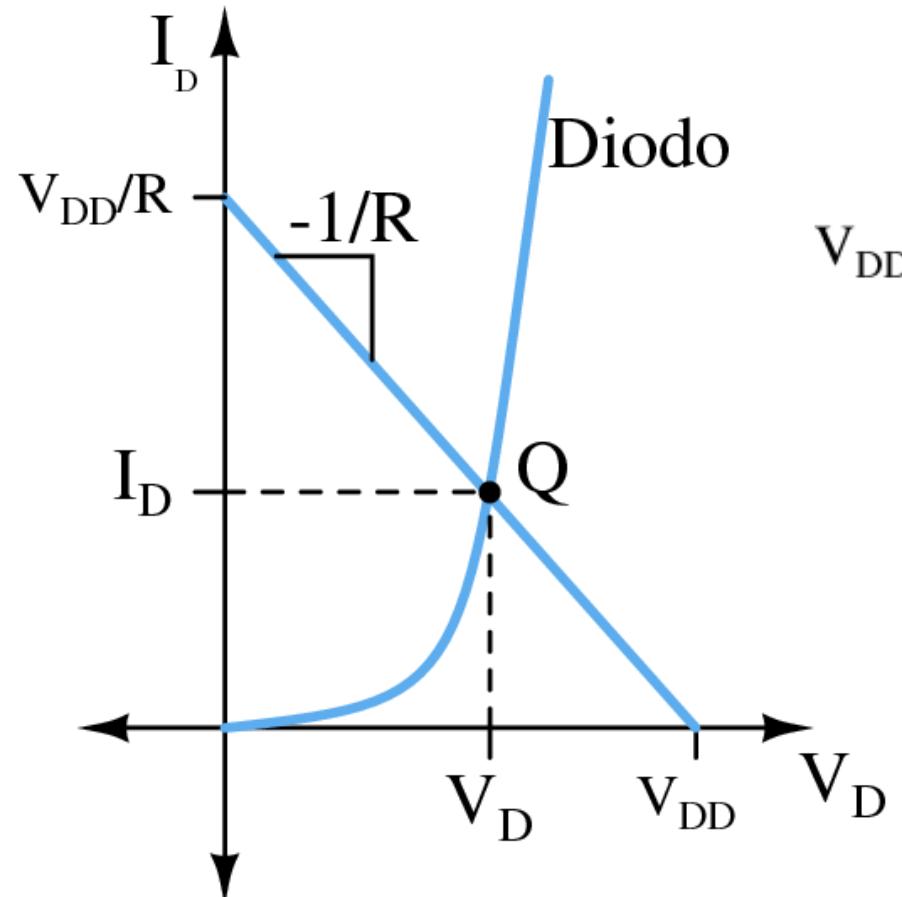
Modelo de caída constante de voltaje



Modelo lineal por partes



Diodo real y recta de carga



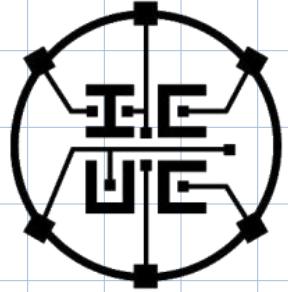
INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

¿A qué se parecerá el diodo en pequeña señal?

En la próxima cápsula lo averiguaremos



3.13



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Diodo en pequeña señal

Dependencias:

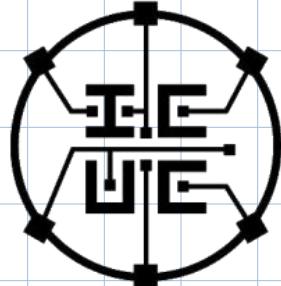
- 1.12 Curvas de transferencia estática
- 3.10 La unión PN en polarización directa
- 3.11 La unión PN: otros efectos

angel@uc.cl

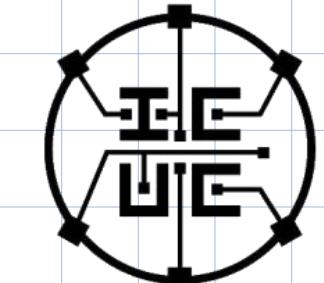
Electrónica en cápsulas

¿Pequeña señal?

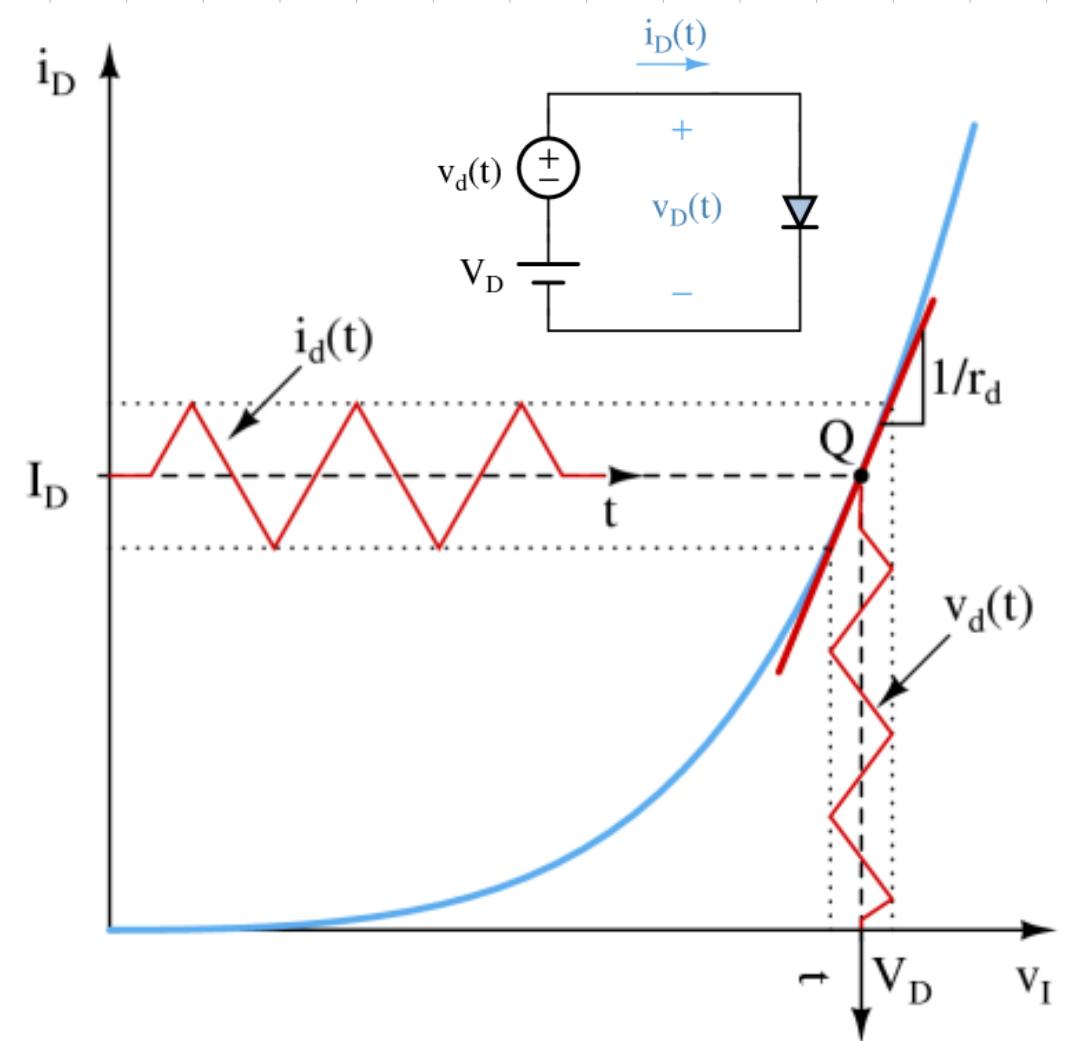
- En ocasiones un circuito tiene una corriente I_D que varía muy poco (**DC**), y en torno a la cual aparecen **señales pequeñas**
 - Hablamos de polarización y señales de interés
- Queremos un modelo preciso y sencillo (!)
 - Linealizamos y determinamos los efectos de cambios incrementales
- Los modelos incrementales o de pequeña señal son **imprescindibles** para analizar y diseñar circuitos “lineales”



Modelo incremental del diodo



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



$$i_D = I_S \cdot e^{\frac{v_D}{nV_T}}$$

$$\text{Pero } v_D = V_D + v_d$$

$$I_D + i_d = I_S \cdot e^{\frac{V_D + v_d}{nV_T}} = I_S \cdot e^{\frac{V_D}{nV_T}} \cdot e^{\frac{v_d}{nV_T}}$$

Si $v_d \ll nV_T$, podemos hacer una expansión truncada

$$I_D + i_d = I_S \cdot e^{\frac{V_D}{nV_T}} \left(1 + \frac{v_d}{nV_T} \right)$$

Identificamos y restamos I_D

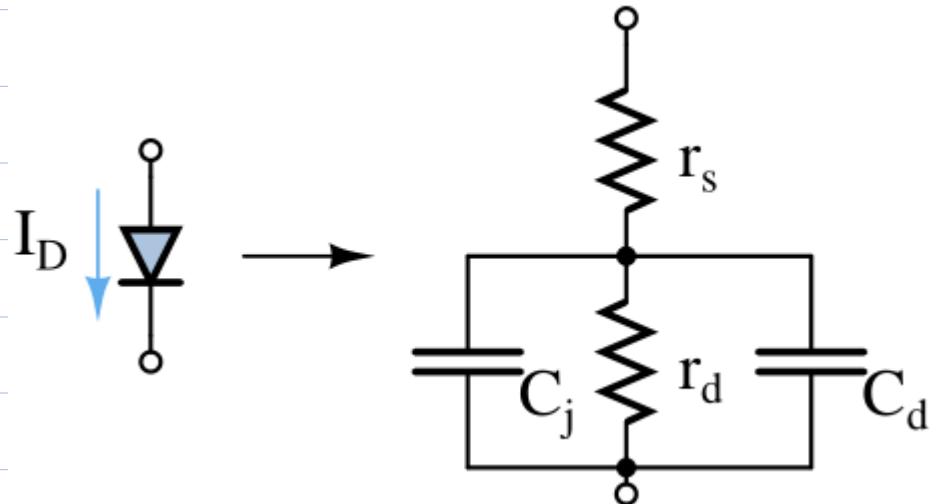
$$i_d = \frac{I_D}{nV_T} v_d$$

Reconocemos pendiente

$$r_d = \frac{nV_T}{I_D}$$

Incluyamos capacitancias y resistencia en serie

- Recordemos capacitancias del diodo:
 - C_j debido a placas paralelas
 - C_d debido a acumulación de carga
- Recordemos r_s debida a resistencia óhmica en serie
- Agregamos resistencia incremental y nos el siguiente modelo:

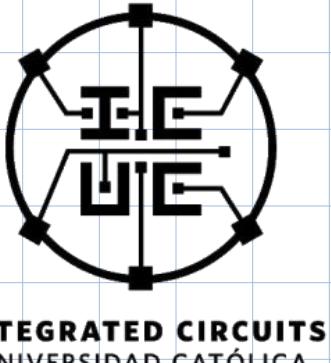


$$r_d = \frac{nV_T}{I_D}$$

$$C_d = \left(\frac{\tau_T}{V_T} \right) I_D$$

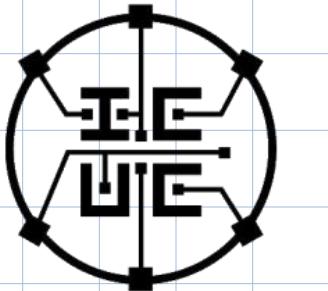
$$C_j \approx 2C_{j0}$$

$$C_{j0} = A \sqrt{\frac{\epsilon_s q}{2}} (N_A \parallel N_D) \frac{1}{V_{bi}}$$



¿Y cómo resolvemos circuitos usando modelos incrementales (1.12)?

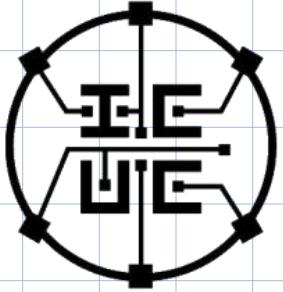
1. Determinar voltajes de nodo y corrientes de rama en Q, el punto de operación DC del circuito
2. Encontrar **modelos de pequeña señal** linealizados en torno a Q para **todos los diodos** del circuito
3. Apagar fuentes independientes DC, sustituyendo fuentes independientes de voltaje DC por cortocircuitos, y fuentes de corriente independientes DC por circuitos abiertos
4. Reemplazar cada diodo por su respectivo modelo de incremental
 - Modelo captura variaciones en torno a punto de operación Q
 - Es posible eliminar componentes pasivos que no afectan las señales de interés (e.g., capacitancias de acoplamiento)
5. Analizar el circuito como si fuera lineal



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



3.14



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Reguladores y rectificadores con diodos

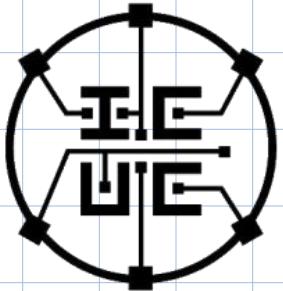
Dependencias:

- 1.16 Rieles de alimentación de un circuito
- 3.12 Modelos circuitales del diodo
- 3.13 Diodo en pequeña señal

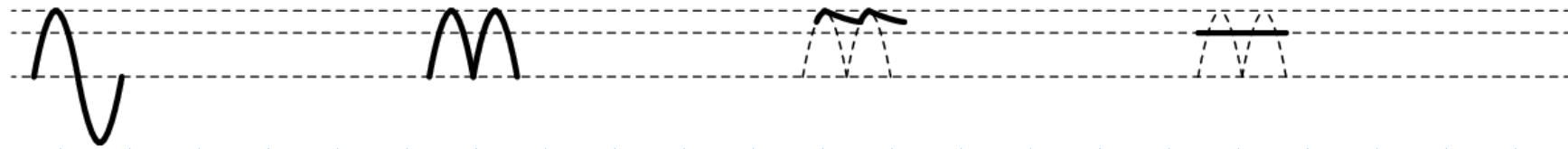
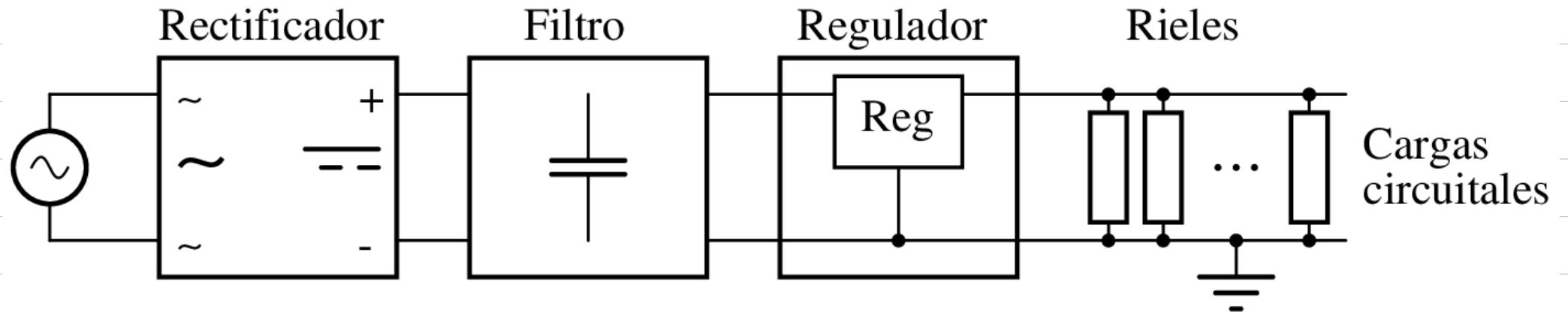
angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

Recordemos – fuentes lineales (1.16)

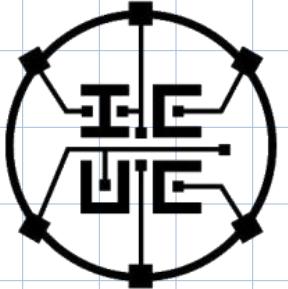


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



El diodo como regulador de voltaje

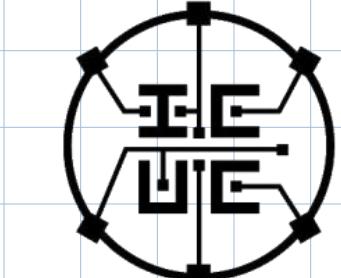
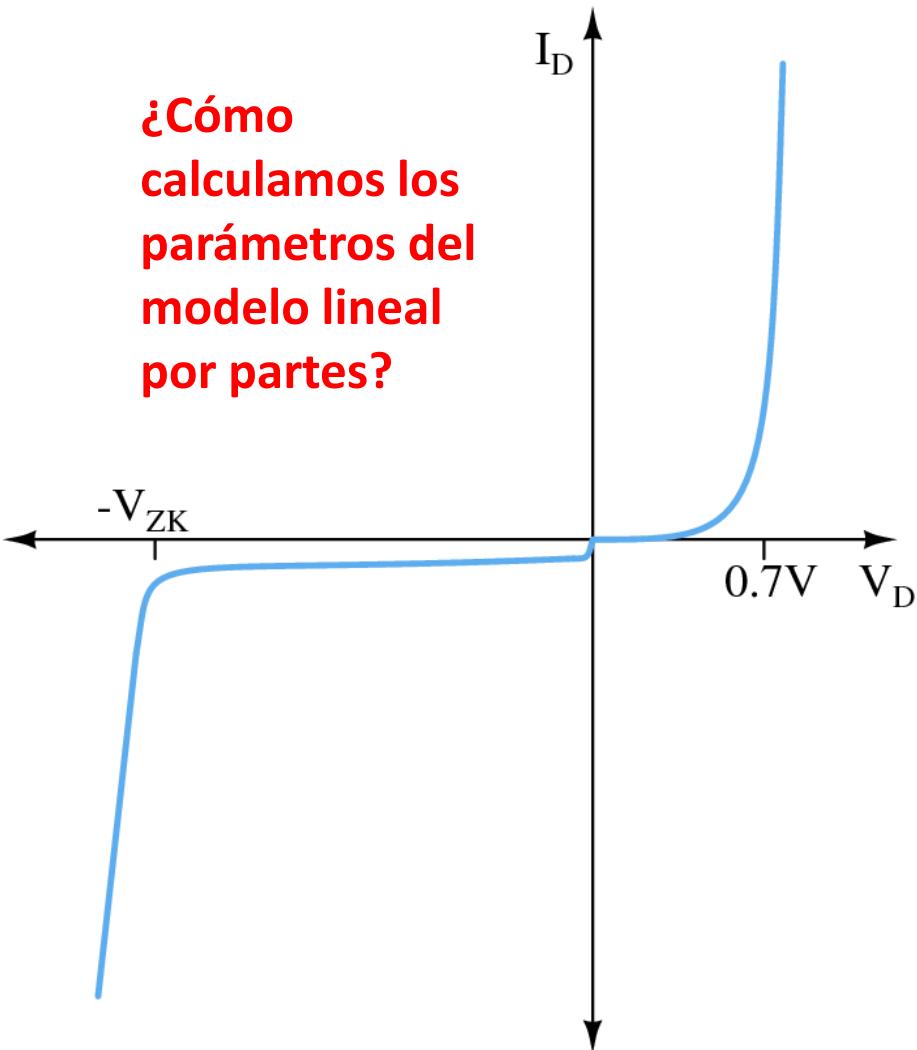
- Recordemos que en polarización directa el voltaje del diodo varía muy poco con la corriente
- Quizás podemos usar esta característica para implementar reguladores de voltaje usando diodos
- Desventajas:
 - Sensible a la corriente
 - Sensible a la temperatura
 - Ineficiente



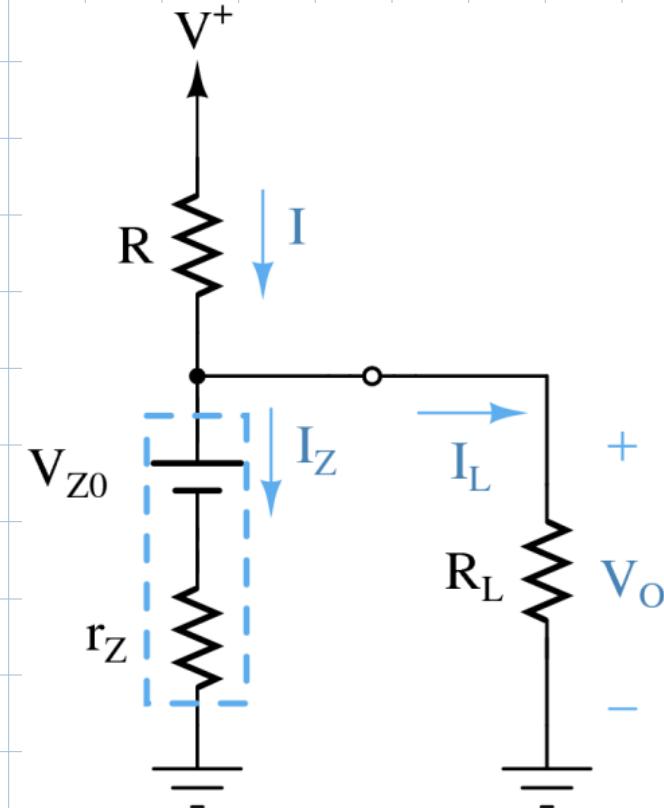
Regulador de voltaje usando diodo Zener

El diodo Zener presenta una caída de voltaje relativamente constante en polarización inversa

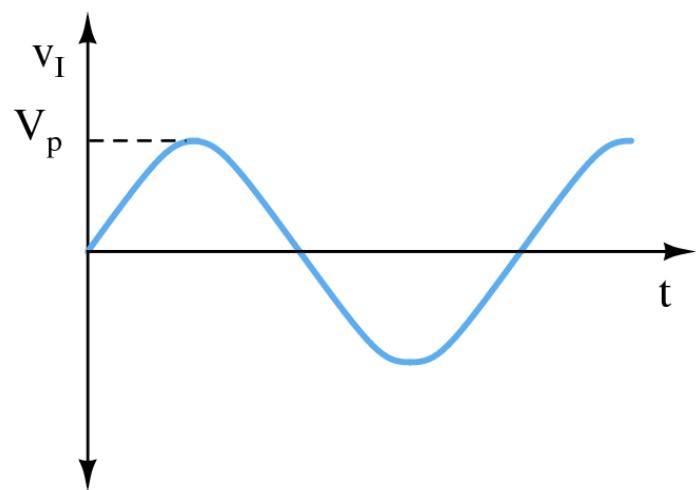
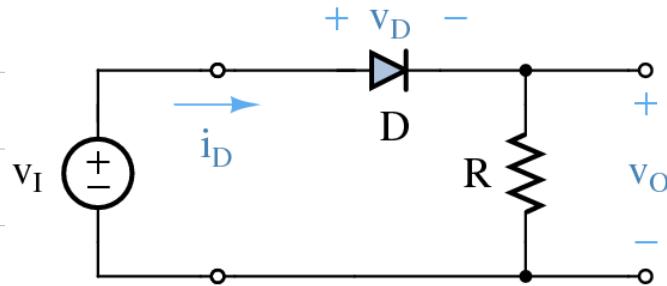
¿Cómo calculamos los parámetros del modelo lineal por partes?



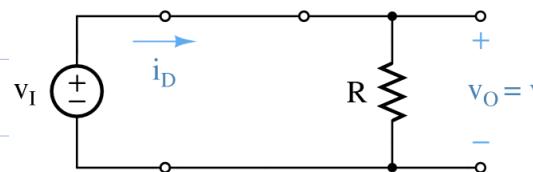
INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



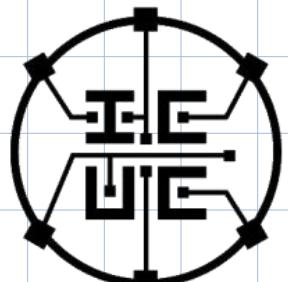
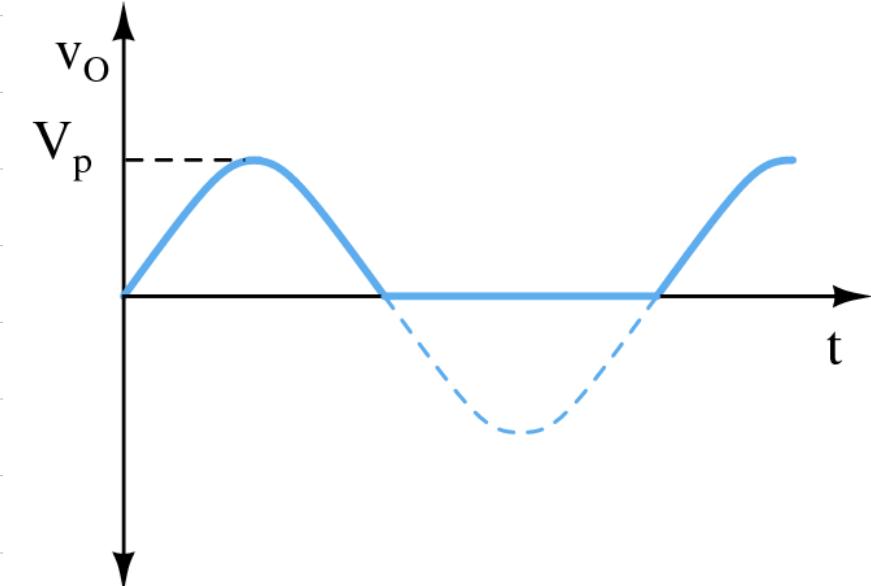
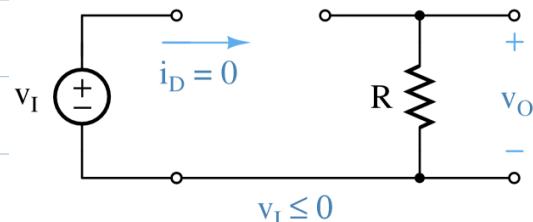
Rectificador de media onda



Semiciclo positivo

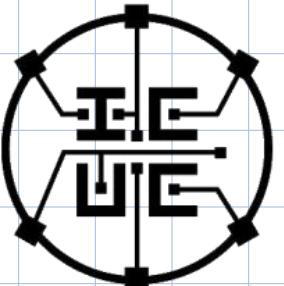


Semiciclo negativo

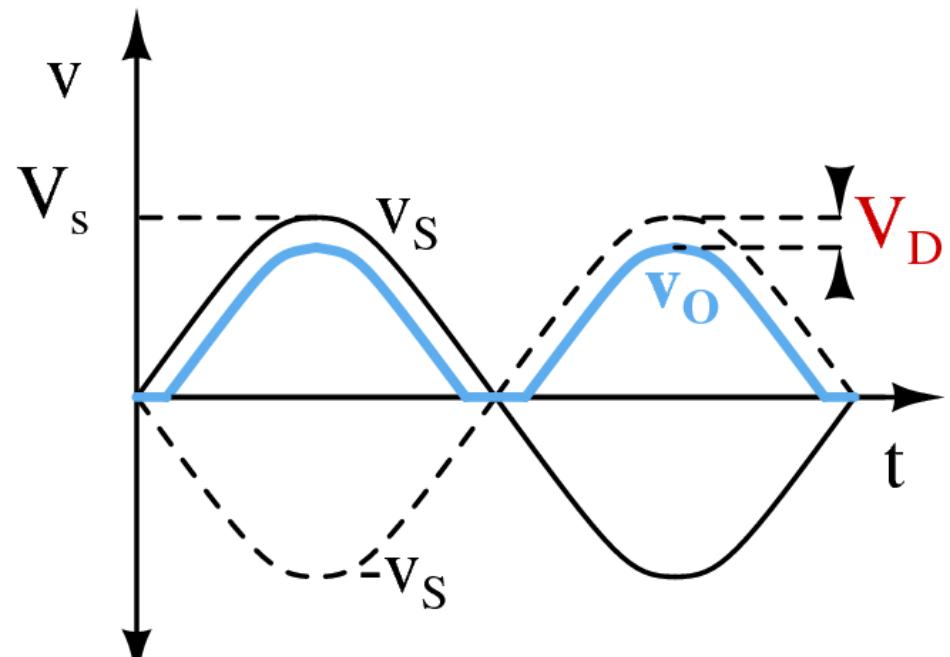
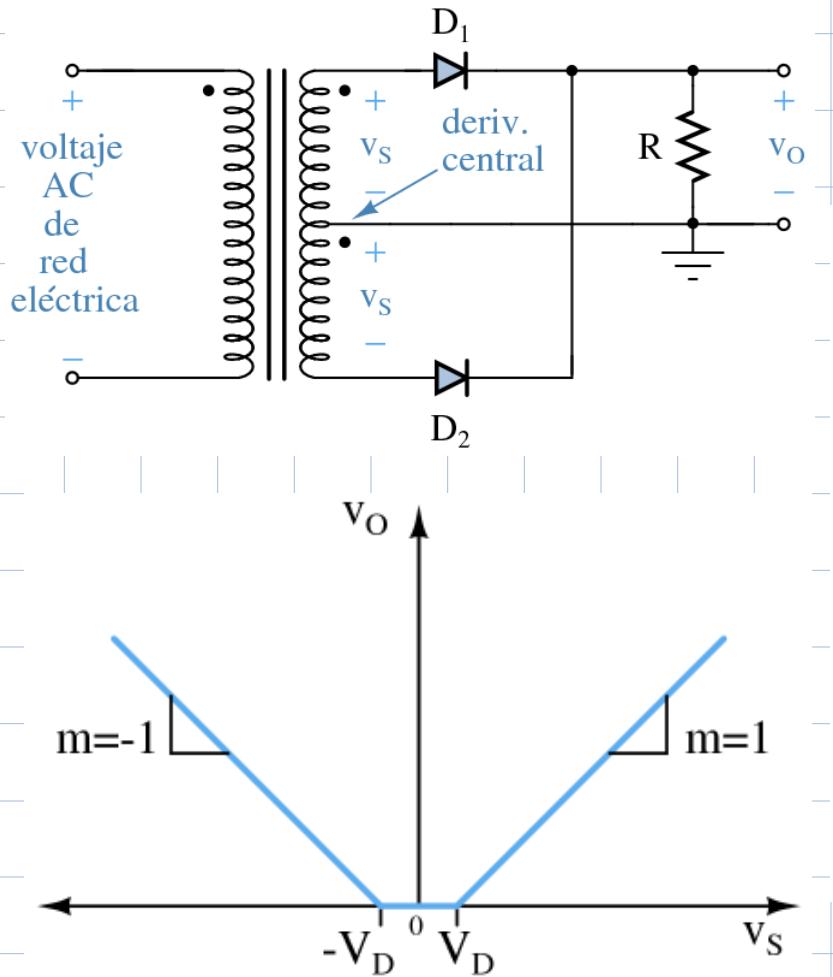


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

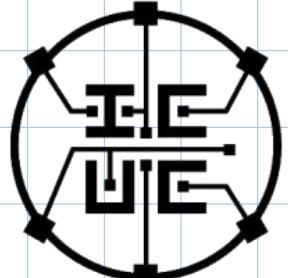
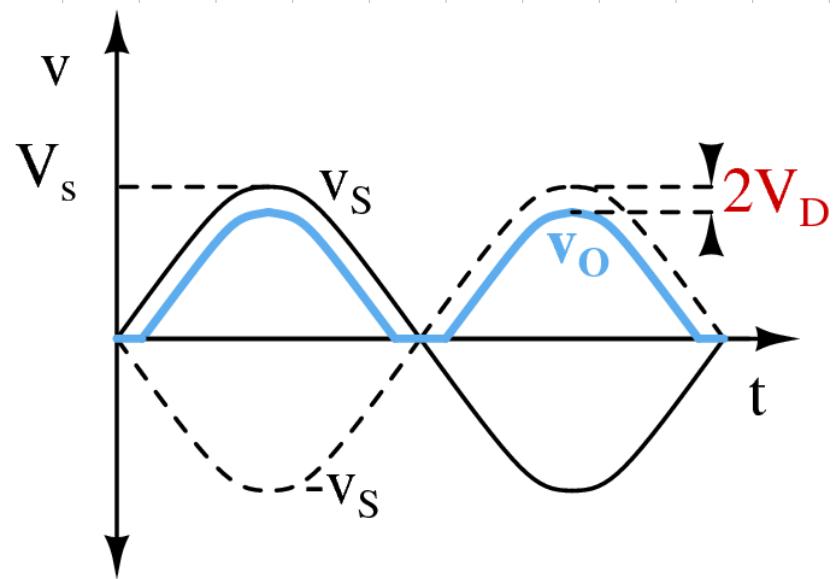
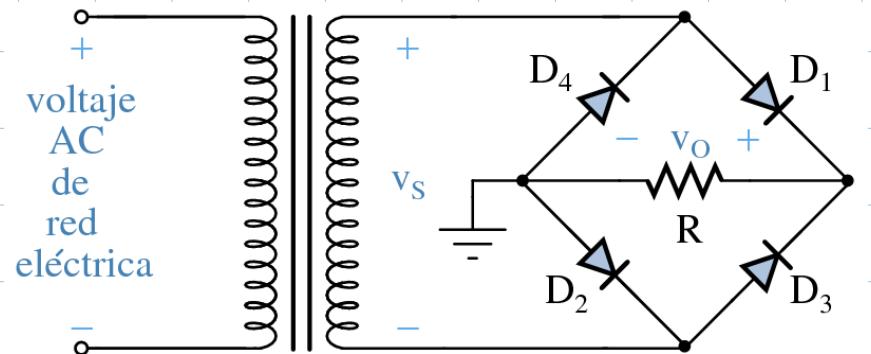
Rectificador de onda completa usando transformador con derivación central



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



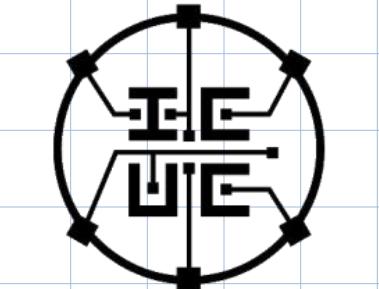
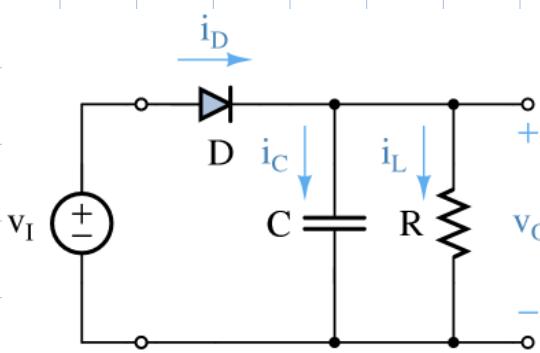
Regulador de onda completa usando puente de diodos



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

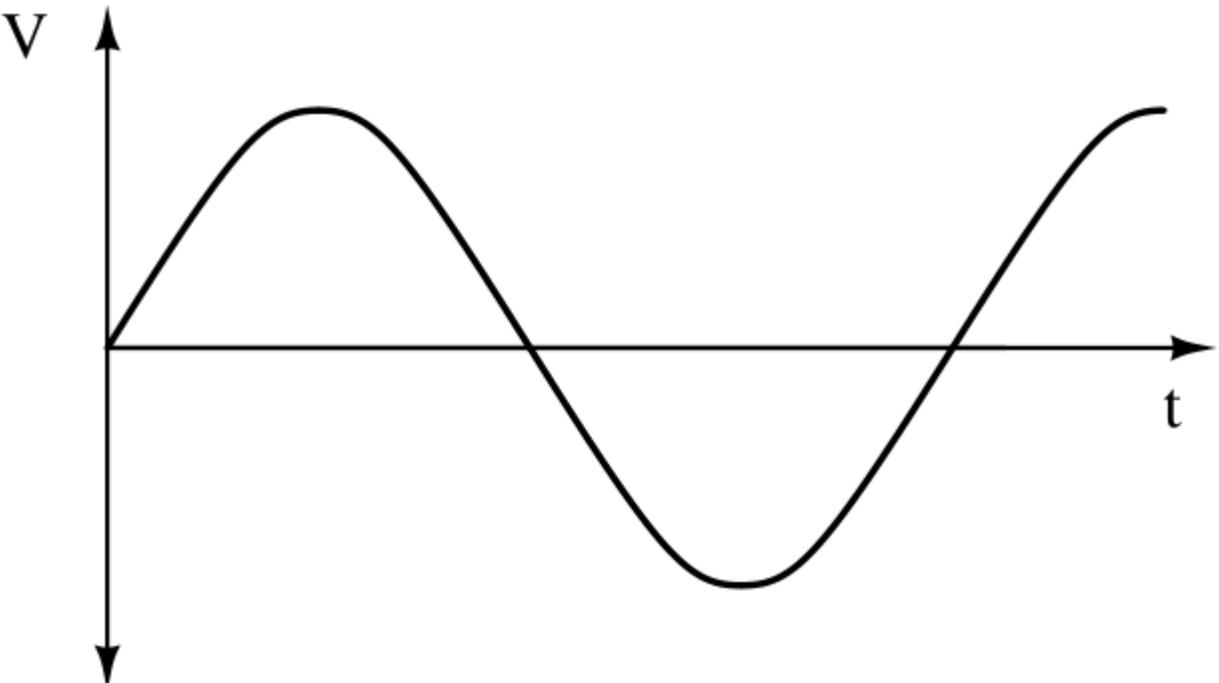
Rectificador de media onda con filtro

Rizado (ripple):



Corriente por diodo (promedio):

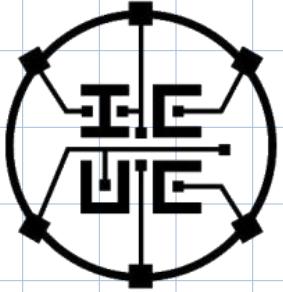
Corriente por diodo (máxima):



¿Cómo cambian estos resultados para el caso de un rectificador de onda completa?



3.15



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Más circuitos con diodos

Dependencias:

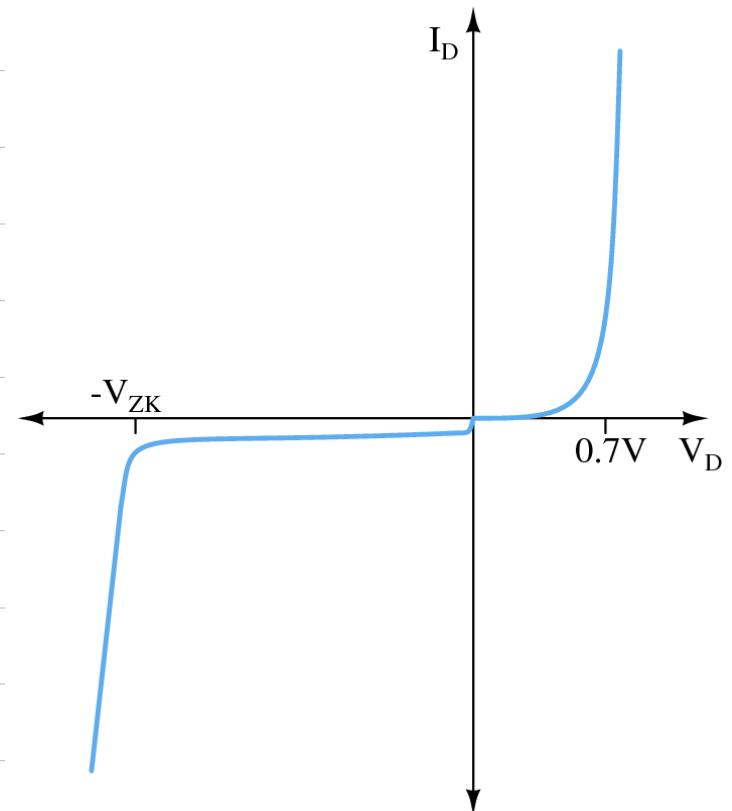
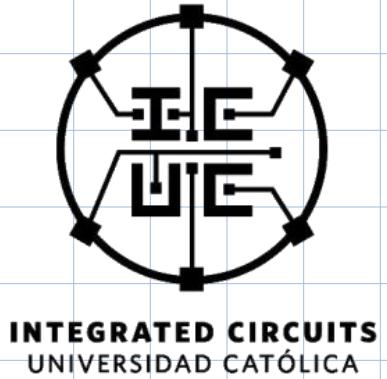
- 3.12 Modelos circuitales del diodo
- 3.13 Diodo en pequeña señal
- 3.14 Reguladores y rectificadores con diodos

angel@uc.cl

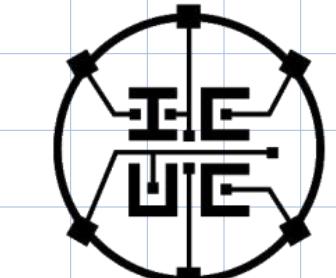
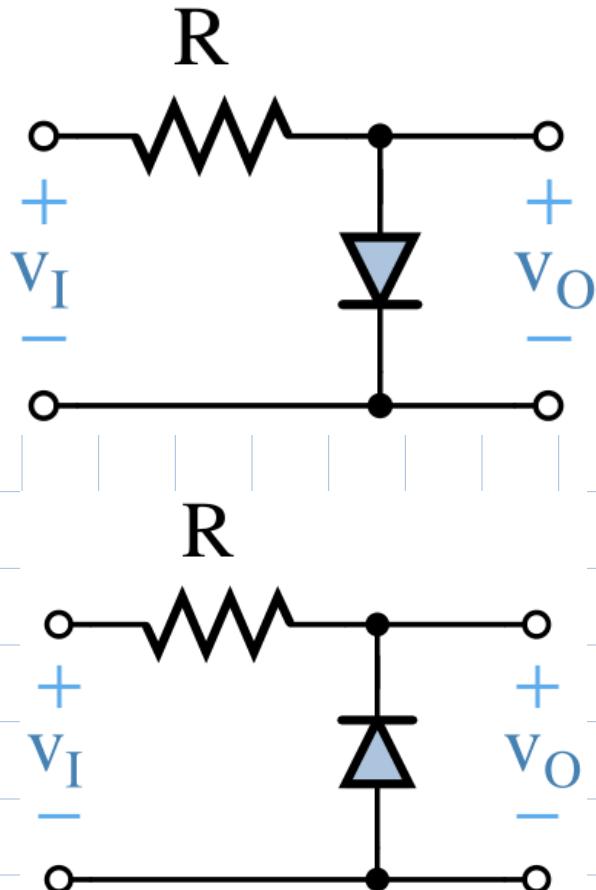
Electrónica en cápsulas

¿En general, cómo resolvemos un circuito con diodos?

- En los circuitos de (3.14) este problema es trivial, pero en algunos circuitos de esta cápsula puede ser difícil...
- Lo primero que debemos hacer es **determinar en qué región opera cada diodo**
 - A veces no es trivial saber si un diodo conduce o no
 - Ante ello debemos asumir un caso y confirmarlo o refutarlo
- Luego **elegimos el modelo** que vamos a aplicar entre las opciones vistas en (3.12) y (3.13)
 - Esta elección puede requerir cierto criterio
- Finalmente resolvemos el circuito usando el modelo elegido y considerando la región de operación del diodo
 - Cuando usamos el modelo exponencial, **no es trivial** determinar la corriente de operación; en ese caso, usamos **software de computación científica o iteramos**



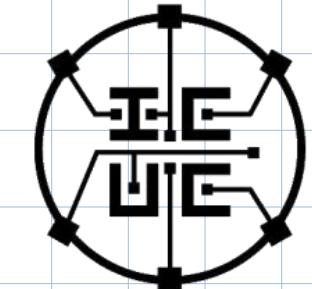
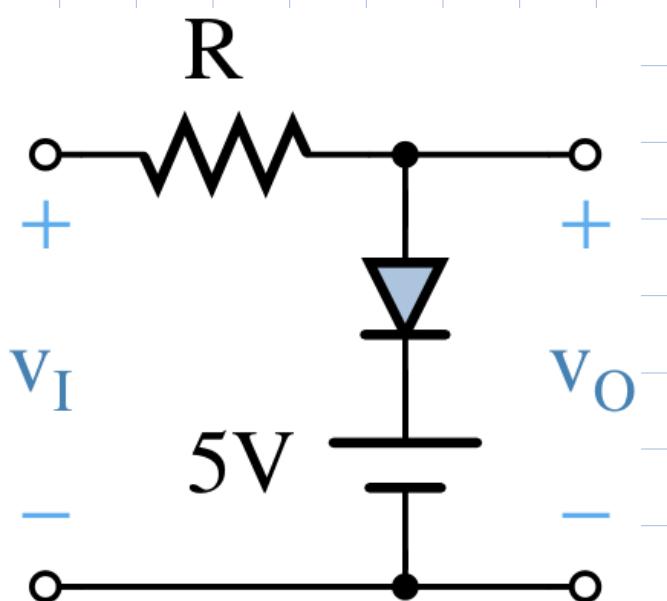
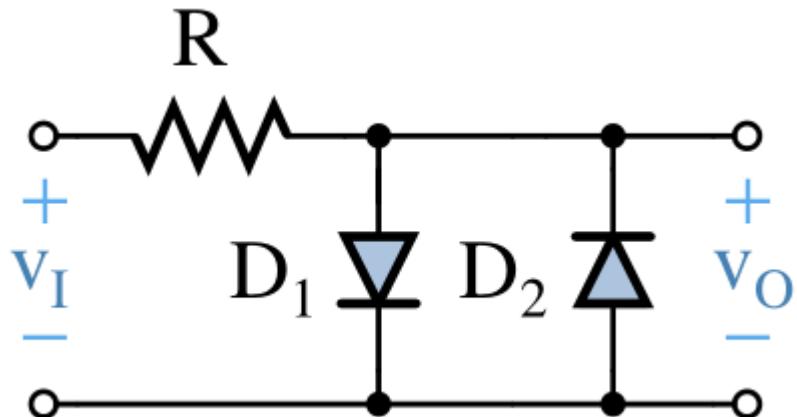
Limitadores de tensión



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

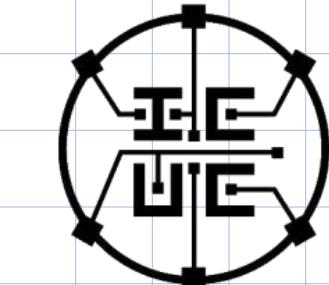
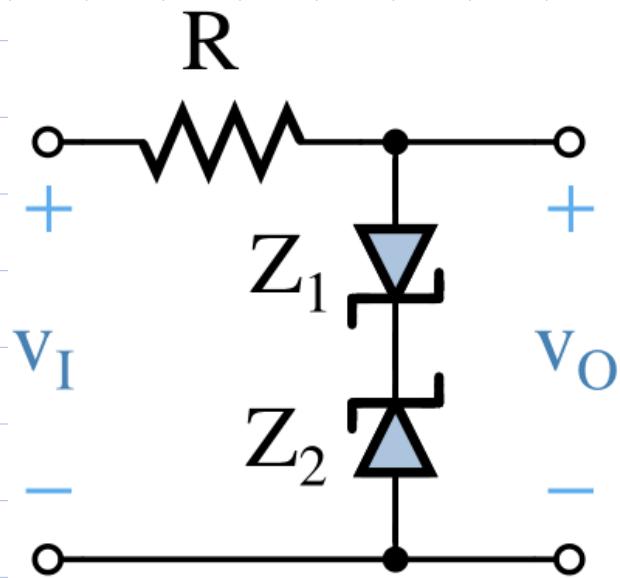
Son empleados
para proteger
circuitos
sensibles a
sobrevoltajes

Limitadores de tensión



Son empleados para proteger circuitos sensibles a sobrevoltajes

Limitadores de tensión

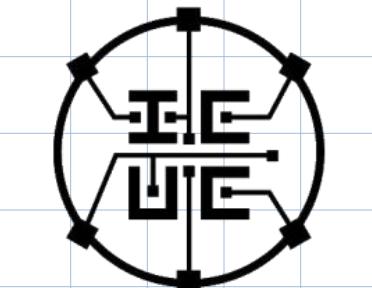
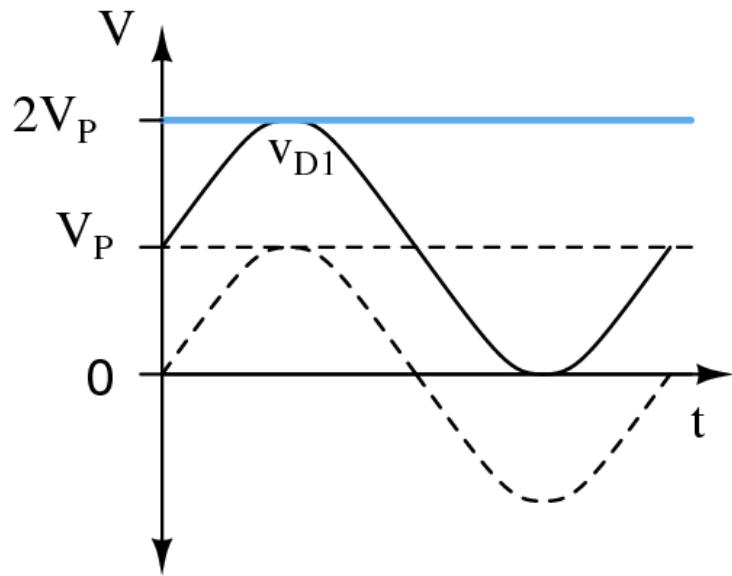
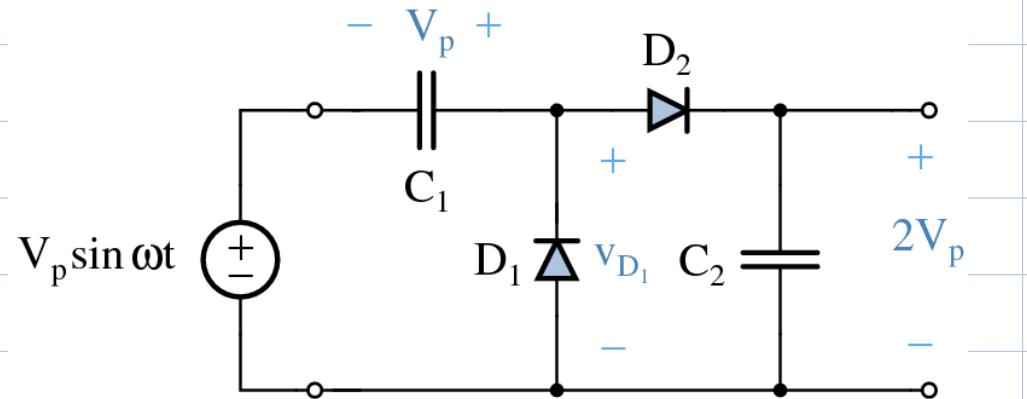


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Son empleados
para proteger
circuitos
sensibles a
sobrevoltajes

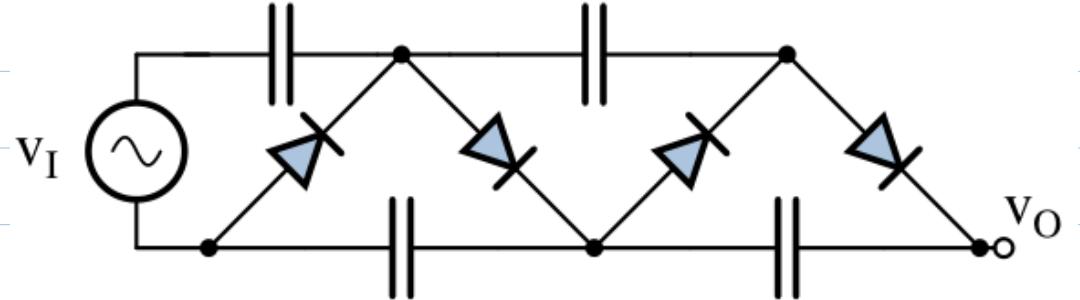
Existen otros circuitos limitadores
de tensión y se llaman
genéricamente “clamp”

Duplicador de tensión

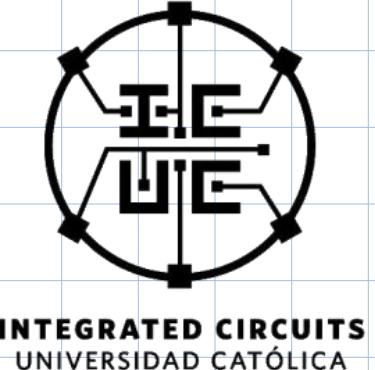


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Multiplicador de tensión o generador Cockcroft – Walton



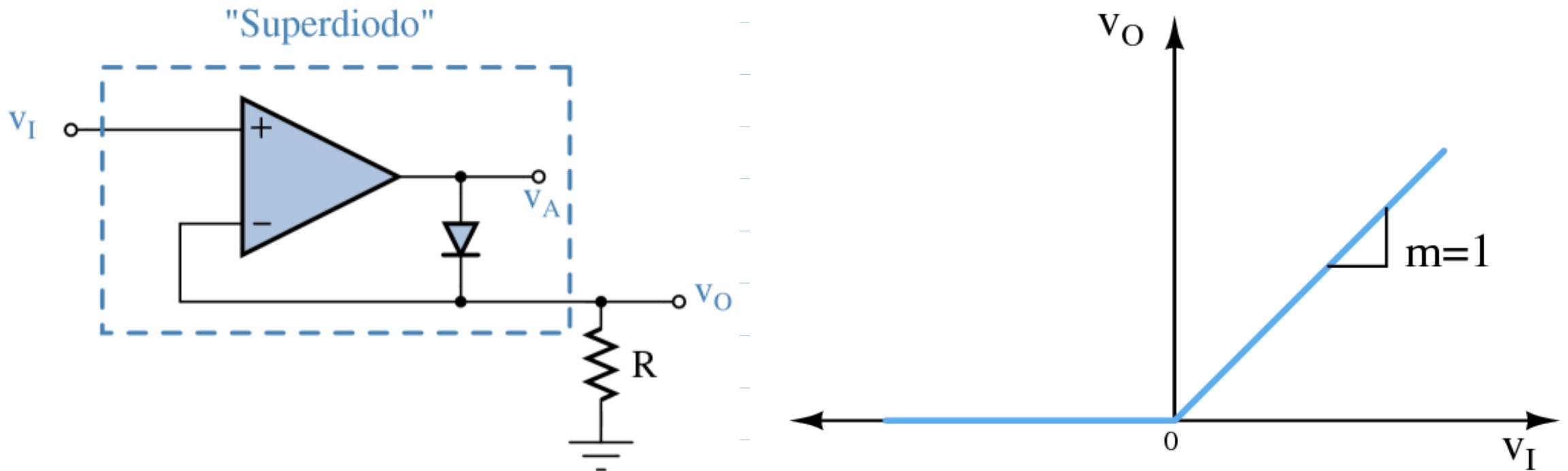
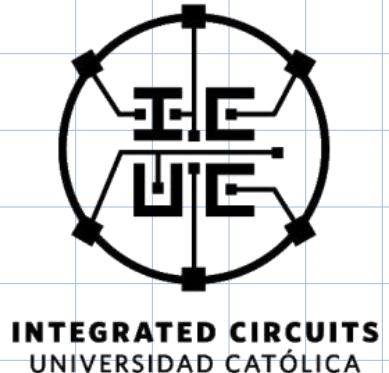
[Circuito similar en CERN]



Este circuito fue utilizado por John Cockcroft y Ernest Walton en 1932 para producir la primera desintegración nuclear artificial. Luego en 1951 obtuvieron el premio Nobel de física por sus logros.

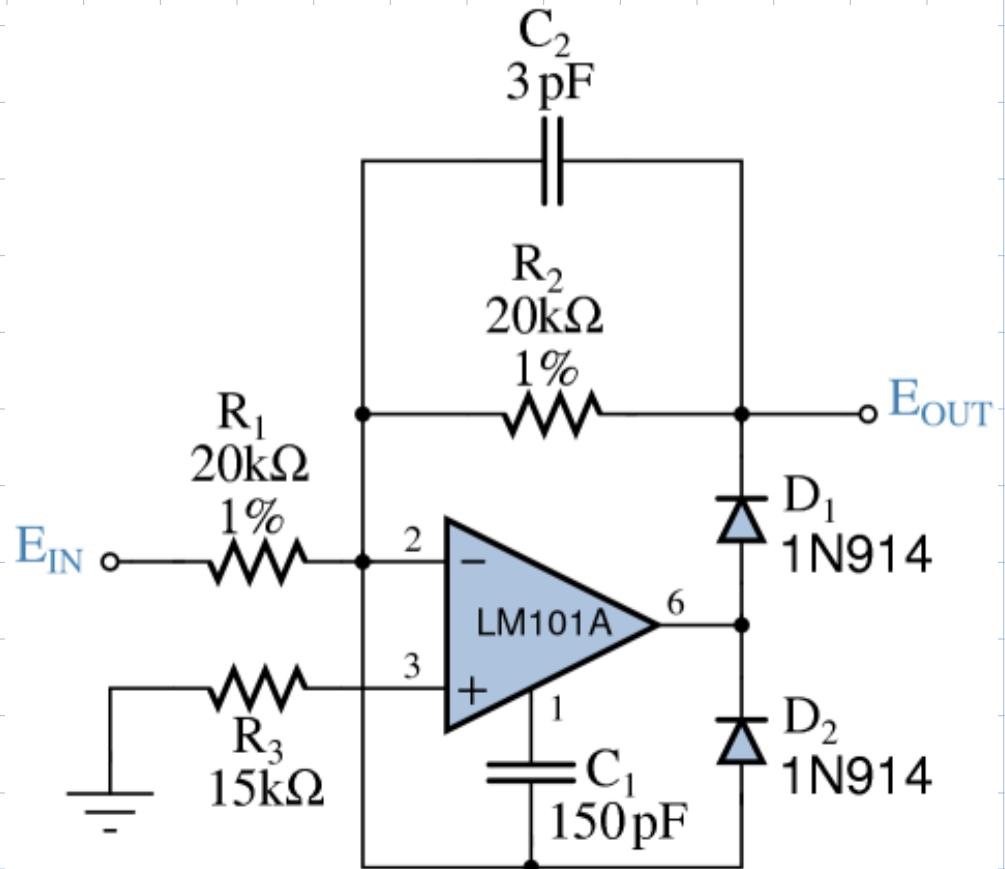
Superdiodo

Es equivalente a un diodo pero sin caída de tensión en polarización directa

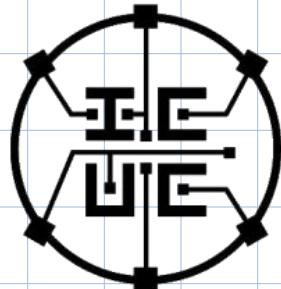


<http://www.ti.com/ww/en/bobpease/assets/AN-31.pdf>

Rectificador rápido de media onda

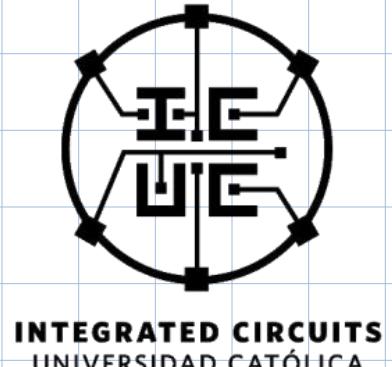
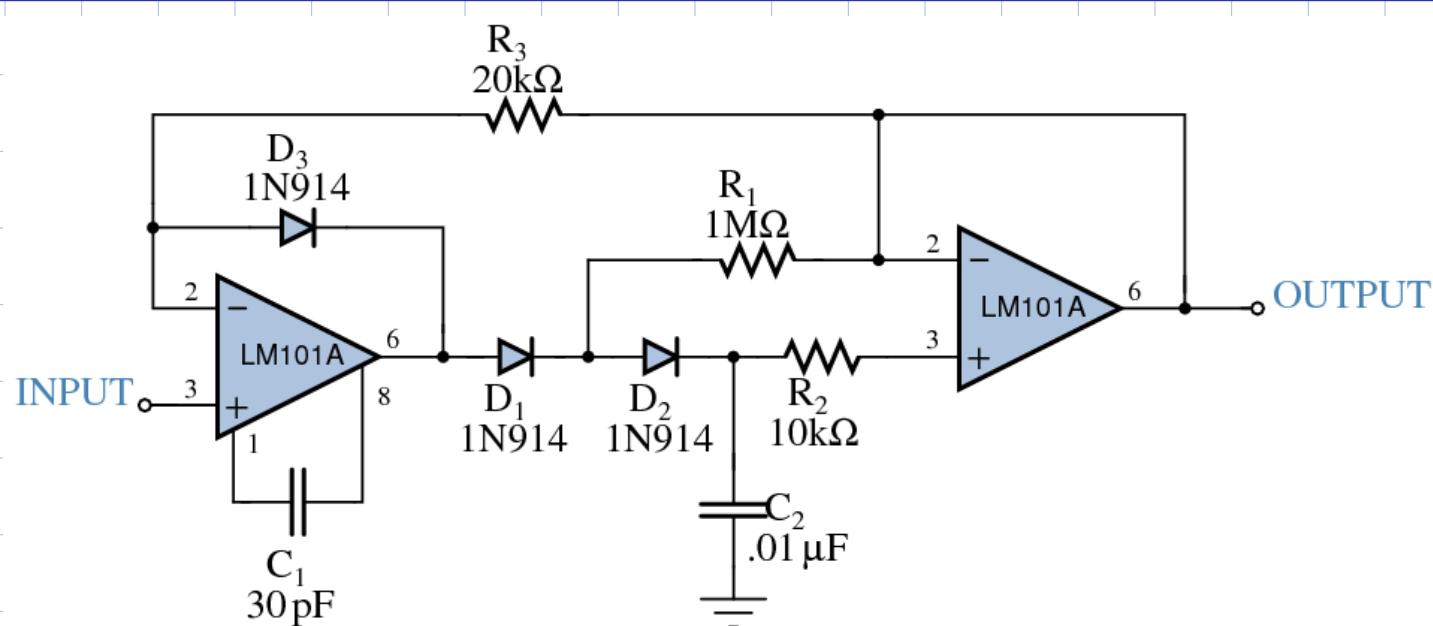


<http://www.ti.com/ww/en/bobpease/assets/AN-31.pdf>



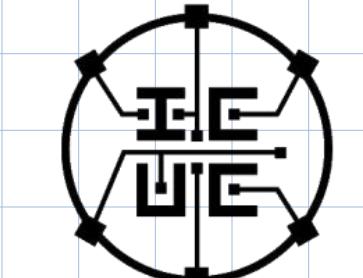
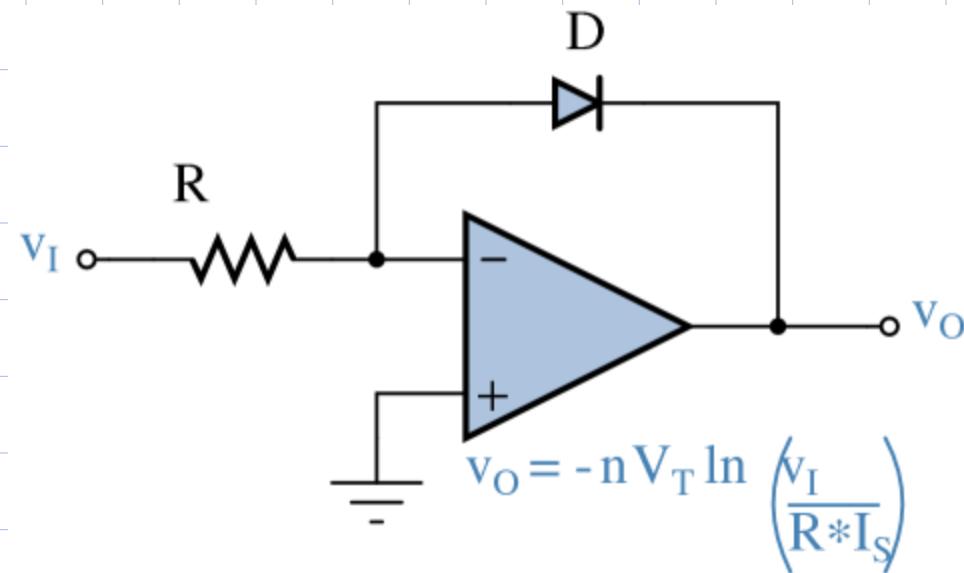
INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Detector de peaks



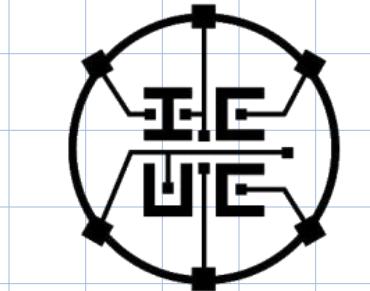
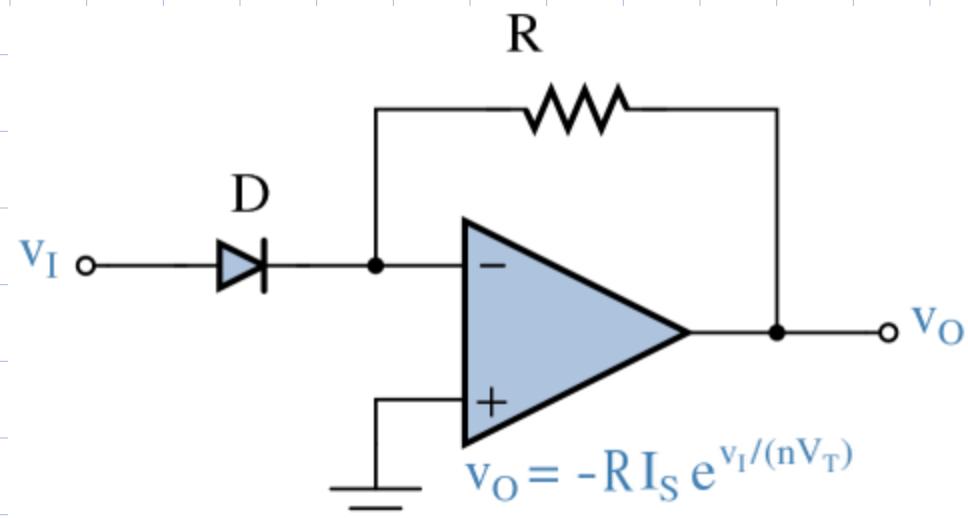
<http://www.ti.com/ww/en/bobpease/assets/AN-31.pdf>

Logaritmo

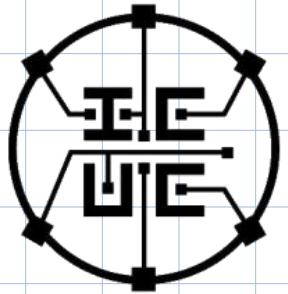


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

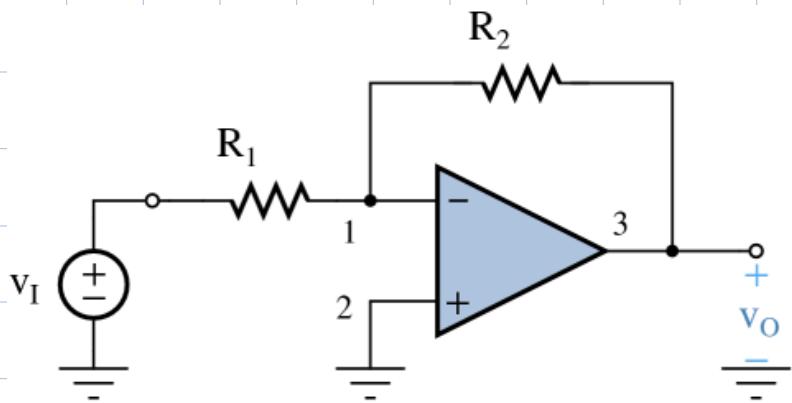
Antilogaritmo



Amplificador no lineal

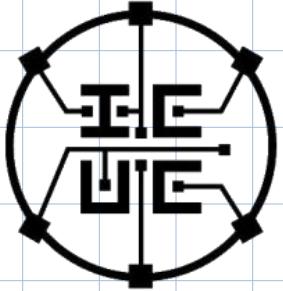


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA





3.16



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Optoelectrónica: el LED

Dependencias:

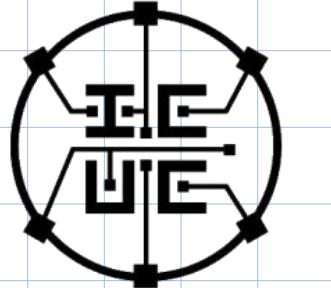
- 3.08 La unión PN
- 3.10 La unión PN en polarización directa

angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

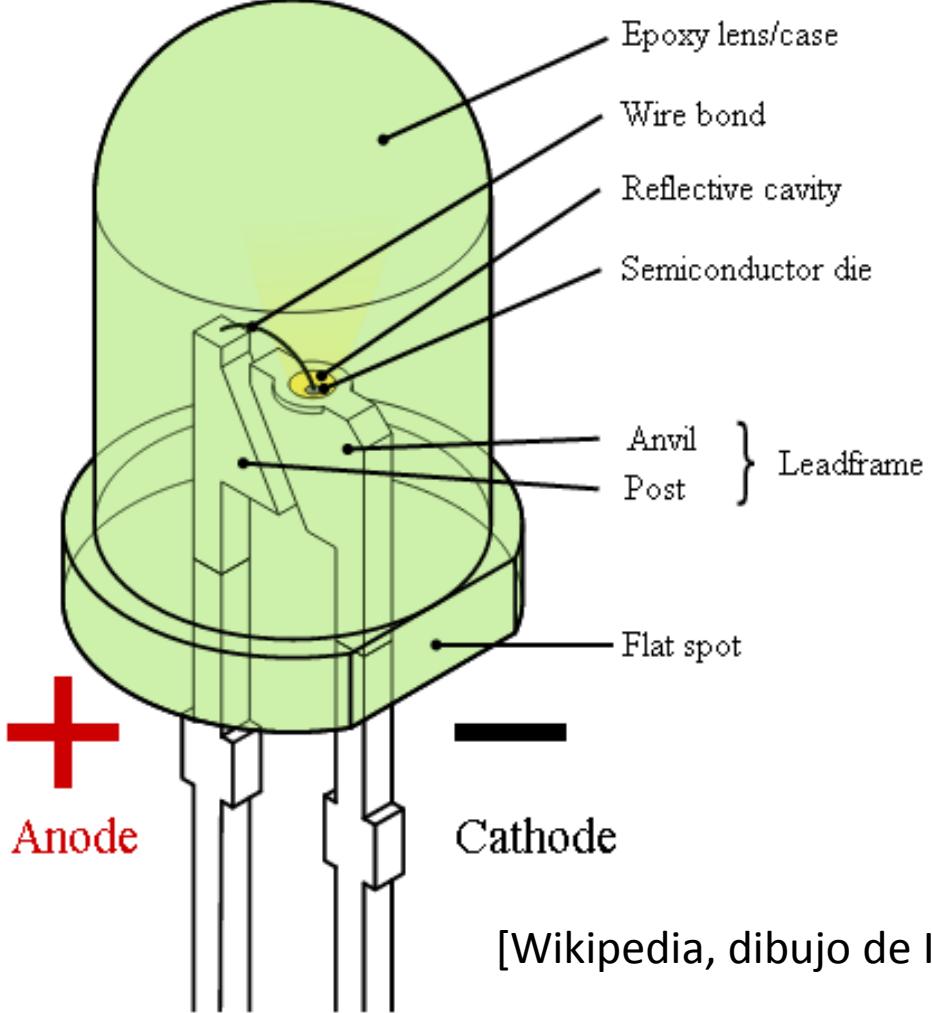
¿Qué es la optoelectrónica?

- La optoelectrónica es la rama de la fotónica que estudia y aplica los dispositivos electrónicos para la **emisión, detección y control** de la luz
- Hay diversos dispositivos que pueden emitir luz, con diferentes características de velocidad, eficiencia, espectro de salida, etc.
- También hay una gran diversidad de dispositivos capaces de detectar fotones
- Esta cápsula es una primera introducción a la optoelectrónica, con un énfasis en los diodos capaces de emitir luz – LEDs

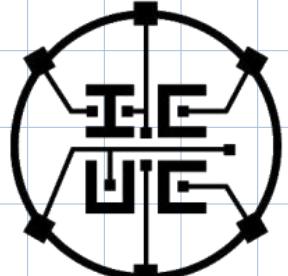


Light-emitting diode

Es un diodo con encapsulado transparente, diseñado para generar fotones



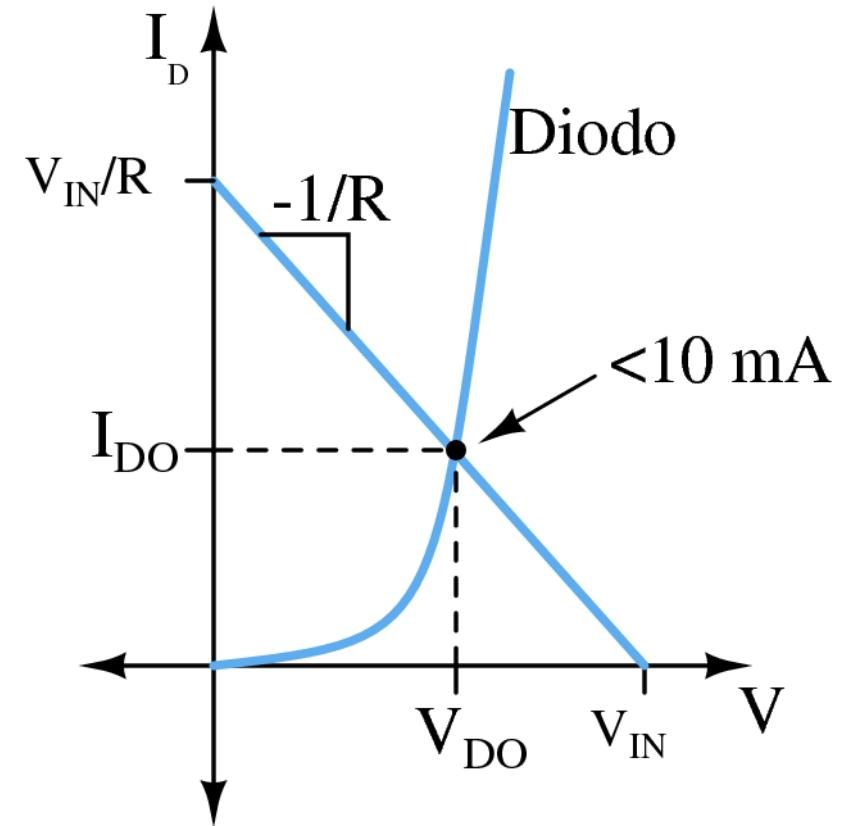
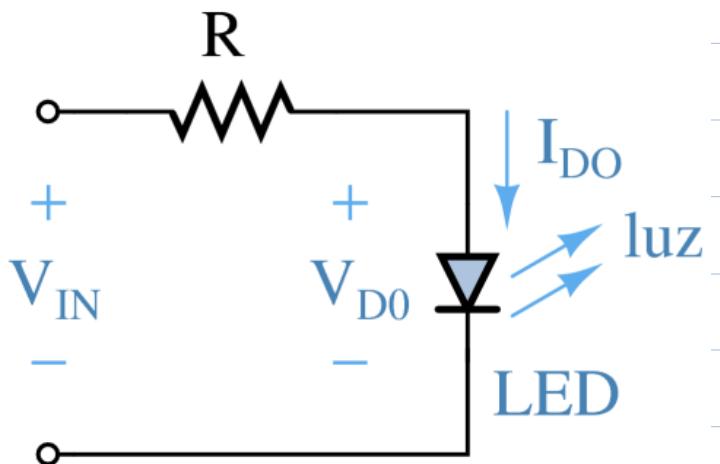
[Wikipedia, dibujo de Inductiveload, dominio público]



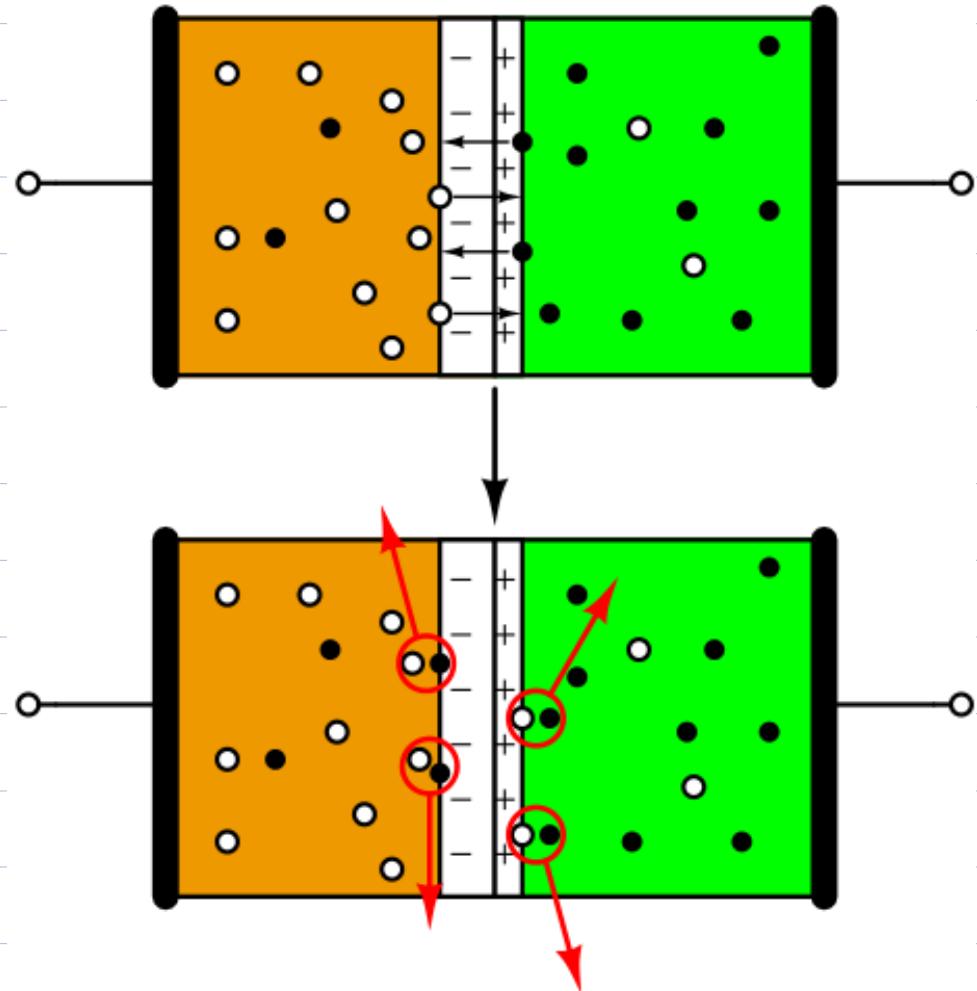
INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Polarización de un LED

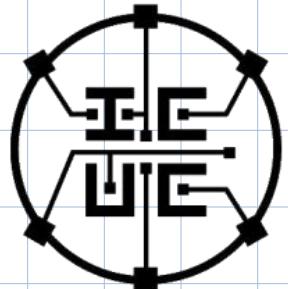
- El LED debe operar a una corriente del orden de 10 mA a 20 mA, según su tamaño
 - Los LEDs de potencia, empleados en iluminación, tienen un área de unión mucho mayor y por lo tanto soportan corrientes mayores
- Para limitar la corriente usamos un resistor en serie o una fuente de corriente



Unión PN en un LED



La unión debe ser fabricada de un semiconductor con “direct bandgap”, como Arseniuro de Galio (...no sirve el Silicio)



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

E_G y el color del LED

- Energía de un fotón: $E = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$
- La energía de cada fotón emitido por un LED está relacionada con la energía de separación de banda
- Esta última puede ser parecida al voltaje del LED
 - La relación no es tan directa porque
 - V_{bi} no es E_G/q (recordar 3.08)
 - El voltaje depende de la corriente
 - Puede haber caída de tensión óhmica además de la caída de tensión debida al voltaje integral de la unión

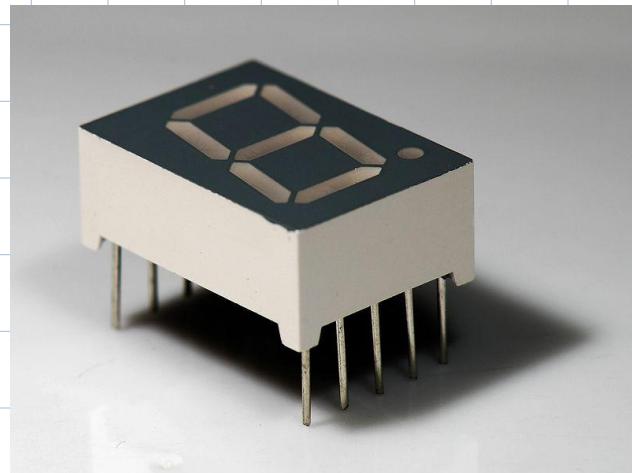
¿Existen LED blancos?



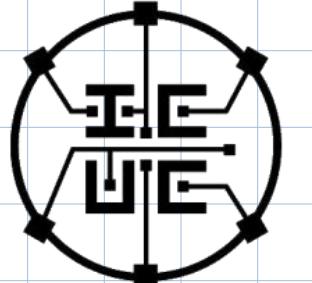
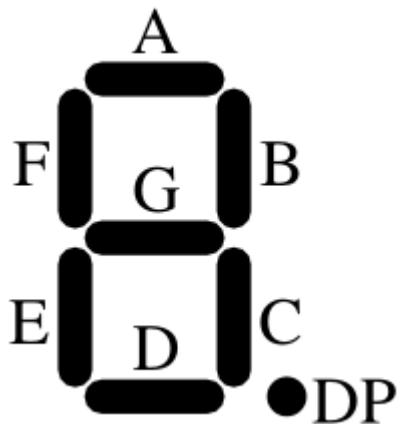
Color	Longitud de onda (nm)	Energía (eV)
Violeta	410	3
Azul	480	2.6
Verde	530	2.3
Amarillo	580	2.1
Naranja	610	2.0
Rojo	680	1.8

Display de 7 segmentos

- ¿Cuántos pines contamos?
- **¿Cuántos necesitamos para 7 – 8 LEDs?**

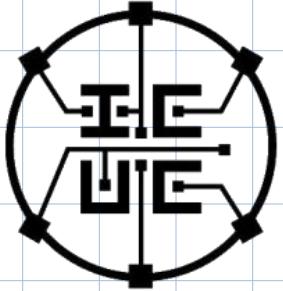


[Foto de Peter Halasz –
Wikipedia, CC Atribution-
share alike 2.5 generic
license]





3.17



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Optoelectrónica: fotodetectores

Dependencias:

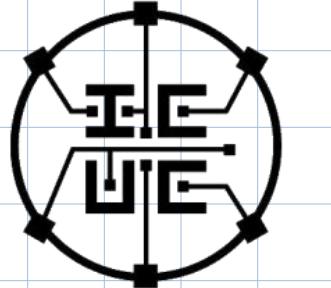
- 3.08 La unión PN
- 3.09 La unión PN en polarización inversa y ruptura

angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

Introducción

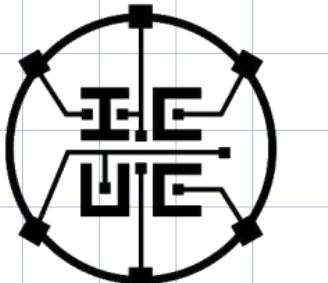
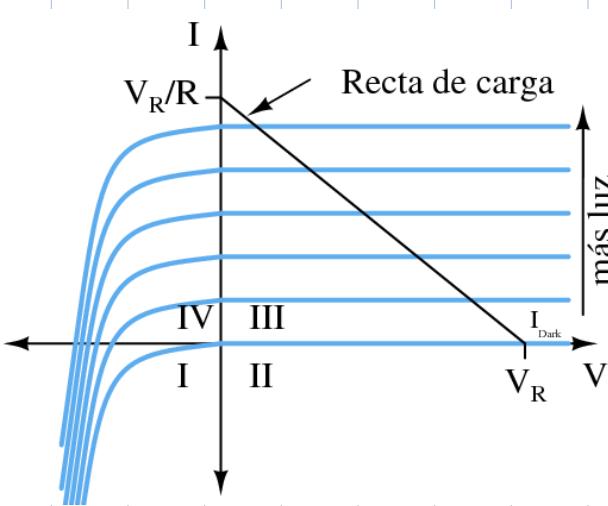
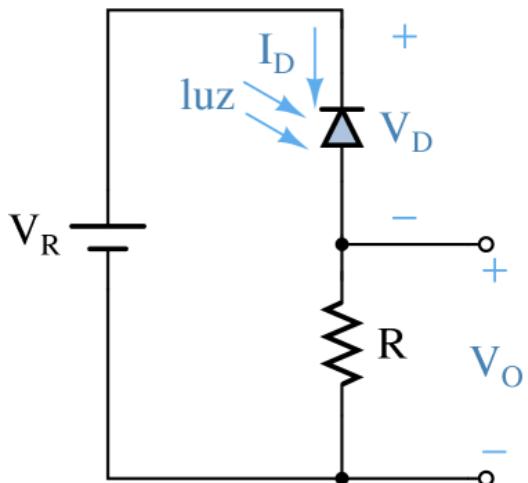
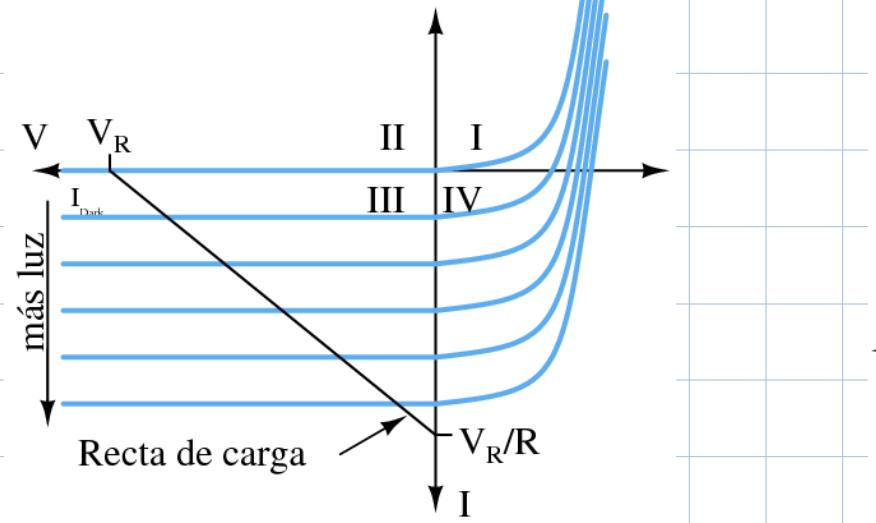
- Los fotodetectores, presentes en una gran variedad de circuitos y aparatos electrónicos, han permitido una enorme cantidad de nuevas aplicaciones
 - Cámaras, controles remotos infrarrojos, sensores de variado tipo, etc.
- Los fotodetectores también han permitido el desarrollo de líneas de investigación mediante el desarrollo de instrumentos únicos
- El principio de funcionamiento de los fotodetectores es la aparición de portadores de carga como consecuencia de fotones incidentes
- Esta cápsula es una breve introducción



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

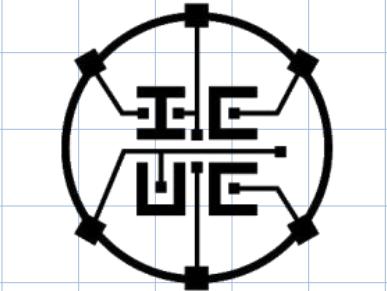
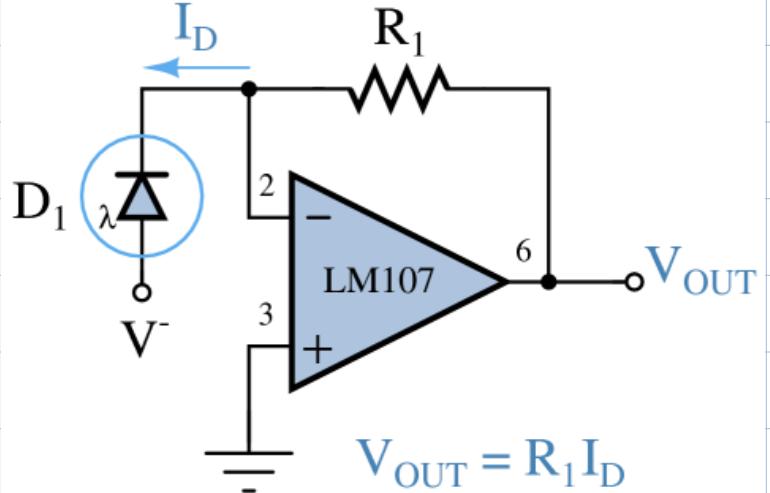
Fotodiodo: Un LED “al revés”

- Uso en polarización inversa (fig), 3^{er} cuadrante
- **Corriente oscura:** Corriente de fuga sin iluminación (I_{dark})
- Absorción de luz genera pares y **fotocorriente**
 - Fotocorriente es corriente inversa
 - Mueve curva del diodo hacia abajo



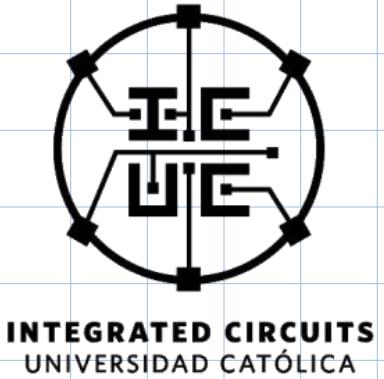
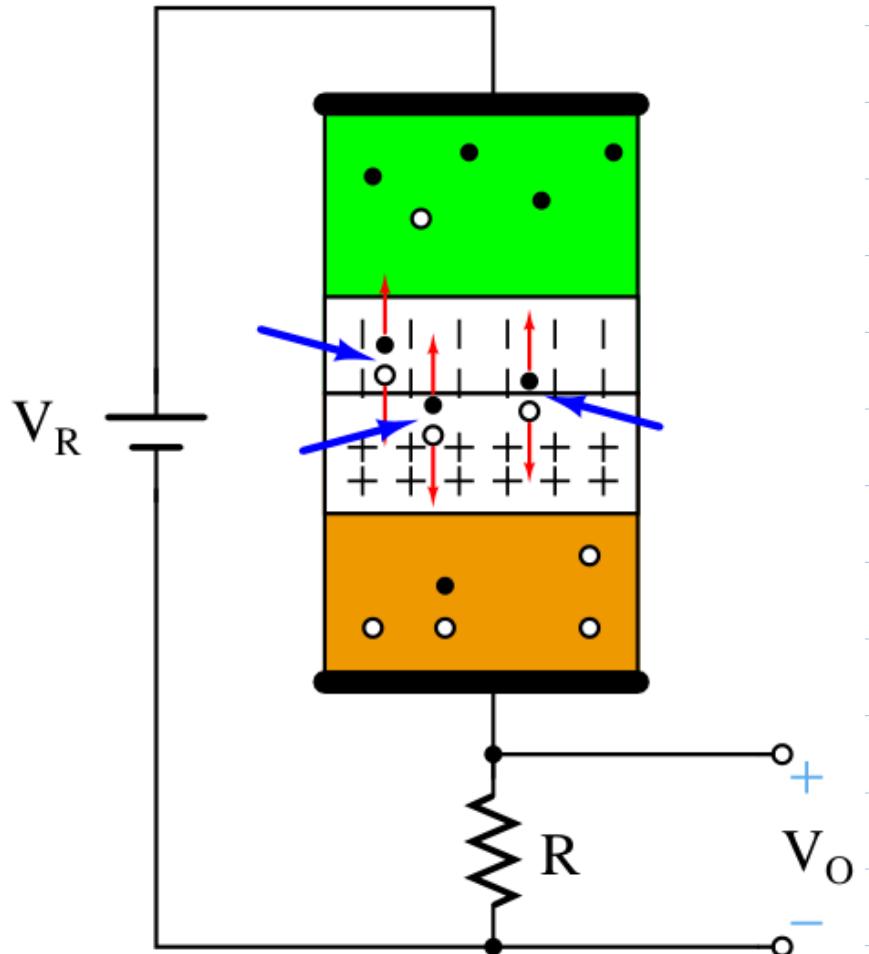
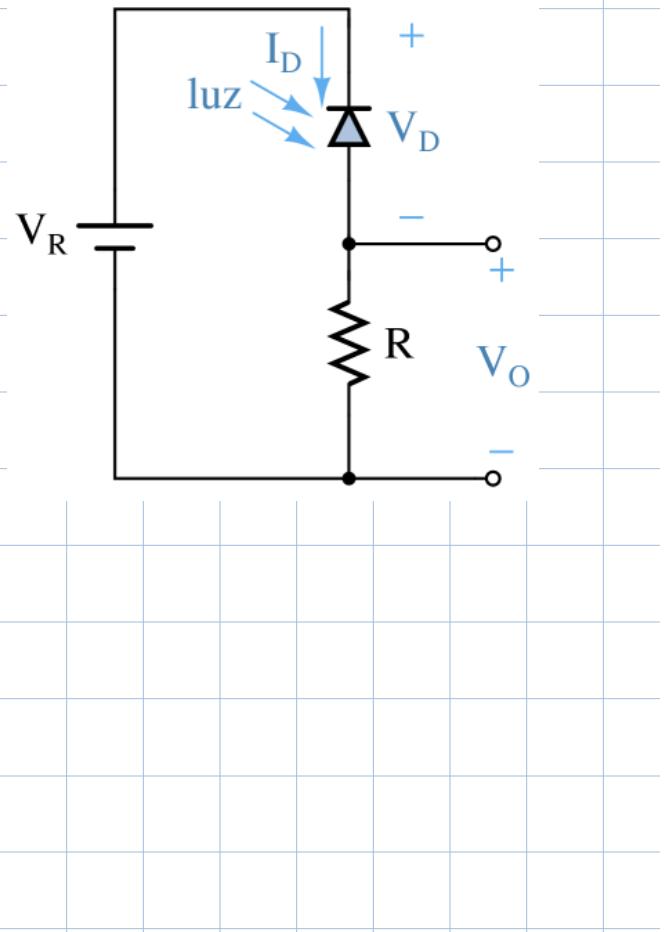
INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Amplificador para fotodiodo (hay más alternativas)



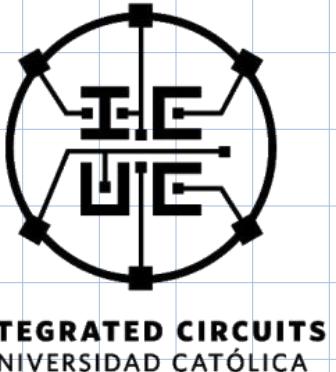
<http://www.ti.com/ww/en/bobpease/assets/AN-31.pdf>

La unión PN en un fotodiodo



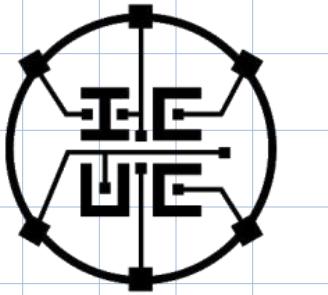
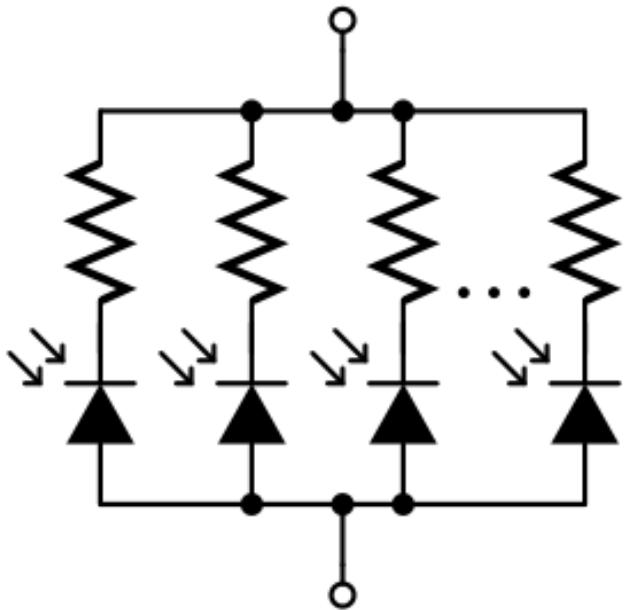
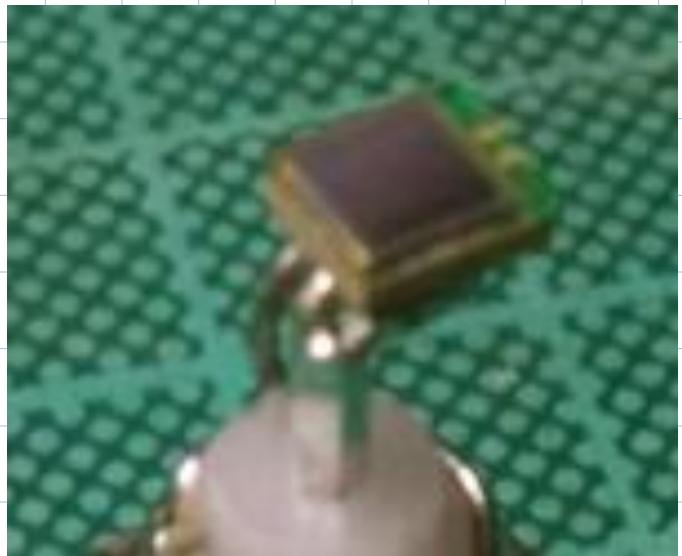
Diodo PIN, SPAD y diodo avalancha

- PIN: P – Intrínseco – N, maximiza ancho de región de agotamiento donde se generan los pares
- Avalanche (APD): PIN, PN o metal-semiconductor, son operados cerca del punto de ruptura por avalanche
 - Avalanche amplifica señal, sin amplificar el ruido
- SPAD: single-photon avalanche diode, similar al APD pero diseñado para operar muy por sobre el voltaje de ruptura (modo Geiger)



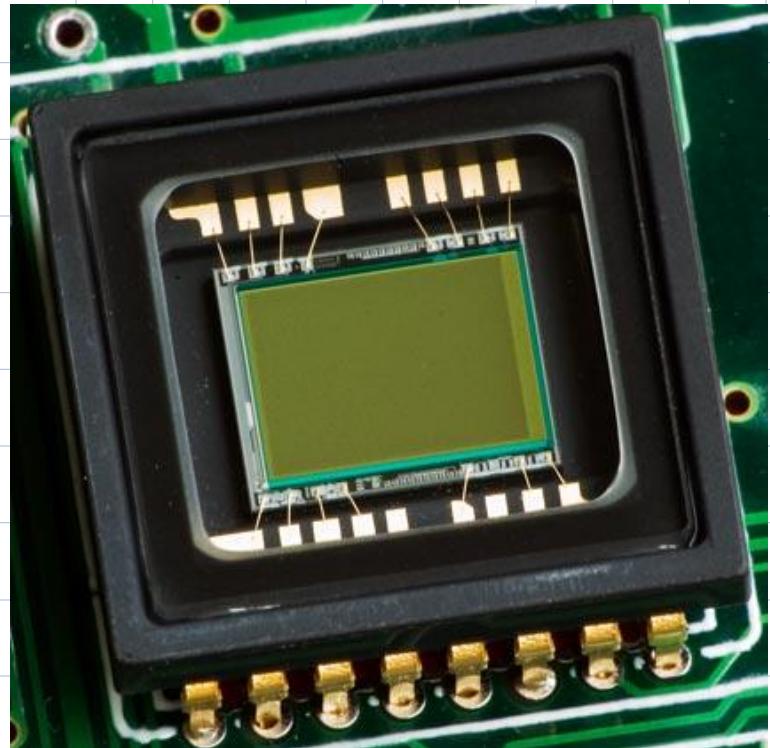
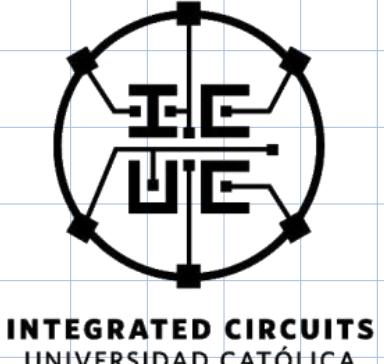
MPPC: Multi-pixel photon counter

- También llamado SiPM, sirve para contar fotones
- Es un arreglo de APDs, cada uno de los cuales puede producir un electrón al incidir un fotón, y amplificarlo por ~ 1 millón



CCD: charge-coupled device

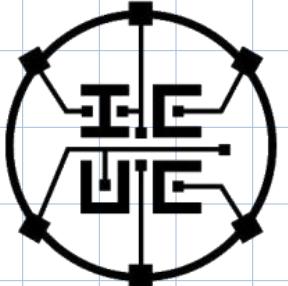
- Es un arreglo de fotodiodos capaces de transportar la carga integrada en cada uno mediante campos eléctricos producidos en un arreglo de electrodos
- Sirven como sensores de imágenes de alta calidad para instrumentación científica
- Son caros de fabricación, requieren proceso de fabricación especial



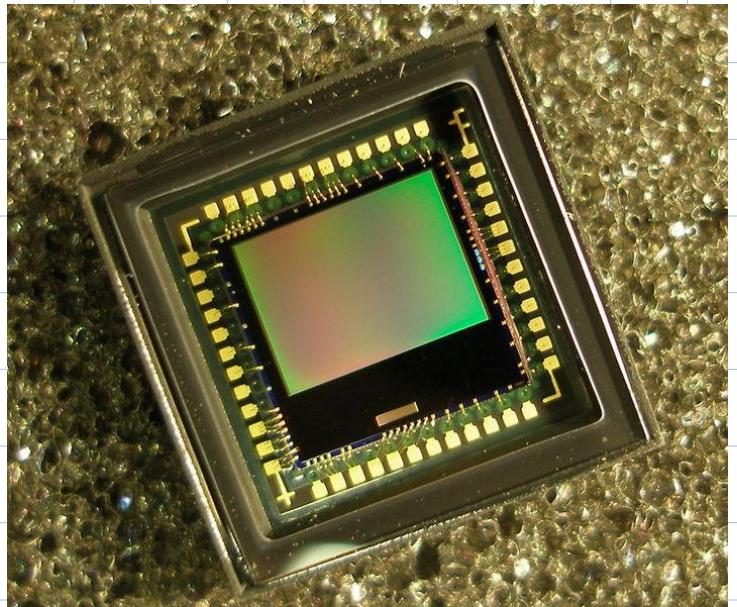
[Foto por Serych, dominio público]

CMOS image sensor o CMOS imager

- Es un arreglo rectangular de fotodiodos, cada uno de los cuales integra una cantidad de carga en su capacitancia parásita
- Esa carga es luego leída mediante circuitos similares a los de una memoria (arreglo de bits), de acceso aleatorio
 - Pueden llevar un amplificador en cada pixel (APS)
- Presentes en casi todas las cámaras digitales
- Son producidos en procesos CMOS estándar
 - Por lo tanto, mucho más barato que un CCD



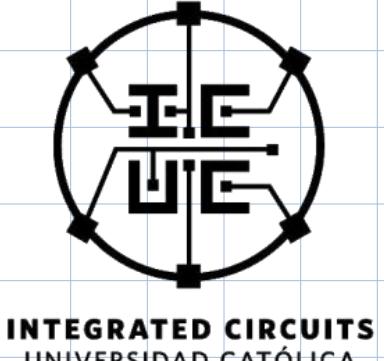
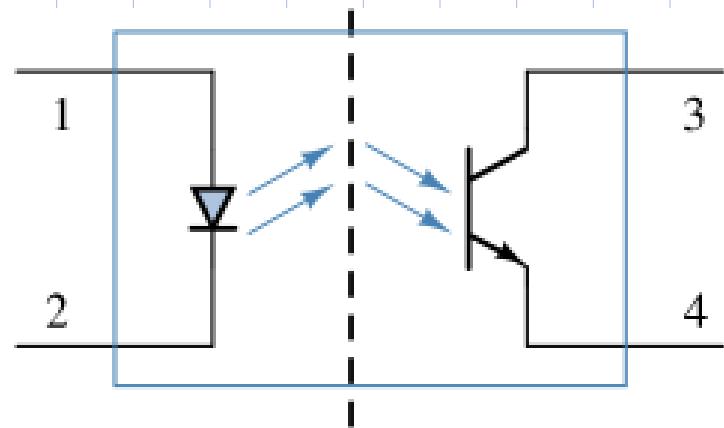
INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



By Filya1 (Own work) [CC BY-SA 3.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>)], via Wikimedia Commons

Optocoupla (optocoupler, opto-isolator)

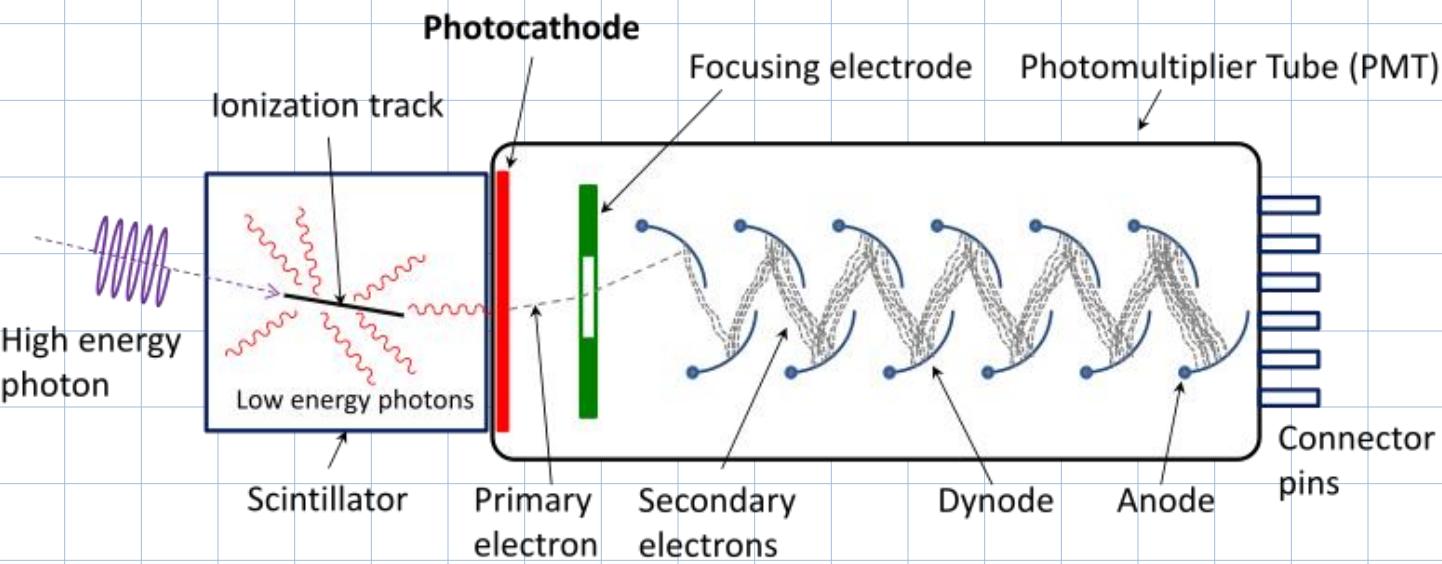
- Permite acoplar de manera óptica dos partes aisladas de un circuito
 - Ni siquiera comparten tierra...
 - **¿Qué utilidad podría tener?**



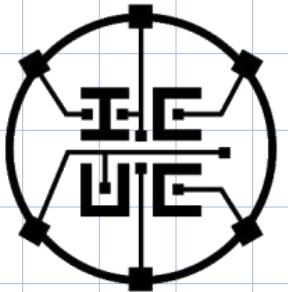
By SparkFun Electronics from Boulder, USA (Optoisolator with Darlington Driver - 1 Channel) [CC BY 2.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by/2.0>)], via Wikimedia Commons

PMT: tubo fotomultiplicador

- Es un tubo de vacío sensible a fotones individuales
 - No es electrónica de estado sólido
- Produce un electrón al incidir un fotón sobre el photocátodo
- El electrón es acelerado por un alto campo eléctrico producido entre electrodos (dinodos)
- Cada electrón acelerado entre dinodos produce muchos más por proceso de avalancha, resultando en una carga del orden de 1 millón de electrones por cada fotón incidente



Qwerty123uiop [CC BY-SA 3.0
(<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>)], via Wikimedia Commons

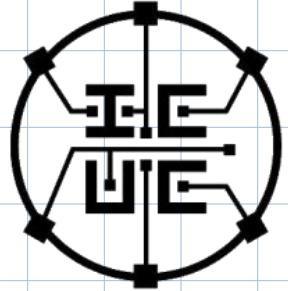


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

[Foto por Poil, Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license]



3.18



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Otros diodos

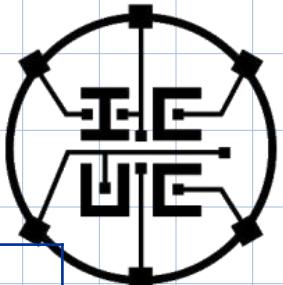
Dependencias:

- 3.10 La unión PN en polarización directa

angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas

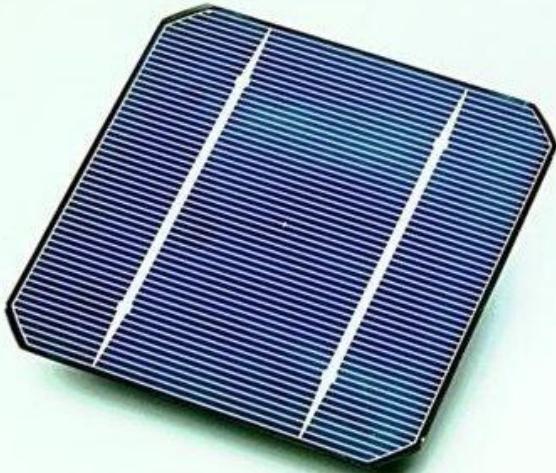
Algunos tipos de diodos



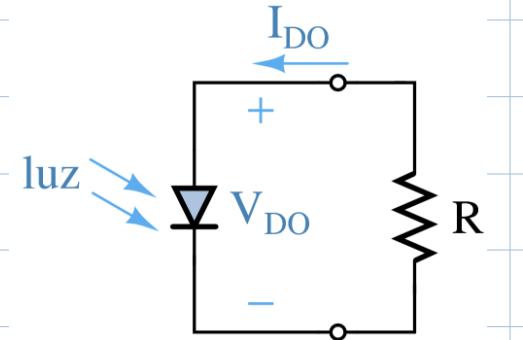
INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Dispositivo	Descripción	Aplicación
Diodo rectificador	Válvula de corriente	Rectificadores
Diodo Zener	Zona de ruptura baja	Reguladores de tensión
LED	Emite luz no coherente	Indicadores
Display 7 segmentos	Arreglo de LEDs	Presenta caracteres hexadecimales
Fotodiodo	Luz produce portadores minoritarios	Detectores de luz
Optocupla	LED + Fotodiodo	Aisladores I/O y detectores de paso
Diodo Láser	Emite luz coherente	Comunicaciones
Diodo Schottky (SBD)	Unión metal – N-	Schottky – TTL; rectificador; protección de ESD
Celda solar	Unión PN, etc.	Conversión energía solar en eléctrica
Varactor o varicap	C_j controlado por V_r	Sintonizador de radio
Varistor	Ruptura en ambas direcciones	Protecciones de peak de red
Diodo limitador de corriente	Mantiene corriente constante	Regulador de corriente
Diodo de recuperación de escalón (SRD)	Genera pulsos extremadamente cortos	Generador de pulsos o amplificador paramétrico (microondas)
Diodo túnel (diodo Esaki)	Operación muy rápida y zona de resistencia negativa	Osciladores de alta frecuencia
Diodo opuesto (backward diode)	Conduce mejor en forma inversa	Rectificador de señales débiles

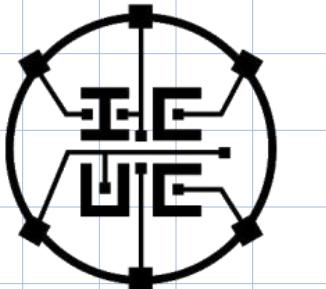
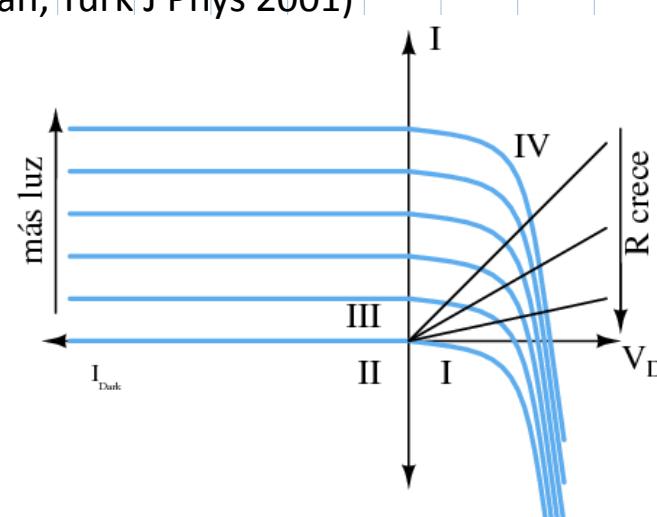
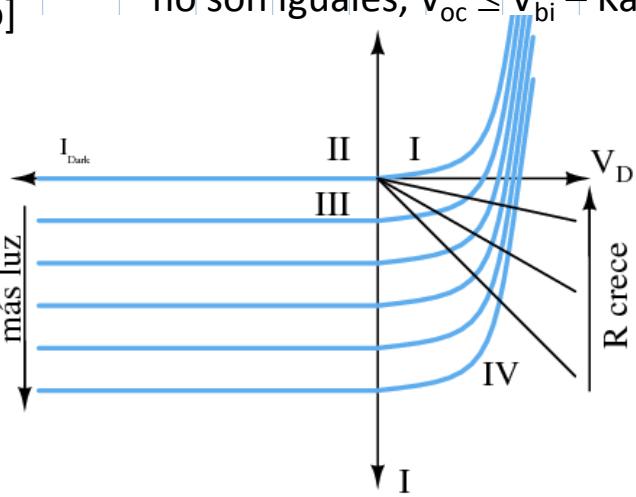
Celda solar



[Wikipedia – Dominio Público]



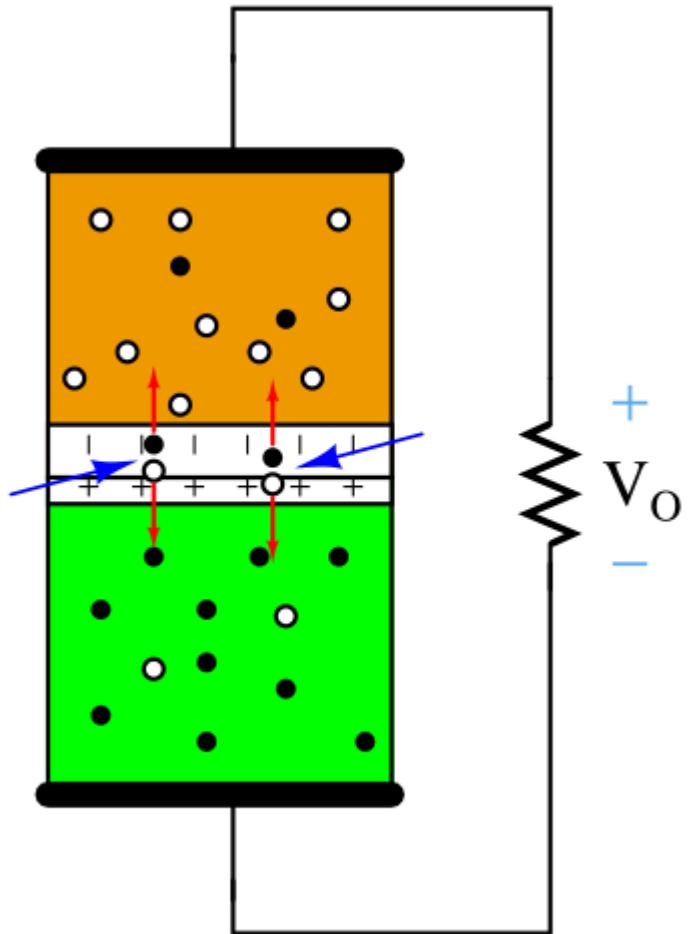
- A diferencia de los fotodiodos, las celdas solares funcionan en región directa (voltaje positivo y corriente negativa entregando potencia, 4º cuadrante)
 - Aunque voltaje es positivo, corriente es negativa, porque photocurrent domina por sobre la corriente de polarización directa
- Condiciones extremas ($R=0$, $R=\infty$) definen límites de curva
 - Máxima transferencia de potencia está en algún punto intermedio
- El voltaje de circuito abierto V_{oc} está relacionado con V_{bi} (pero no son iguales, $V_{oc} \leq V_{bi}$ – Kaplan, Turk J Phys 2001)



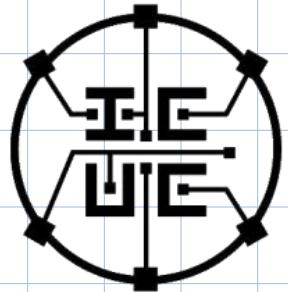
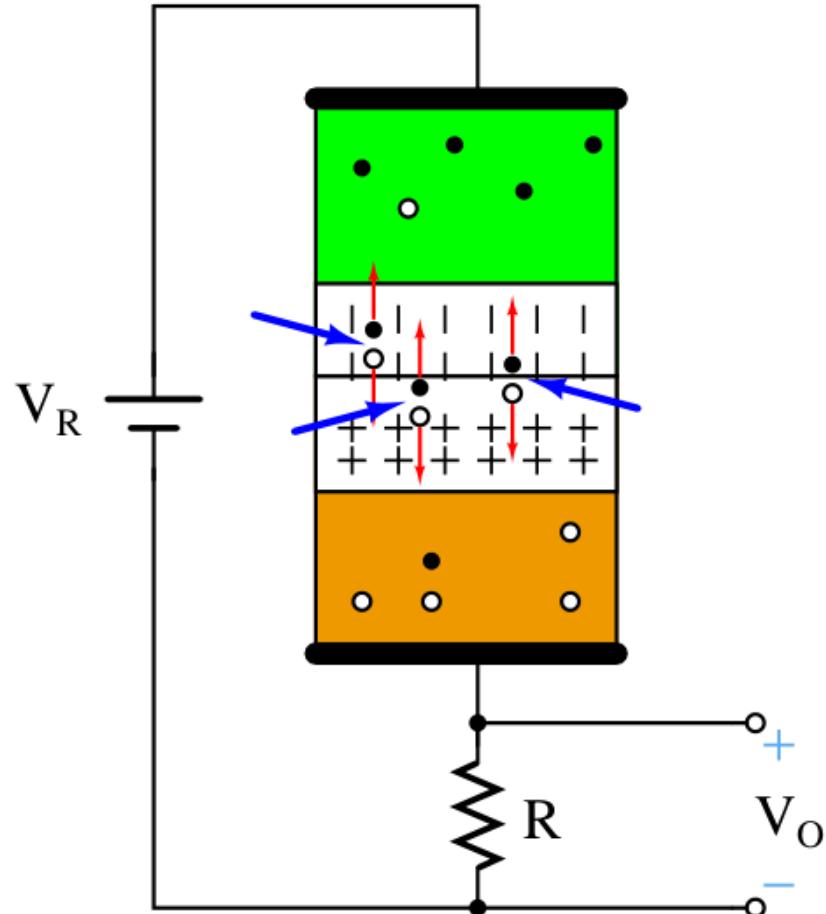
INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Unión PN en celda solar (vs. fotodiodo)

Celda solar: polarización directa



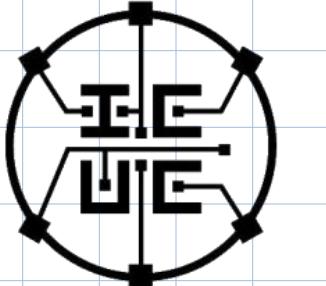
Fotodiodo: polarización inversa



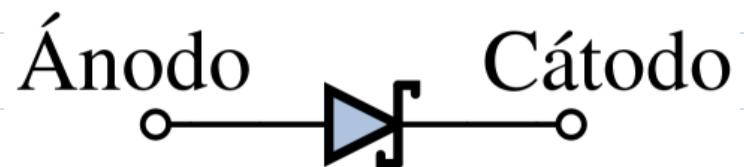
INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Schottky Barrier Diode (SBD)

- Es un diodo de unión metal-semiconductor
 - no es una unión PN
- Características I-V similares a las de un diodo de unión
 - Pero debido a un fenómeno diferente: inyección de electrones desde el semiconductor, produciendo la corriente de emisión termoiónica
 - Básicamente, la ecuación del diodo es la misma, pero la ecuación para I_s cambia
 - Capacitancia es menor, pueden llegar a frecuencias mucho más altas

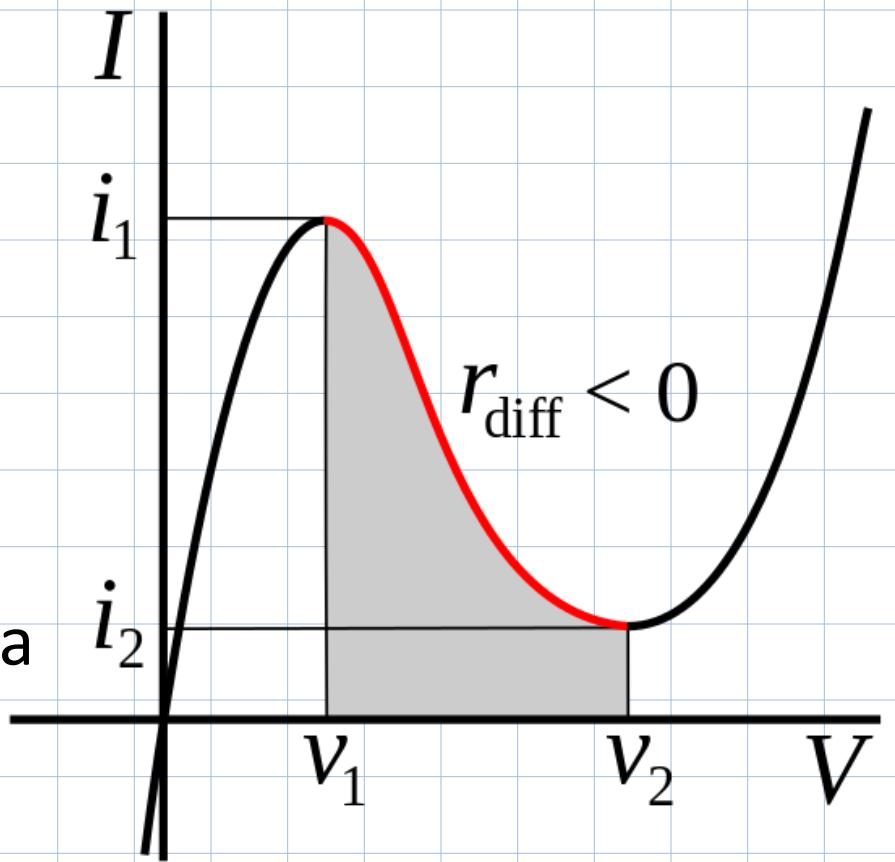
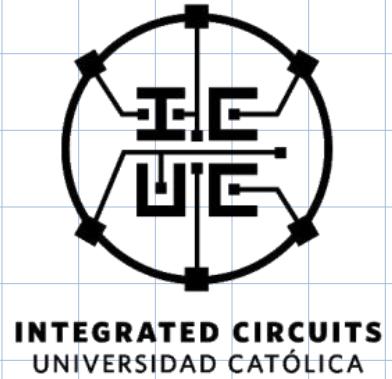


INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA



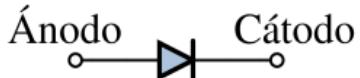
Diodo Esaki o diodo túnel

- Puede operar a muy alta frecuencia gracias al efecto túnel
- Inventado en 1957 por Leo Esaki, Kurose y Suzuki en Sony
- Presenta una región de resistencia incremental negativa en su curva I/V
- Puede ser usado en osciladores de alta frecuencia
- Conducen muy bien en polarización inversa gracias al efecto túnel

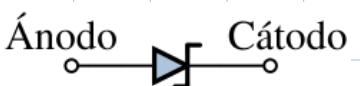


Resumen símbolos de diodos

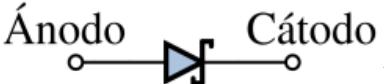
Diodo



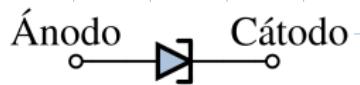
Diodo Zener



Diodo Schottky



Diodo Túnel



LED



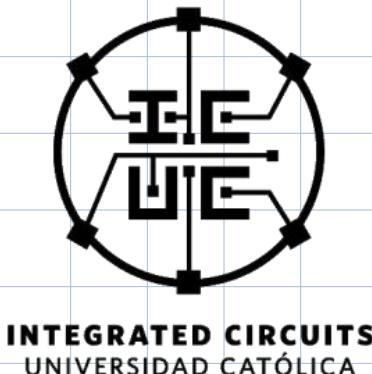
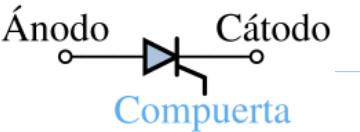
Fotodiodo



Varicap

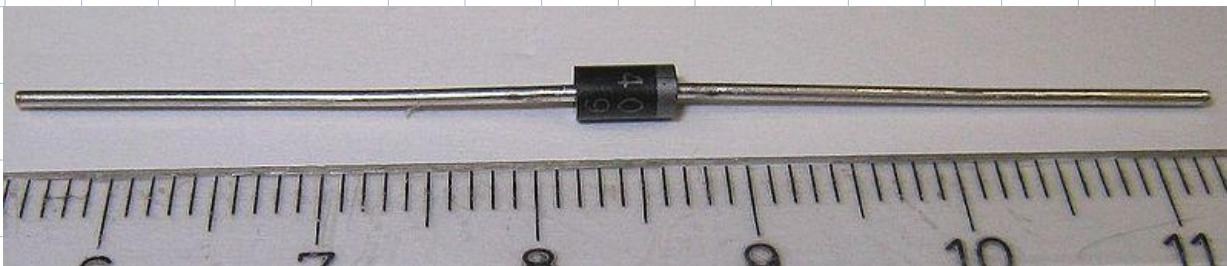
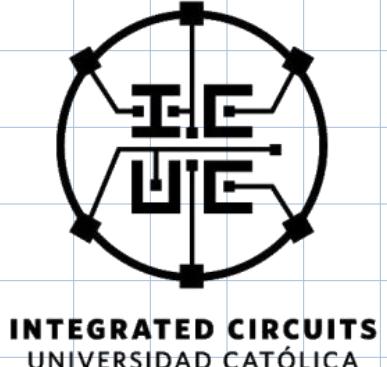


SCR



Algunos diodos comerciales

- 1N4007: rectificador de silicio de propósito general, 1A
- Rectificadores de onda completa: W06M, KBP06, KBCP106
- 1N4148: diodo de silicio para aplicaciones de conmutación, 0.15A
- 1N5819: diodo Shottky para rectificadores de alta frecuencia
- IR333A: LED IR (para transmisor IR)
- PD438B: Fotodiodo (para receptor IR)



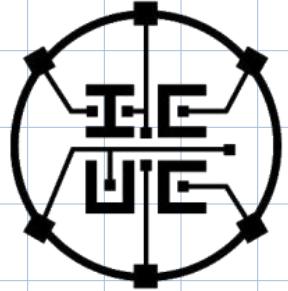
By Vonvon (Own work) [CC BY-SA 3.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>) or GFDL (<http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html>)], via Wikimedia Commons



By Emilian Robert Vicol from Com. Balanesti, Romania (1N4148-Diodes_43066-480x360) [CC BY 2.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>)], via Wikimedia Commons



3.18



INTEGRATED CIRCUITS
UNIVERSIDAD CATÓLICA

Otros diodos

Gracias por su atención

angel@uc.cl

Electrónica en cápsulas