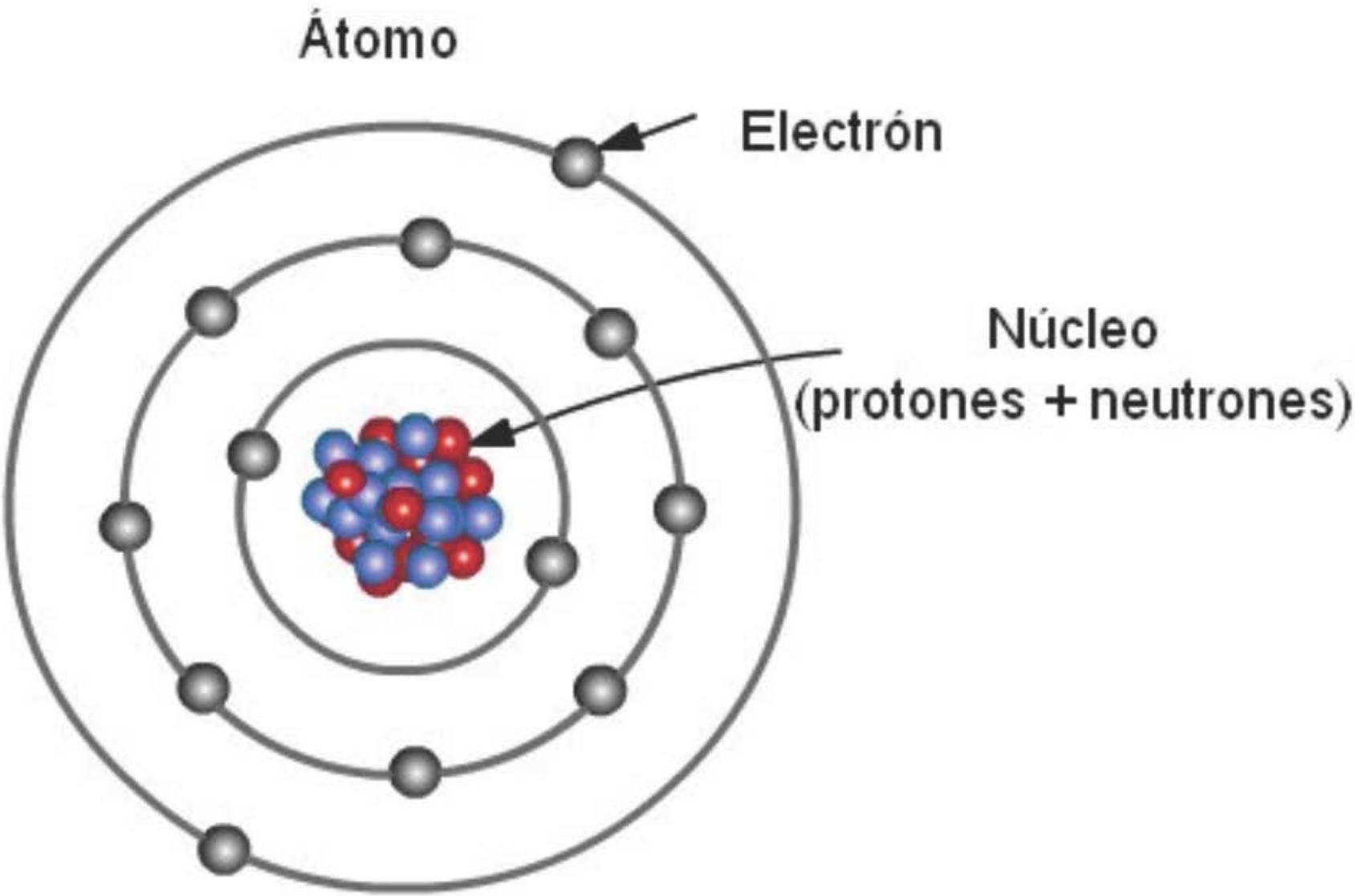
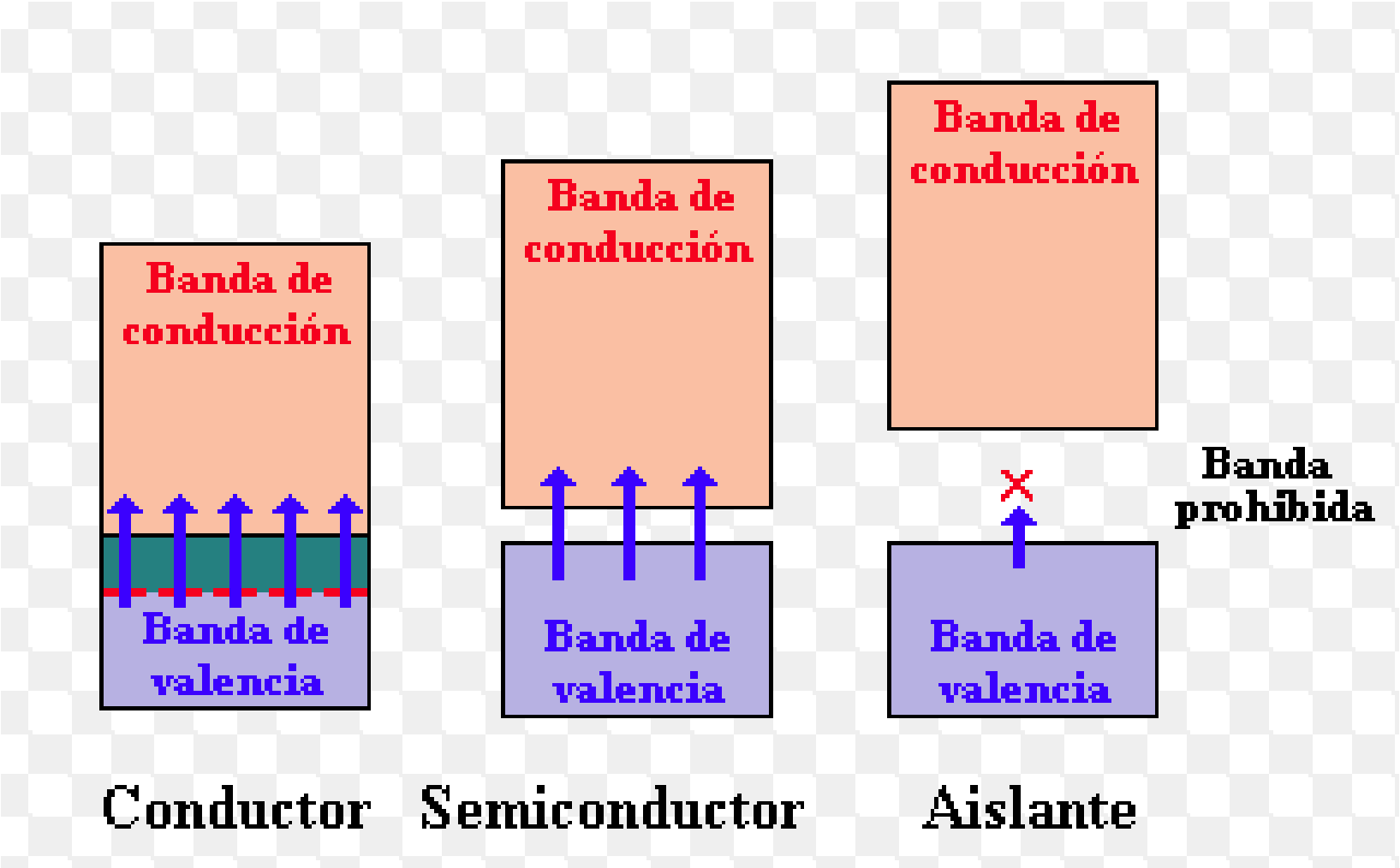
# REVISIÓN DE LA PRÁCTICA 1

# REALIZADA EL VIERNES 15 DE ENERO

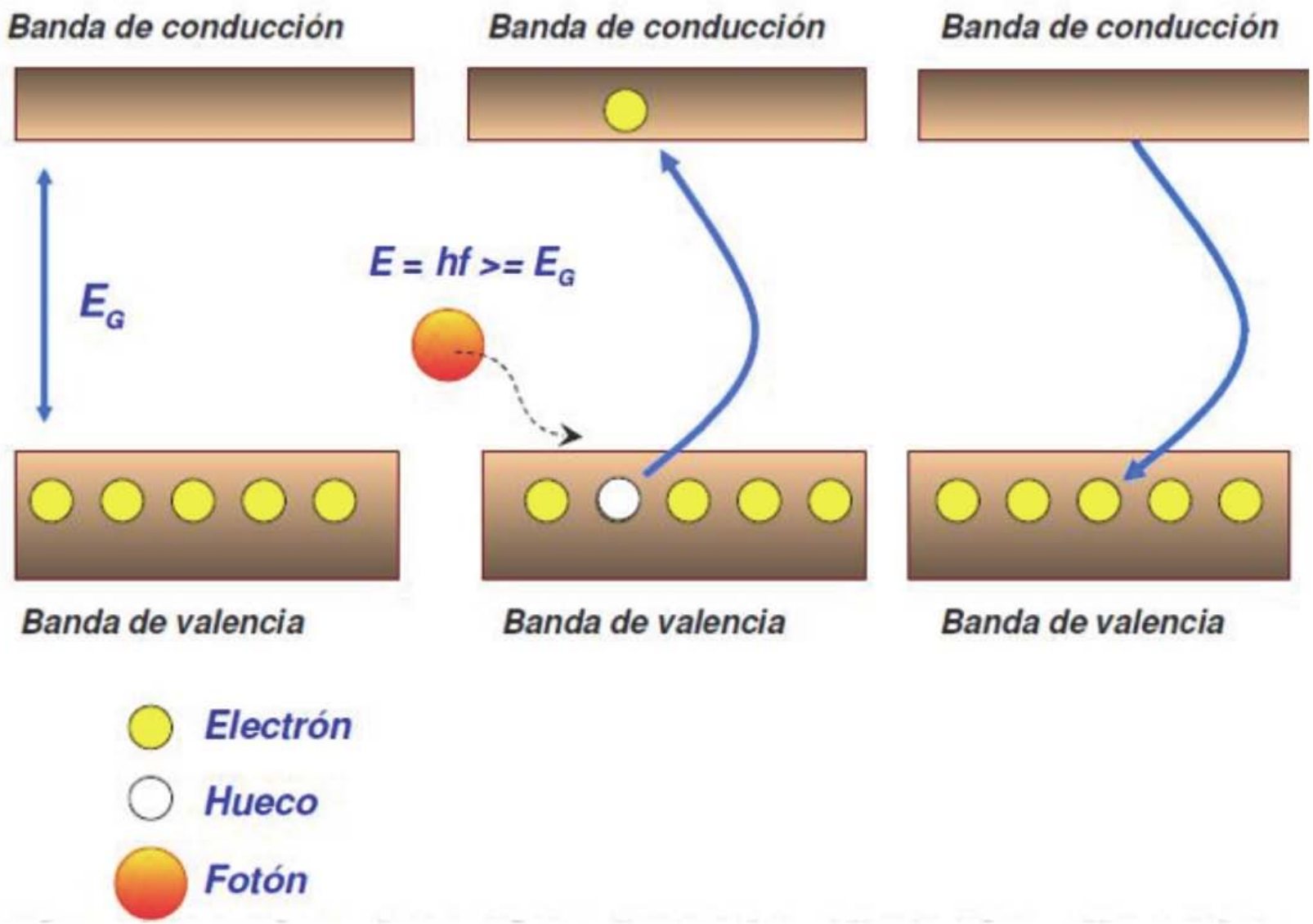
# ESTRUCTURA DEL ÁTOMO



# BANDAS DE VALENCIA Y DE CONDUCCIÓN

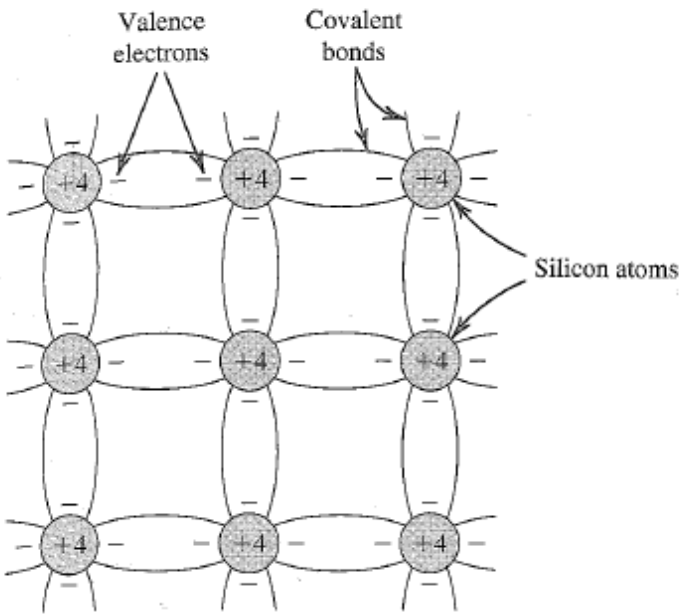


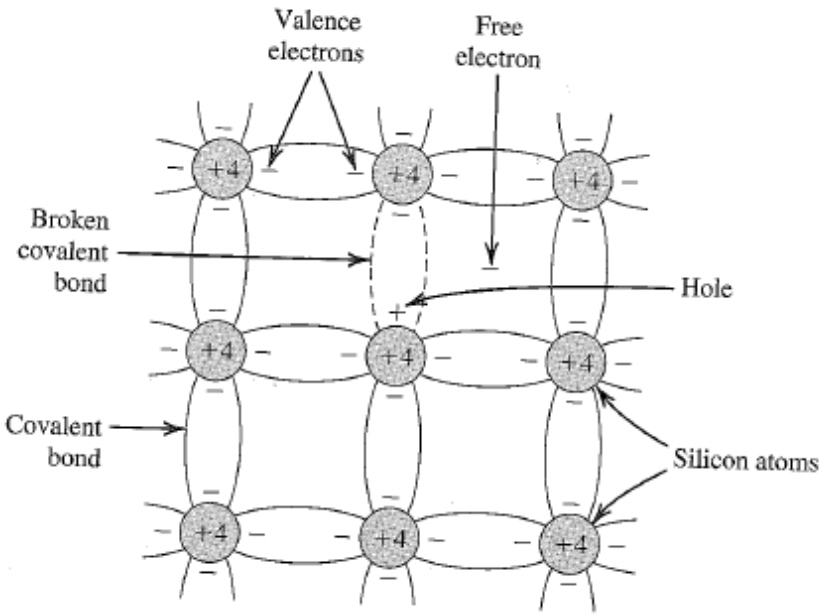
# MECANISMOS DE CONDUCCIÓN EN UN SEMICONDUCTOR



# SEMICONDUCTORES

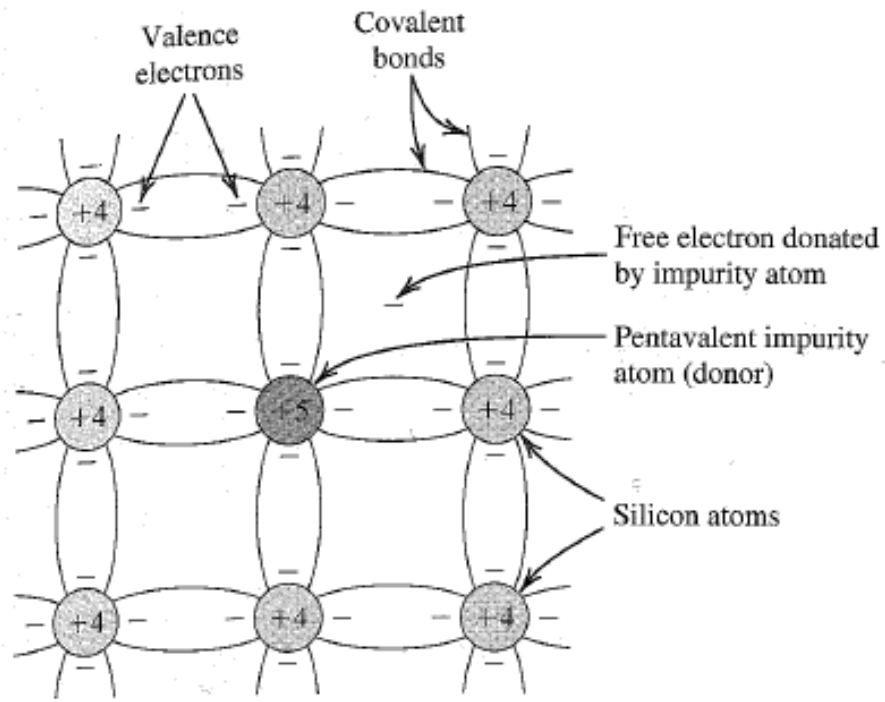
*Semiconductor
*Cristal de silicio
*Enlaces covalentes. Banda de valencia
*Semiconductor intrínseco
*Baja temperatura: No hay conducción
*Temperatura ambiente: Suficiente energía para que algunos electrones pasen a la banda de conducción




* Hay electrones libres
* Los electrones dejan espacios: Huecos
* Los huecos los ocupan otros electrones
* Conducción en la banda de valencia
* Conducción en la banda de conducción
* Electrones: Portadores negativos
* Huecos : Portadores positivos

# DOPAJE CON IMPUREZAS




* Se difunden átomos de impurezas
* Donantes: Valencia 5: Fósforo, Arsénico, Antimonio (Material N)
*Aceptoras: Valencia 3: Boro, Indio, Aluminio (Material P)
* Semiconductores extrínsecos
* Portadores mayoritarios y minoritarios

* En un semiconductor extrínseco la densidad de portadores mayoritarios es aproximadamente constante mientras que la densidad de portadores minoritarios aumenta con la temperatura.

* Cuando la densidad de portadores minoritarios llega al 10% de la densidad de portadores mayoritarios, el semiconductor se comporta como intrínseco.

# TIPOS DE CORRIENTE EN UN SEMICONDUCTOR

**Corriente de Difusión**:

* Es el flujo de carga eléctrica asociado con el movimiento aleatorio debido a la agitación térmica.
* Lo causa el gradiente de concentración de los portadores.
* Los huecos y electrones se mueven en la misma dirección (de zonas de mayor concentración a zonas de menor concentración).
* Las corrientes tienen signo opuesto.

**Corriente de Deriva, Arrastre o Desplazamiento:**

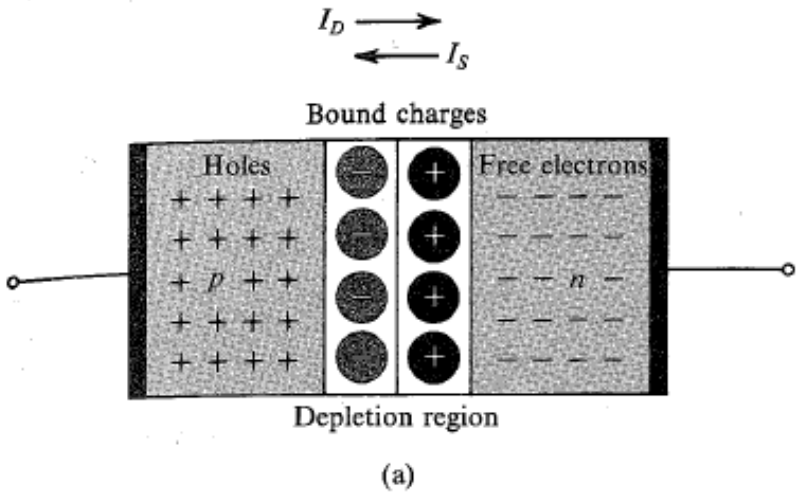
* Es el flujo de carga eléctrica producido por la aplicación de un campo eléctrico.
*Los huecos se mueven en una dirección en la capa de valencia y los electrones se mueven en la otra dirección en la capa de conducción.
* Las corrientes tienen el mismo sentido.

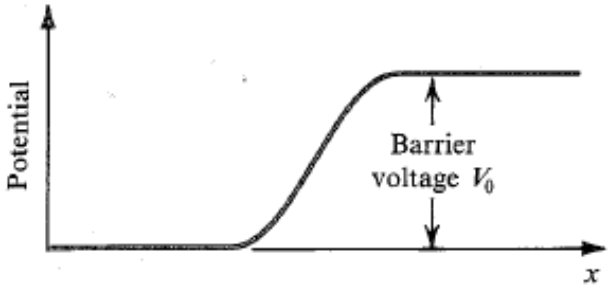
# LA JUNTURA PN

*Se forma al poner en contacto un semiconductor P con uno N.

* Los huecos se difunden de P a N y los electrones de N a P, dando lugar a la **corriente de difusión $I_D$**, cuya dirección es de la región P a la N.

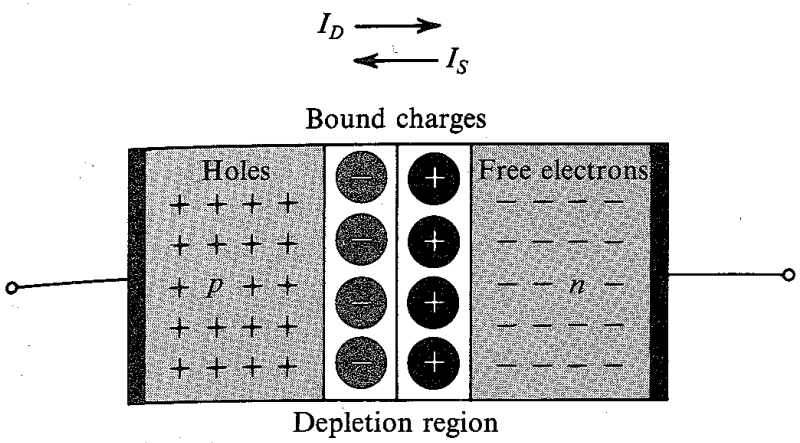
* Al cruzar la juntura, los que eran portadores mayoritarios en su región se convierten en minoritarios y se recombinan con los respectivos átomos.




*Del lado P hay átomos de impurezas aceptoras sin cubrir y del lado N impurezas donantes sin cubrir. Se forma la **región de vaciamiento** o **zona de carga espacial** al quedar átomos (iones) con carga positiva en la región N y negativa en la región P.

* Se genera un campo eléctrico que forma una barrera de potencial $V_O$ la cual se opone a que continúe la difusión.

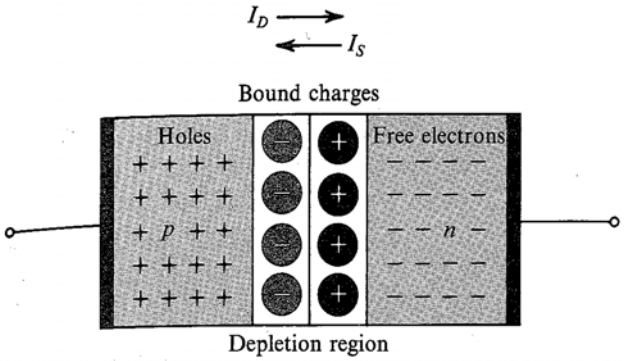



* Además de la corriente de difusión, hay **corriente de deriva $I_S$** debido al movimiento de los portadores minoritarios.

* Los electrones de la región P generados térmicamente que llegan a la barrera de potencial son barridos hacia la región N y los huecos de la región N generados térmicamente son barridos hacia la región P donde pasan a ser portadores mayoritarios.

* Dado que la corriente $I_S$ se debe a los portadores minoritarios generados térmicamente, su valor depende fuertemente de la temperatura y es independiente del valor del voltaje de la barrera de potencial $V_O$

* Bajo condiciones de circuito abierto debe haber equilibrio $\mathbf{I_D = I_S}$




* El equilibrio lo mantiene Vo.

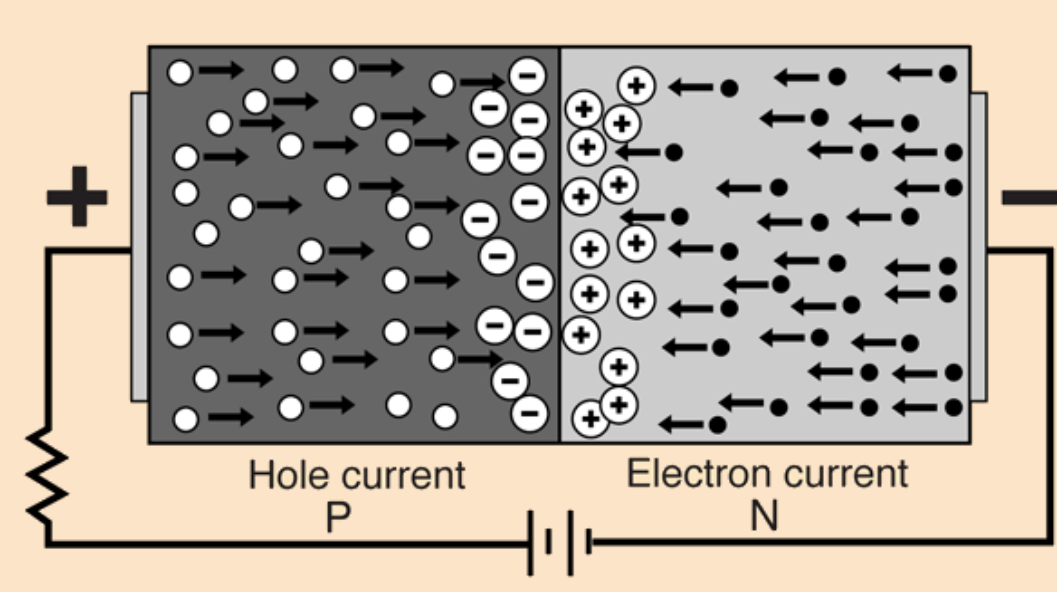
*Si $\mathbf{I_D}$ aumenta porque hay más difusión de una región a la otra, aumentará el número de cargas no cubiertas, por lo que aumentará Vo, lo cual hará que la difusión disminuya, hasta que $\mathbf{I_D = I_S}$.

*Si $\mathbf{I_S}$ aumenta, el número de impurezas sin cubrir de cada lado disminuye, por lo que la zona de carga espacial se hace más estrecha, el valor de $V_O$ disminuye, lo cual hace que aumente la corriente de difusión $\mathbf{I_D}$ hasta que nuevamente $\mathbf{I_D = I_S}$.

* Vo depende de las concentraciones de portadores y de la temperatura. Para dispositivos de silicio, su valor está entre 0,6 y 0,8 V.

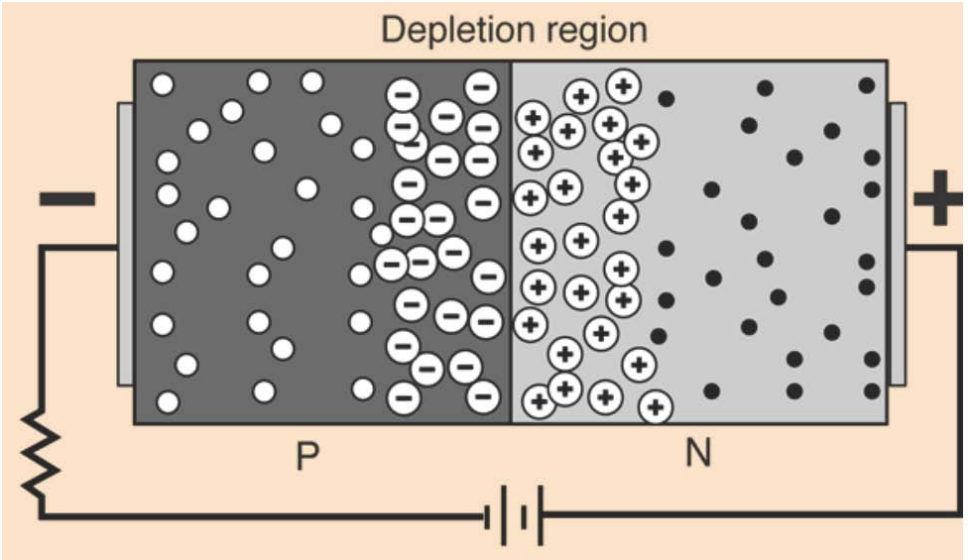
* Cuando el dispositivo no está conectado, el voltaje entre los terminales es cero. Esto se debe a que los voltajes de las junturas metal-semiconductor de los extremos, equilibran exactamente el voltaje de la zona de carga espacial. Si esto no fuera así, podríamos obtener energía de las junturas PN, lo cual viola el principio de conservación de la energía.

# LA JUNTURA PN EN POLARIZACIÓN DIRECTA




Disminuye la barrera de potencial Vo, lo cual hace que aumente la corriente de difusión tanto de los huecos como de los electrones, haciendo que circule una corriente **I** de la región P a la región N, donde $\mathbf{I = I_D - I_S}$.

# LA JUNTURA PN EN POLARIZACIÓN INVERSA



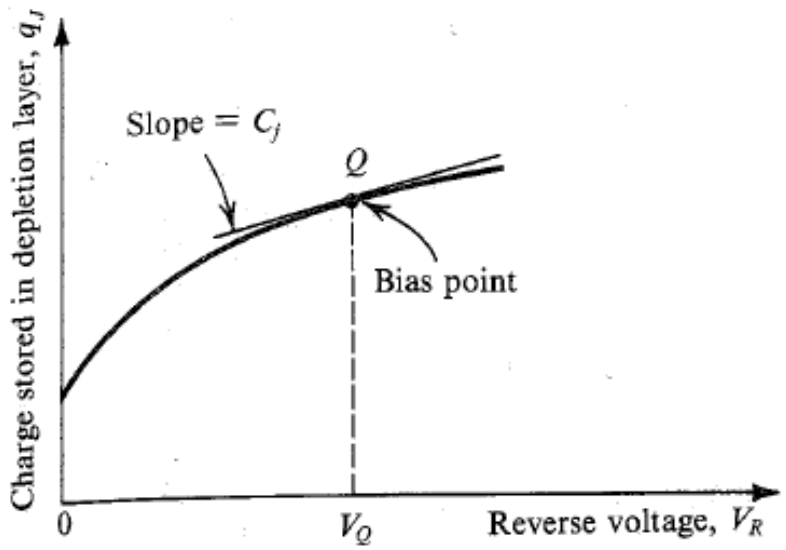

*Se incrementa el voltaje de juntura Vo, lo cual hace que aumenten los átomos ionizados y aumenta la zona de carga espacial.

*Inicialmente se produce una corriente inversa debido al número de portadores que abandonan la zona de carga espacial.

*Una vez en equilibrio, continúa circulando una corriente comparativamente pequeña, denominada corriente inversa del dispositivo.

# CAPACITANCIA DE JUNTURA

Al tener dos áreas cargadas, una con voltaje positivo y otra con voltaje negativo, se dispone de un condensador en la zona de carga espacial, cuya capacitancia depende del voltaje inverso aplicado.




Aunque la función no es lineal, puede trabajarse con valores de carga directamente proporcionales al voltaje de juntura si se consideran variaciones de voltaje pequeñas alrededor del punto Q.

## REGIÓN DE RUPTURA (BREAKDOWN)

*Si se sigue aplicando voltaje negativo a la juntura PN se entra en la región de conducción inversa, o ruptura, o breakdown.

***No todos los tipos de diodos pueden operar en esa zona**. Puede ser destructivo si se sobrepasa la capacidad de disipación máxima de la juntura.

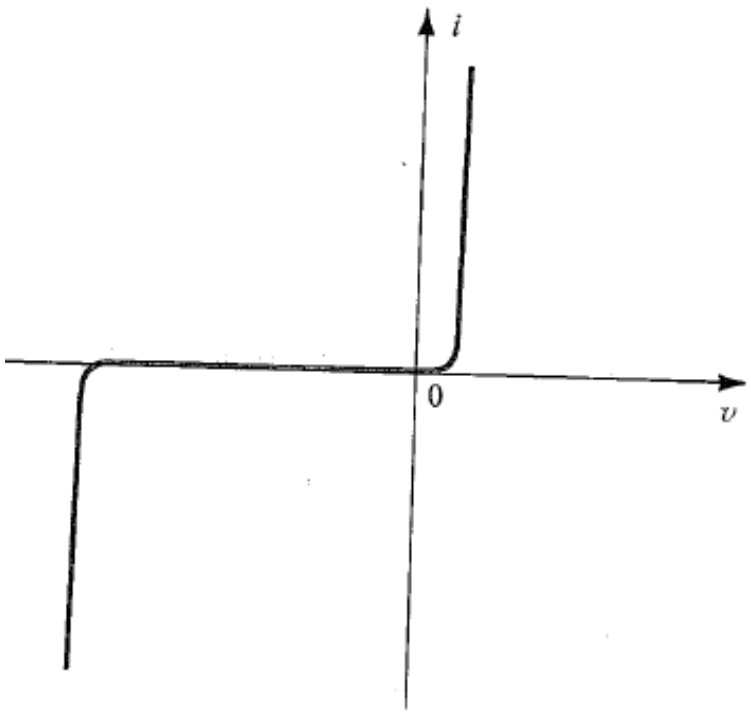
* La ruptura se puede deber al **efecto avalancha o al efecto zener.**

***El efecto avalancha** ocurre cuando el voltaje inverso aplicado introduce suficiente energía para que **los portadores choquen con los iones**, rompiendo un enlace covalente, lo cual genera un hueco y un electrón que se mueven en direcciones opuestas, produciendo a su vez nuevos huecos y electrones, lo cual da origen a una corriente externa con muy poco cambio en el voltaje de juntura.

***El efecto zener** ocurre cuando el campo es mucho mas intenso y la energía introducida es tan elevada que los **enlaces covalentes se rompen** sin que haya colisión. El incremento del voltaje de juntura es muy reducido.

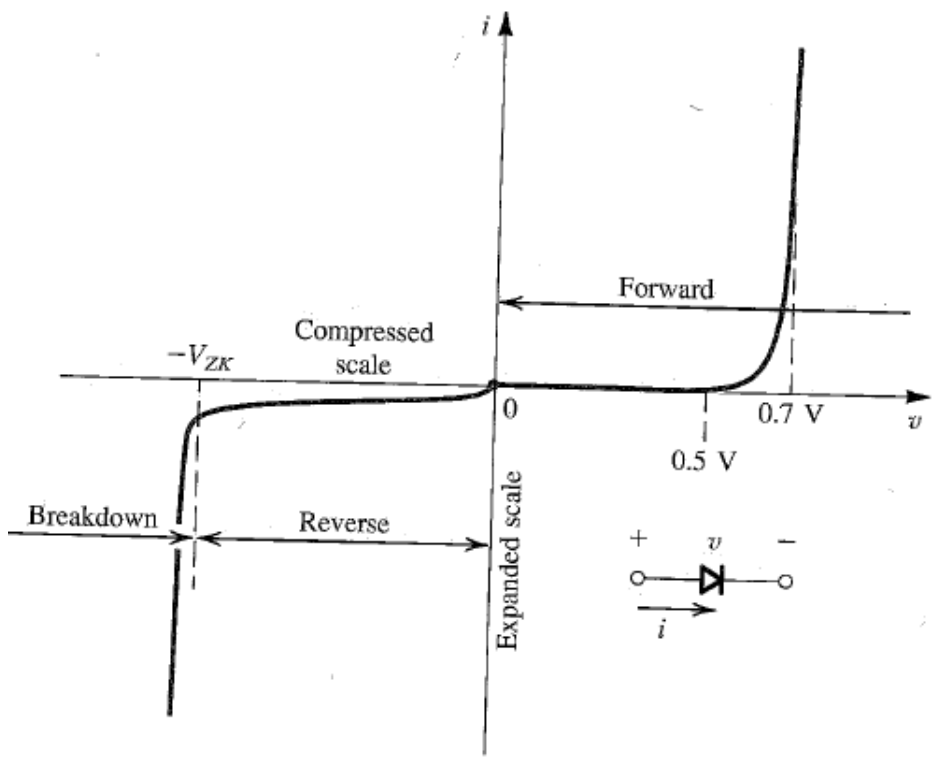
*Menor de 5V: zener;  mayor de 8 voltios: avalancha;  entre 5 y 8 V: ambos.

# RELACIÓN CORRIENTE-VOLTAJE DE LA JUNTURA PN




$$I = I_S\left(e^{v/nv_t} - 1\right)$$

Escalas expandidas o comprimidas para ver mas detalles



# ANÁLISIS MATEMATICO
# MATERIAL SEMICONDUCTOR INTRÍNSECO EN EQUILIBRIO

Concentraciones en material intrínseco: $n = p = n_i$

Concentración intrínseca: $n_i^2 = BT^3 e^{-E_G/kT}$

B: Parámetro dependiente del material. Para el silicio 5,4 x$10^{31}$

T: Temperatura en ºK

EG: Banda de energía. Para el silicio 1,12 eV. Es la mínima energía requerida para romper un enlace covalente y generar un par electrón-hueco

k: Constante de Boltzmann: 8,62 x $10^{-5}$ eV/ºK

A temperatura ambiente $n_i$= 1,5 x $10^{10}$ portadores/$cm^3$

Un cristal de silicio tiene 5 x $10^{22}$ átomos/$cm^3$

Están ionizados menos de uno de cada $10^{12}$ átomos

# CORRIENTE DE DIFUSIÓN

Corriente de difusión de los huecos
dp/dx negativo, Jp positivo en dirección x

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

Corriente de difusión de los electrones

dn/dx negativo, Jn negativo en dirección x

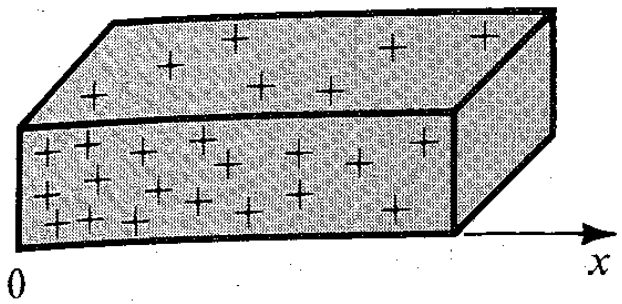
$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx}$$

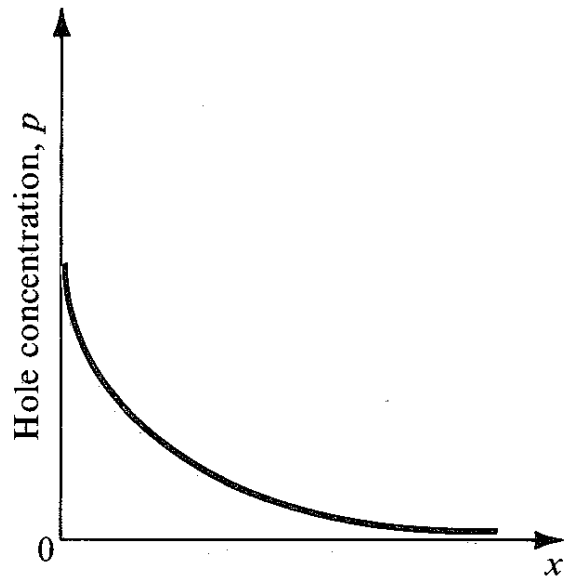
J: Densidad de corriente en A/cm$^2$

Dp: Constante de difusión de los huecos.
Silicio 12 cm$^2$/s

Dn: Constante de difusión de los electrones.
Silicio 34 cm$^2$/s

q: Carga del electrón 1,6 x 10$^{-19}$ C



## CORRIENTE DE DERIVA, ARRASTRE O DESPLAZAMIENTO AL APLICAR UN CAMPO ELÉCTRICO "E"

Corriente de deriva de los huecos

$$J_{p-drift} = qp\,\mu_p E$$

Corriente de deriva de los electrones

$$J_{n-drift} = qn\,\mu_n E$$

Corriente de deriva total

$$J_{drift} = q(p\mu_p + n\mu_n)E$$

Resistividad

$$\rho = 1/[q(p\mu_p + n\mu_n)]$$

$\mu_n$ : Movilidad de los electrones. Silicio1350 $cm^2/V\text{-}s$

$\mu_p$ : Movilidad de los huecos. Silicio 480 $cm^2/V\text{-}s$

Relación de Einstein:

$V_T$ =25,2 mV a 300ºK

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

## MATERIAL SEMICONDUCTOR EXTRÍNSECO TIPO N

Impurezas donantes: Fósforo.

Densidad de impurezas donantes: $N_D$

Átomos ionizados tienen carga positiva

Portadores mayoritarios: Electrones. Portadores minoritarios: Huecos

Densidad de portadores mayoritarios en equilibrio: $n_{no}$

Densidad de portadores minoritarios en equilibrio: $p_{no}$

$$n_{n0} \simeq N_D$$

En equilibrio térmico se cumple:

$$n_{n0} p_{n0} = n_i^2$$

Por lo tanto, en un material tipo N en equilibrio térmico, la concentración de portadores mayoritarios (electrones) permanece prácticamente constante, mientras que la concentración de portadores minoritarios (huecos) depende de la temperatura

$$p_{n0} \simeq \frac{n_i^2}{N_D}$$

## MATERIAL SEMICONDUCTOR EXTRÍNSECO TIPO P

Impurezas donantes: Boro.

Densidad de impurezas donantes: $N_A$

Átomos ionizados tienen carga negativa

Portadores mayoritarios: Huecos. Portadores minoritarios: Electrones

Densidad de portadores mayoritarios en equilibrio: $p_{po}$

$$p_{p0} \simeq N_A$$

Densidad de portadores minoritarios en equilibrio: $n_{po}$

En equilibrio térmico se cumple:

Por lo tanto, en un material tipo N en equilibrio térmico, la concentración de portadores mayoritarios (electrones) permanece prácticamente constante, mientras que la concentración de portadores minoritarios (huecos) depende de la temperatura

$$n_{p0} \simeq \frac{n_i^2}{N_A}$$

# EL VOLTAJE DE JUNTURA

$$V_0 = V_T \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$

Para el silicio, los valores típicos del voltaje de juntura a temperatura ambiente, están entre 0,6 y 0,8 V

# ANCHO DE LA REGIÓN DE CARGA ESPACIAL

Por lo general uno de los materiales está mucho más dopado que el otro.

La zona de vaciamiento se extenderá mas en el más ligeramente dopado.

Para que se cumpla la condición de igualdad de carga:

$$qx_p A N_A = qx_n A N_D$$

De donde

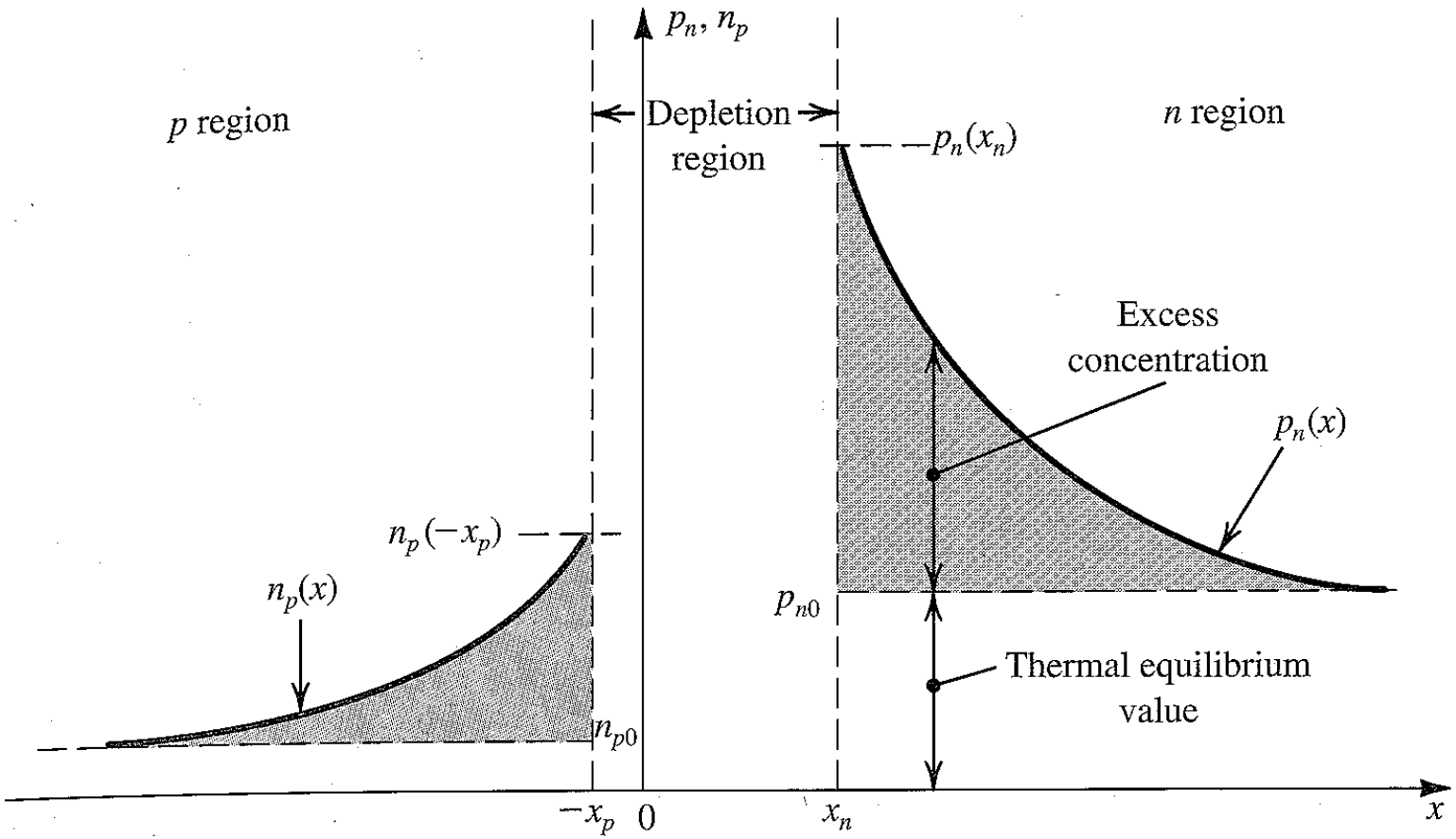
$$\frac{x_n}{x_p} = \frac{N_A}{N_D}$$

El ancho de la región de carga espacial está dado por:
(Rango de 0,1 μm a 1 μm)

$$W_{dep} = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)V_0}$$

$\varepsilon_s$: Permitividad eléctrica

# ECUACIÓN DE LA JUNTURA EN LA REGIÓN DIRECTA




Distribución de los portadores minoritarios en una juntura PN polarizada directamente. La región P está mucho más dopada que la región N

# RELACIONES

Ley de la juntura: Relaciona las concentraciones de los portadores minoritarios con el voltaje directo V.

$$p_n(x_n) = p_{n0} e^{V/V_T}$$

La distribución del exceso de concentración de huecos en la región N es una función exponencial que decae con la distancia x

$$p_n(x) = p_{n0} + [p_n(x_n) - p_{n0}] e^{-(x - x_n)/L_p}$$

$L_p$ es la longitud de difusión de los huecos en la región N, relacionada con el tiempo de vida del exceso de portadores minoritarios $\boldsymbol{\tau_p}$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$

Valores típicos para Lp: 1 a 100 μm

Valores típicos para $\boldsymbol{\tau_p}$ : 1 a 10.000 ns

## CORRIENTES DE DIFUSIÓN EN LA JUNTURA

Los huecos que se difunden en la región N dan lugar a una corriente de difusión que puede expresarse como:

$$J_p = q\frac{D_p}{L_p}p_{n0}(e^{V/V_T} - 1)e^{-(x-x_n)/L_p}$$

Jp decae con la distancia debido a la recombinación de los huecos con los electrones. En estado estacionario el circuito externo proporciona los electrones necesarios para que la corriente se mantenga constante.

La densidad de corriente debida a la inyección de huecos en la región N a través de la zona de carga espacial es:

$$J_p = q\frac{D_p}{L_p}p_{n0}(e^{V/V_T} - 1)$$

La densidad de corriente debida a la inyección de electrones en la región P a través de la zona de carga espacial es:

$$J_n = q\frac{D_n}{L_n}n_{p0}(e^{V/V_T} - 1)$$

## ECUACIÓN DE LA CORRIENTE TOTAL

Dado que $J_p$ y $J_n$ tienen el mismo signo, pueden sumarse y multiplicarse por el área A trasversal de la juntura para obtener la corriente total:

$$I = A\left(\frac{qD_p p_{n0}}{L_p} + \frac{qD_n n_{p0}}{L_n}\right)(e^{V/V_T} - 1)$$

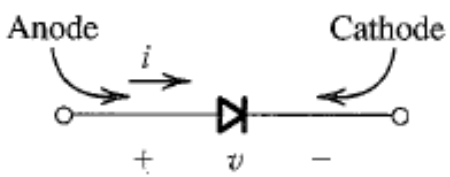
Sustituyendo $p_{no}=n_i^2/N_D$ y $n_{po}=n_i^2/N_A$ queda:

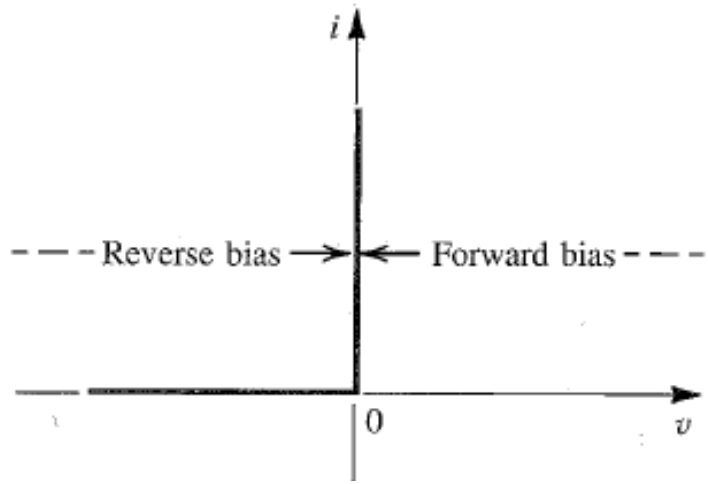
$$I = Aqn_i^2\left(\frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A}\right)(e^{V/V_T} - 1) \qquad I_S = Aqn_i^2\left(\frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A}\right)$$

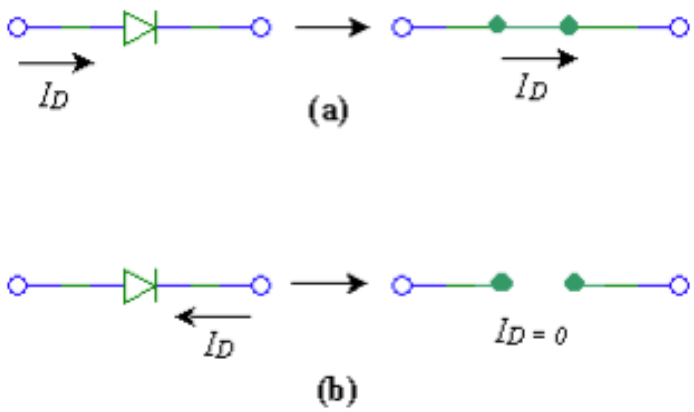
Y la ecuación del diodo es:

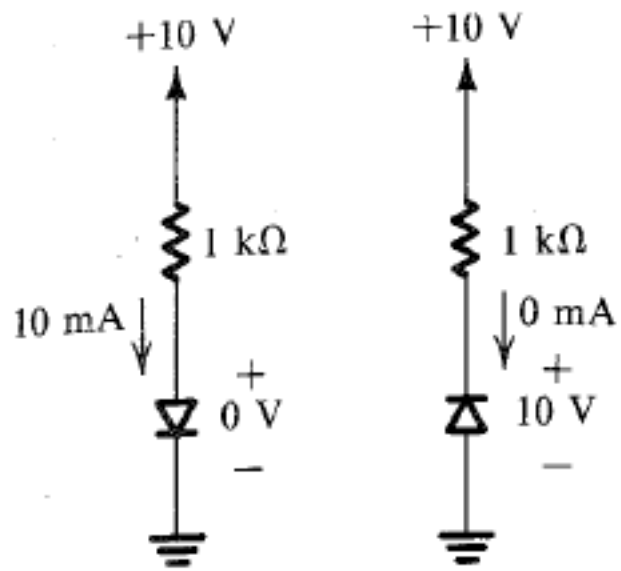
$$I = I_S\left(e^{V/V_T} - 1\right)$$

# DIODOS
# EL DIODO IDEAL

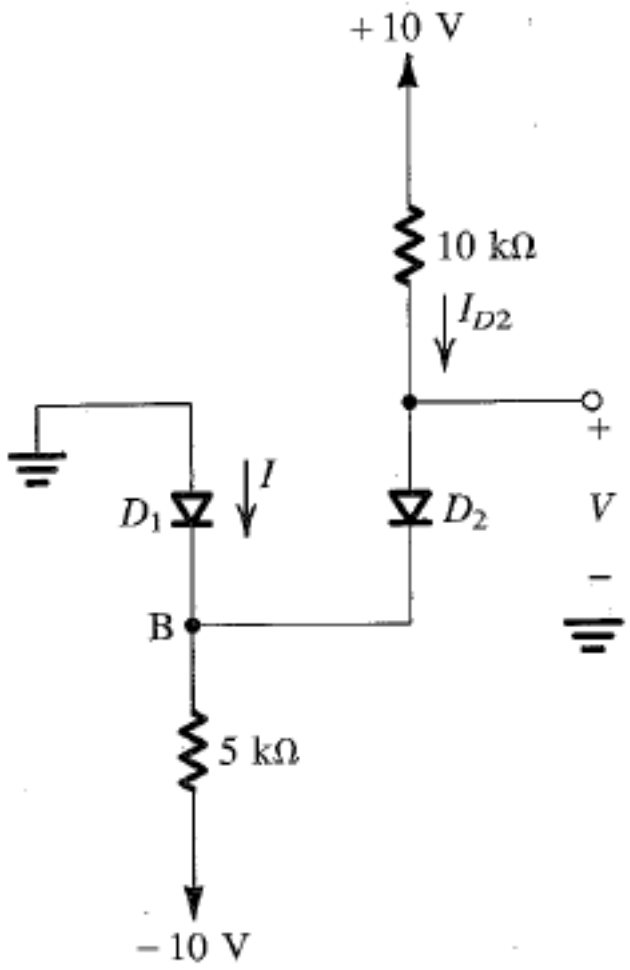


# ANÁLISIS DE CIRCUITOS DE DIODOS (EJEMPLO 1)




Hallar V e I suponiendo que al menos un diodo conduce.

Suponemos inicialmente que ambos conducen.

Si $D_1$ conduce el voltaje en B es cero. Si $D_2$ conduce, la corriente $I_{D2}$ es:

$I_{D2} = (10V-0)/10k\Omega = 1mA$

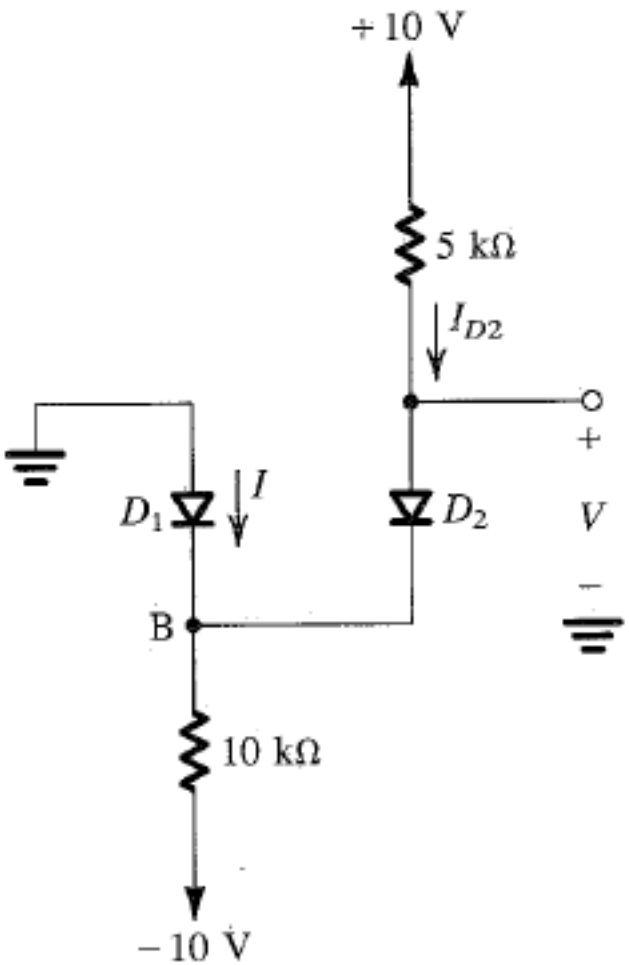
La corriente por la resistencia de 5kΩ es:

$(0-(-10V))/5k\Omega = 2mA$

$I + I_{D2} = 2mA \qquad I = 1\ mA$

$V = 0\ V$

# ANÁLISIS DE CIRCUITOS DE DIODOS (EJEMPLO 2)




Hallar V e I suponiendo que al menos un diodo conduce.

Suponemos inicialmente que ambos conducen, por lo tanto el voltaje en B y el voltaje de salida V son cero.

$I_{D2}$ = (10V-0)/5kΩ = 2mA

I + $I_{D2}$ = (0-(-10V))/10kΩ = 1mA

I = 1mA - $I_{D2}$ = 1mA -2mA = -1mA

Dado que esto no es posible, el diodo $D_1$ no conduce y por lo tanto I = 0.

$I_{D2}$ = ((10V-(-10V))/15kΩ = 1,33mA

V = $V_B$ = 10 kΩx 1,33 mA -10V = 3,3 V