

# CIRCUITOS Y SISTEMAS ELECTRÓNICOS

Alejandro Gómez Amaro

Profesor: Francisco Jose Bellido Outeiriño

# TEMA 1 : Física de los semiconductores

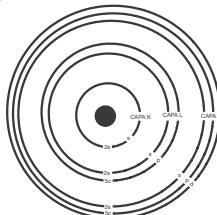
## 1.1 Introducción

- Semiconducto<sup>r</sup>: material con resistividad cuya valor está comprendido entre un conductor y un aislante. Además, por su estructura atómica, se pue de modificar su resistividad (o conductividad) añadiendo impurezas, en un proceso llamado dopado.
- Lo que se consigue es variar el número de electrones libres. Incrementando el número de electrones, el semiconductor es negativo (tipo N), reduciéndolo el semiconductor es positivo (tipo P).
- De los semiconductores destacan el germanio y el silicio.
- La unión de material P con otro tipo N, da lugar a la unión PN. Considerando una barra de silicio, dopada por un lado tipo P y en el otro tipo N, la unión PN representa la frontera entre ambas. En ella aparecen cargas libres opuestas a cada lado del contorno, creando una diferencia de potencial de contacto que mantiene las cargas separadas.
- Una unión PN es un dispositivo semiconductor con dos puertos llamado diodo.
- Si tenemos una estructura N unida a cada lado con un material P o al contrario, obtendremos un dispositivo de tres terminales PNP o NPN, denominado transistor de unión. Este tiene tres electrodos (emisor, la base y el colector) con dos uniones. El emisor suministra corriente a la base para proporcionar corriente al colector.

## 1.2 El átomo de Bohr y los números cuánticos

- La física moderna se apoya en el modelo atómico de Bohr, con las teorías de Planck y Einstein. El átomo está formado por un núcleo compuesto de protones y neutrones, a su alrededor órbitas circulares de electrones. Para determinar el radio de las órbitas y el espectro de emisión de hidrógeno:
  - El electrón no emite energía radiante para cualquier órbita. Fue considerado como un estado estacionario. A cada estado corresponde cierta energía ( $W_n$ ), generando los niveles de energía del electrón.
  - Solo son posibles algunas órbitas donde el momento angular ( $\omega$ ) es un múltiplo entero de  $\frac{h}{2\pi}$  [  $h$  (Cte de Planck) =  $6,6252 \cdot 10^{-34} \text{ J/s}$  ]
  - El paso de un estado  $W_{n_1}$  a otro  $W_{n_2}$  se produce repentinamente (con emisión ( $W_{n_1} > W_{n_2}$ ) o absorción de energía ( $W_{n_1} < W_{n_2}$ )).
$$W_{n_1} - W_{n_2} = hf$$
    - $f$  (frecuencia de las ondas visibles)
- Esto no consiguió explicar efectos como el desdoblamiento de las líneas D del átomo de sodio o el efecto Zeeman.
- El perfeccionamiento del modelo de Bohr introdujo cuatro números, los números cuánticos:
  - Número principal  $n$ : aproximación del nivel de energía en que se halla el electrón (Número entero).
  - Número cuántico  $l$ : asociado al momento angular del electrón, lo que significa que las órbitas pueden ser elípticas [Estados posibles de órbita  $n$  ( $1, 2, \dots, n-1$ )]. Distinguido en letras s, p, d, f, g, h, etc...
  - Número magnético exterior  $m_l$ : orientación de la órbita, consecuencia de  $E$  ( $0, \pm 1, \pm 2, \dots$ )
  - Número magnético interior o spin  $m_s$ : momento angular sobre sí ( $\pm \frac{1}{2}$ ).

- El efecto cuántico requiere los cuatro números ( $n, l, m_l, m_s$ )
- Los electrones con mismo número cuántico principal forman una capa alrededor del núcleo (un nivel principal de energía). Las capas se nombran con letras K, L, M, N, O, P y Q ( $n = 1-7$ ). El número  $l$  determina la subcapa [ $l = n - l$ , es decir, capa K ( $n = l$ ),  $l = 0$ , subcapa s, capa L ( $n = l$ ),  $l = 0, l = 1$ , subcapas s y p...]
- Los átomos a baja temperatura deben disponerse en las órbitas en mínima energía, por ello Pauli enunció su principio de exclusión:
  - En un átomo no pueden existir dos electrones en el mismo estado cuántico (el grupo de valores de los 4 números cuánticos)



- Se puede calcular el número de electrones que corresponden a cada nivel principal. Cada valor  $l$  corresponde a  $2l + 1$  valores de  $m_l$  y spin puede ser  $\pm \frac{1}{2}$ . El número total de estados con el mismo número cuántico  $l$  es  $2(2l + 1)$ . Como la capa de orden  $n$  admite valores  $l$  de 0 a  $n-1$  el número total de electrones sera:

▫  $N = 2(1+3+5+\dots+2n-1) = 2 \frac{(2n-l)+l}{2} n = 2n^2$

CAPA $n: 1, 2, 3\dots$	K 1	L 2	M 3	N 4							
SUBCAPA $l: 0, 1, \dots, (n-1)$	s 0	s 0	p 1	s 0	p 1	d 2	f 0	0	1	2	3
Nº ELECTRONES (SUBCAPA) →	2	2	6	2	6	10		2	6	10	14
2(2l + 1) CAPA →	2		8		18			32			

- Siguiendo las tablas se puede determinar la distribución de electrones en diferentes átomos.
- En función a la configuración electrónica podemos describir y comprender las similitudes en el comportamiento químico que poseen diversos átomos. Esto da lugar a la clasificación de las tablas periódicas.
- Los elementos con nivel o subnivel más exterior presentan propiedades químicas semejantes.
- Los electrones de las capas no

# TEMA 1 : Física de los semiconductores

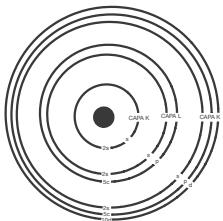
## Introducción

- **Semiconductor**: material con resistividad cuyo valor está entre un conductor y un aislante. Debido a su estructura atómica se puede modificar su resistividad o conductividad añadiendo impurezas. Proceso llamado **dopado**.
- Se debe **reparar** la **estructura atómica** de los elementos para definir las **bandas de energía**, permitiendo **comprender** el por qué de los elementos de una misma estructura cristalina presentan distinto comportamiento a la conducción eléctrica.
- Se **modifica** el número de **electrones libres**. Si se incrementa el semiconductor es **negativo** (tipo N), reduciéndolo se obtiene un semiconductor con déficit de electrones, **positivo** (tipo P).
- La unión de un material tipo P con uno N, generan la unión PN que representa la frontera entre ambas configuraciones, apareciendo cargas libres apuntando a cada lado del contorno. De esta forma se genera una diferencia de potencial (potencial de contacto) que mantiene las cargas separadas.
- Una unión PN es un dispositivo semiconductor con dos terminales llamado **diodo**. La corriente solo puede circular de P a N.
- También se puede formar un dispositivo con tres terminales de forma PNP o NPN, denominado **transistor de unión**.

## El átomo de Bohr y los números cuánticos

- El **átomo** está formado por un **núcleo central** compuesto por **protónes y electrones**. A su **alrededor giran órbitas circulares de electrones**.
- Cada **órbita** fue considerada con un **estado estacionario**. A cada estado le corresponde **energía  $W_n$** , generándose los **niveles de energía del electrón**.
- Solo **sólo** son posibles las órbitas para las cuales el **momento angular del electrón es un múltiplo entero de  $\hbar/2\pi$**  donde  **$\hbar$**  es la constante de Planck.
- El **salto de un estado de energía  $W_{n1}$  a otro  $W_{n2}$** , se produce con **emisión o absorción de energía**.
- La teoría de Bohr no explicaba algunas efectos como el desdoblamiento de las líneas D del átomo de sodio o el efecto Zeeman de desdoblamiento de las rayas espectrales de un átomo en un campo magnético.
- Admitieron que el **número cuántico  $n$**  que definía las órbitas de Bohr no era suficiente para describir todos los estados del electrón, lo que introdujo otros **números cuánticos**:
  - **Número cuántico principal ( $n$ )**
  - **Número cuántico acimutal ( $l$ ):** Asociado al momento angular del electrón (órbitales). Toma los valores  $0, 1, 2, \dots, (n-1)$  que caracterizan los estados en una órbita  $n$ . Se distingue con letras s, p, d, f, g, h.
  - **Número cuántico magnético exterior ( $m_l$ )**
  - **Número cuántico magnético interior o spin ( $m_s$ )**

- En un **átomo** a **bajo temperatura** los **electrones** deben disponerse en **órbitas de mínima energía**
- Para explicarlo, Pauli en 1925, enunció el principio de exclusión: En un **átomo** **algunas** no pueden existir dos electrones en el mismo estado cuántico. El grupo de valores asignados a los cuatro números cuánticos deben ser diferentes para los electrones del **átomo**.



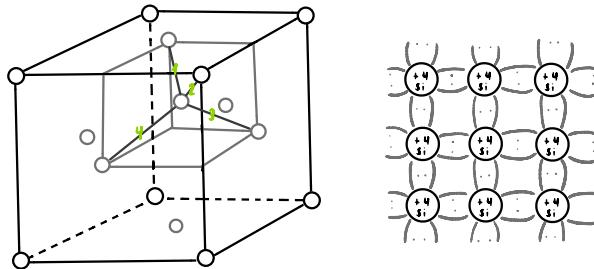
Ej: Distribución de electrones en un átomo

CAPA $n: 1, 2, 3 \dots$	K1	L2	M3	N4
SUBCAPA $l: 0, 1, \dots, (n-1)$	s 0	s p 0 1	s p d 0 1 2	s p d f 0 1 2 3
Nº de electrones (SUBCAPA)	2	2 6	2 6 10	2 6 10 14
...	...	...	...	...
Nº de electrones (CAPA)	2	8	18	32

- Los **electrones** de las **capas** **no** se hallan **saturadas** son los que intervienen en enlaces químicos con otros átomos para formar los compuestos químicos de la naturaleza. Estos electrones se llaman **electrones de valencia**
- Los **semiconductores** grupo IV, especialmente **carbono**, **silicio** y **germanio** con configuraciones:

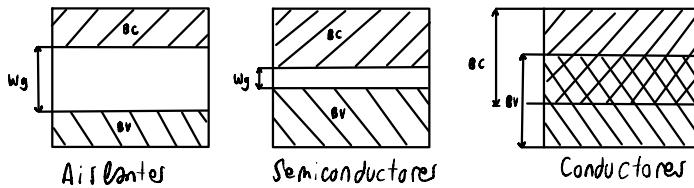
Elemento	Nº atómico	Configuración
C	6	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup>
Si	14	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup> 3s <sup>2</sup> 3p <sup>2</sup>
Ge	32	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup> 3s <sup>2</sup> 3p <sup>6</sup> 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>2</sup>

- La tendencia a completar el subnivel p (para llegar a 6 electrones) hace que los elementos cristalicen asociando cada átomo con otros 4 para compartir un electrón con cada uno.
- La forma de cristalización tetraédrica (cúbica centrada en las caras), los átomos se disponen en los vértices y el centro del tetraedro. Cada átomo está equidistante del resto con los que comparte electrones (uno a uno).



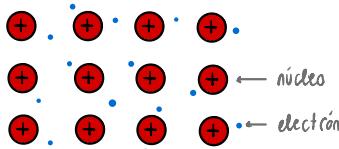
## Bandas de energía

- La demostración de las postuladas de Bohr se realizó en 1924 y 1926 por Broglie y Schrödinger, originando una nueva rama de la física, mecánica ondulatoria o cuántica.
- Si se considera un átomo aislado de un elemento, se obtienen una niveles de energía representados por capas (niveles) o subcapas (subniveles).
- En una red espacial donde la forma de cristal una células básicas tridimensionales se repite, aparecerá una distorsión de las niveles de energía de cada átomo al estar influenciado por los adyacentes.
- Los niveles de energía de los electrones de las capas más internas no son afectados, solamente las capas más exteriores que corresponden a las capas de valencia.



## Conducción en los metales

- En un metal los electrones de valencia, se puede decir, que pertenecen tanto a un ión como a cualquier otro. El enlace de un electrón con un átomo individual es prácticamente nulo.
- Dependiendo del metal, entre uno y tres electrones por átomo pueden moverse libremente en el interior bajo la acción de un campo aplicado.
- Se puede considerar un metal como una región con un sistema tridimensional de iones positivos fuertemente enlazados rodeados de electrones casi libres (gas de electrones)



- Según la teoría del gas electrónico de un metal los electrones están en continuo movimiento, cambiando de dirección cuando chocan con iones positivos. La distancia entre colisiones se denomina camino libre medio. Como el movimiento es errático, no hay movimiento neto y la corriente es nula.
- Si se aplica al metal un campo eléctrico  $E$  (V/m) los electrones son acelerados y superponerse al movimiento aleatorio. Hay una pequeña componente de velocidad con dirección  $E$ .

- En estas colisiones inelásticas con un ion (el electrón pierde su energía cinética), éste se acelera y lleva a perder la energía cinética en el siguiente golpe.
- Como media se obtiene una velocidad de arrastre ( $v$ ) con sentido contrario al campo y módulo proporcional a  $E$ .
  - $v = \mu E = (\alpha \mu_n + \rho \mu_p) E$ 
    - $\mu$  (movilidad)
- La densidad de corriente ( $A/m^2$ )
  - $J = nev = ne\mu E = \sigma E$ 
    - $\sigma = ne\mu$
    - Conductividad del material : siemens / metro
    - Inversa de  $\sigma$  = resistividad  $\rho$  : ohmios / metro
- La ecuación  $J=\sigma E$  expresa la ley de Ohm en forma puntual, que dice que la densidad de corriente es directamente proporcional al gradiente de tensión ( $\nabla V$ ). Para un conductor de área  $A (m^2)$  y longitud ( $m$ )
  - $I = JA = \sigma A E = \sigma A \frac{V}{l} = \sigma \frac{A}{l} V$ 
    - $\sigma \frac{A}{l}$  u la conductancia  $G$  en siemens y la resistencia  $R = \frac{1}{G}$
- Cuando aumenta la temperatura, incrementa el movimiento térmico, disminuyendo el tiempo entre colisiones, reduce la movilidad y en consecuencia la conductividad. Características de los metales : la resistencia se eleva con la temperatura

## Semiconductores intrínsecos o puros

- La estructura covalente del germanio y el silicio es tetraédrica, cada átomo tiene 4 adyacentes y todos equidistantes entre sí. El núcleo iónico de estos elementos tiene carga +4 y las fuerzas de enlace entre átomos próximos resultan de que cada electrón de valencia de un átomo compartido por uno de sus cuatro vecinos más próximos.
- Esto significa que las características de resistividad del germanio y silicio muestran una resistencia decreciente con un incremento de temperatura (el contrario de los conductores).
- Sin embargo, normalmente los semiconductores deben funcionar dentro de los límites de temperatura para controlar las características de conductividad.
- Al aplicar el campo eléctrico externo, los electrones pueden moverse por las bandas de conducción. Si un electrón en las bandas de valencia se mueve para llenar un hueco, deja otro hueco en su posición primitiva. De esta forma podemos tener corriente en las bandas de valencia además de las de conducción, lo cual es resultado de los huecos "saltando" de un átomo a otro.

$$\boxed{\mathbf{J} = n \mu_n e E + p \mu_p e E = (n_{Mn} + p_{Mp}) E = \sigma E}$$

- La conductividad es  $\sigma = (n_{Mn} + p_{Mp}) e$

- En un semiconductor intrínseco o puro los huecos y electrones se crean simultáneamente, se tendrá  $n = p = n_i$  ( $n_i$  = concentración intrínseca)

- En físicas de semiconductores se demuestra que  $n_i$  varía con la temperatura con relación:

$$n_i^2 = A_0 T^{3/2} e^{-W_{go}/kT} = n_p$$

- $A_0$  (constante del material)
- $W_{go}$  (ancho de banda prohibida en eV a 0 °K)
- $k$  (constante de Boltzmann) =  $1,38 \cdot 10^{-23}$  julios/°K  
=  $8,61 \cdot 10^{-5}$  eV/°K
- $T$  (temperatura en °K)

## Densidad de niveles de bandas

- La representación por bandas de energía muestra que hay niveles energéticos paralelos para electrones (en bandas de conducción y de valencia), separados por una banda prohibida

$$S(W) = \frac{8\sqrt{2}\pi m_c^{3/2}}{h^3} (W - W_c)^{1/2} = A (W - W_c)^{1/2}$$

-  $W_c$  (Nivel de energía de conducción)

$$S(W) = \frac{8\sqrt{2}\pi m_v^{3/2}}{h^3} (W_v - W)^{1/2} = B (W_v - W)^{1/2}$$

-  $W_v$  (Nivel de energía de valencia)

## Nivel de energía de Fermi

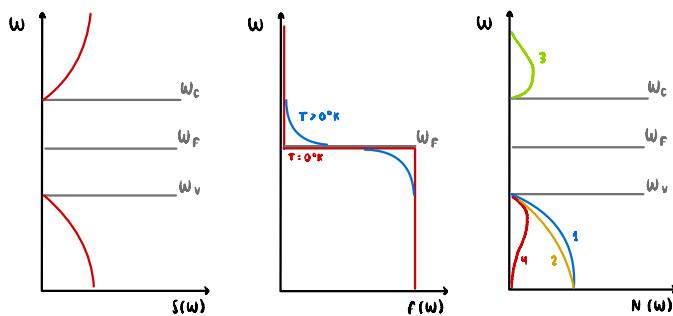
- La función de distribución que más se adapta a la realidad es la de Fermi-Dirac ( $f(W)$ ), que da la probabilidad de que un estado de energía sea ocupado por un electrón.

$$f(W) = \frac{N(W)}{S(W)} = \frac{1}{1 + e^{\frac{W-W_f}{kT}}}$$

- $N(W)$  (Densidad de niveles)
- $S(W)$  (Densidad de portadores)

## Distribución de portadores en las bandas de energía

- La distribución de niveles energéticos no es uniforme, obedece a un tipo parabólico.
- La función de Fermi-Dirac da la probabilidad de que un nivel esté ocupado por un electrón (con una temperatura determinada) y que esa probabilidad sea independiente a los niveles existentes para ese valor de energía.
- Por conveniencia  $S(w) \cdot f(w) = N(w)$ , en un intervalo energético considerado  $d\omega$  (número de electrones por unidad de volumen en el intervalo)



- Las curvas muestran distribuciones de electrones y huecos en las bandas de conducción y valencia, para un SC intrínseco a  $\leq 0^\circ K$ .
- Ambas curvas son simétricas respecto al nivel de Fermi  $w_f$
- Su integración da la cantidad de electrones y huecos por unidad de volumen
- El nivel de Fermi está situado en el centro de las bandas prohibidas
- De nuevo  $n = p = n_i = A_0 T^{3/2} e^{-\frac{w_f}{kT}}$  donde  $n_i^2 = A_0 T^{3/2} e^{-\frac{w_f}{kT}} = n_p$

## Semiconductores extrínsecos (Intrínseco + $e^-$ (tipo N) / $h^+$ (tipo P))

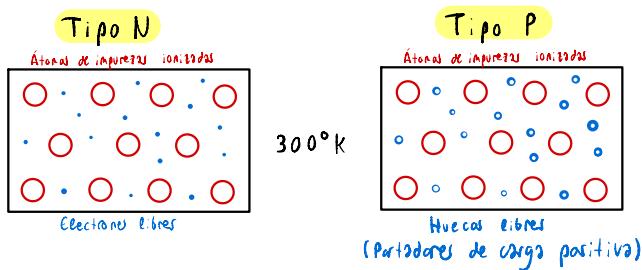
### • Caso particular del Silicio

#### ▫ Material extrínseco tipo N

- Se sustituye un átomo Si por un átomo grupo V, con 5 electrones en su última capa (Impureza donadora)
- Al cristalizarse el quinto electrón queda libre, separándose de forma sencilla del átomo y pasando a las bandas de conducción, además de ionizarse (positivamente)
- Los dopantes contribuyen a la existencia de "extra de electrones", que aumenta la conductividad por electrones
- $n \gg p$ 
  - $N_D \gg n_i : n = N_D + n_i \approx N_D$
  - $p = \frac{n_i}{N_D}$  (despreciable)
  - $J = \mu_n N_D q E = \sigma E$

#### ▫ Material extrínseco tipo P

- Se sustituye un átomo Si por un átomo grupo III, con 3 electrones en su última capa (Impureza aceptadora)
- Al cristalizarse, los tres electrones forman un enlace covalente de Si, quedando un enlace vacante. A ese hueco se moverán otros electrones que a su vez dejarán huecos. La impureza fija en el espacio queda cargada negativamente.
- Los dopantes contribuyen a la existencia de "extra de huecos" sin haber electrones en las bandas
- $p \gg n$ 
  - $p = N_A + p_i \approx N_A$
  - $n = \frac{n_i^2}{N_A}$  (despreciable)
  - $J = \mu_p N_A q E$



### Densidades de carga en un S/C extrínseco

- Ley de acción de masas y de la quasi-neutralidad eléctrica

- Semiconductor intrínseco:

$$- N_A = N_D = 0 \rightarrow p = n = n_i$$

- Semiconductor tipo N

$$- N_A = 0, n \approx N_D \rightarrow p \approx \frac{n_i^2}{N_D}$$

- Semiconductor tipo P

$$- N_D = 0, n \approx N_A \rightarrow n \approx \frac{n_i^2}{N_A}$$

### Posición del nivel de Fermi en un S/C extrínseco

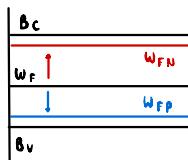
- El incremento del dopado de donador genera un acercamiento del nivel de Fermi hacia la banda de conducción, el acceptador hacia la banda de valencia

- $W_F = W_{F_i} + \frac{KT}{2} \ln\left(\frac{n}{p}\right)$

- $W_{F_i}$ : nivel de Fermi de un semiconductor intrínseco

- $n > p \rightarrow \ln(+)$  → tipo N

- $p > n \rightarrow \ln(-)$  → tipo P

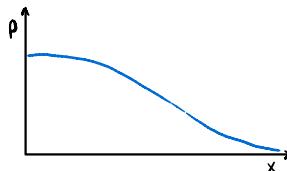


## Difusión de portadores

- Puede conseguirse un desplazamiento de portadores por difusión entre las zonas de alta intensidad de carga y otra de baja, llamado corriente por difusión.
- El mecanismo es semejante al desplazamiento de las moléculas de un gas cuando existe un gradiente de presión en el recipiente que lo contiene.
- Si se aumenta en un punto del cristal la concentración de portadores, se genera un gradiente de concentración a lo largo del mismo, las partículas tenderán a moverse de la mayor a la menor concentración, generando corriente eléctrica de difusión proporcionando al gradiente de concentraciones en cada instante.
- Pasado un tiempo se llegará a un equilibrio y la concentración en el cristal volverá a ser uniforme

$$i_p = -q D_p \frac{dp}{dx}$$

- $i_p$  (corriente de difusión en los huecos)
- $D_p$  (Coeficiente de difusión de huecos)
- $dp$  (variaciόn de concentraciόn)



- Las constantes de difusión están ligadas con las movilidades por la ecuación de Einstein

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

- K (constante de Boltzmann)
- T (temperatura absoluta)

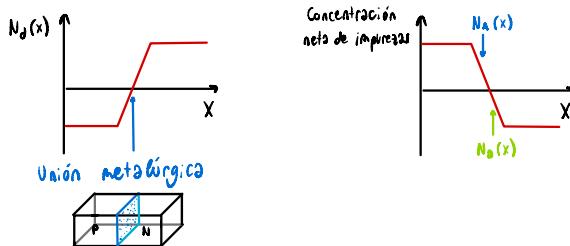
# La unión p-n

## 2.1 Teoría de la unión p-n

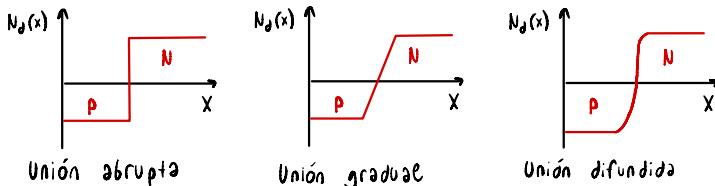
- Constituye la base física de los dispositivos semiconductores.
- La estructura de unión p-n da lugar a el diodo semiconductor.
  - El término unión p-n para las propiedades internas de dicha estructura
  - El término diodo para referirnos al dispositivo como componente electrónico concreto.

## 2.2 Concepto y tipos de uniones

- Se dice que en una partícula semiconductor existe unión p-n cuando la concentración neta de impurezas ( $N_d(x) = N_D(x) - N_A(x)$ ), es positiva en una parte (zona n) y negativa en otra (zona p).



- Según sea la forma de concentración de impurezas, se puede hablar de distintas tipos de unión



- La unión p-n abrupta ideal presenta unas **valores constantes de concentración neta** a ambas lados de la unión metálica (con cambio de signo). Cuando los **valores absolutos** de  $N_A$  en ambas lados difieren considerablemente hablaremos de **unión p<sup>+</sup>-n** (zona p más **dopada**) o **unión p-n<sup>+</sup>** (zona n más **dopada**).

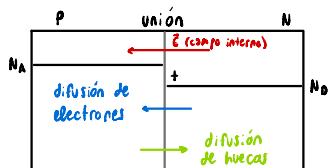
## 2.2.2 Unión p-n en equilibrio

- La unión p-n está en **equilibrio** cuando no está sometida a ninguna perturbación externa.
- Como la concentración de impurezas varía según el punto del semiconductor considerado, nos enfocaremos en un semiconductor **no homogéneo**.

### 2.2.2.1 Distribución de portadores en equilibrio

Perfiles de impurezas donadoras y接受adoras que generan una unión abrupta ideal:

- Las impurezas al ionizarse liberan electrones y huecos, quedando iones positivos y negativos estáticos (depende del caso). Los electrones y huecos se difundirán desde la zona de mayor concentración hacia la menor.
- Los iones estáticos no se moverán, generando un exceso de carga positiva (iones  $N_A^+$ ) en un lado y de carga negativa en el otro (iones  $N_D^-$ ). Estos provocan un campo eléctrico interno que lleva los electrones y huecos en sentido contrario. Cuando el arrastre ( $E$ ) se igualle a la difusión se llega al **equilibrio dinámico** (no desplazamiento  $\rightarrow$  no corrientes)

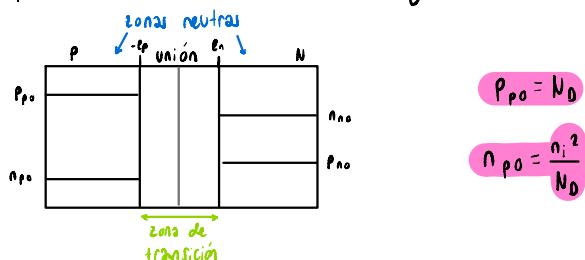


$$n_{no} = N_D$$

$$p_{no} = \frac{n_i^2}{N_D}$$

Debido al proceso anterior aparecen tres zonas en las pastillas

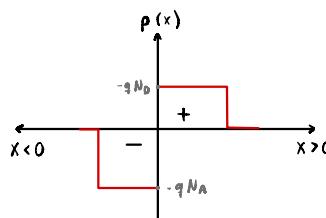
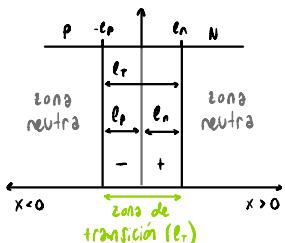
- Hay **dos zonas neutras en ambas extremas** (semiconductores homogéneos) y **una zona de transición** (dipolar, de vaciamiento, de desplazamiento, despoblada o de carga espacial) a un lado y otro de la unión.
- En la zona de transición consideraremos que no existen portadores de carga (ni electrones ni huecos), solo iones estáticos (positivos y negativos). Tampoco existirán fenómenos de generación-recombinación.



- Se han representado los perfiles de portadores mayoritarios y minoritarios en las zonas neutras. Estos perfiles **son constantes** y su círculo en una zona u otra será **idéntico** al del apartado de semiconductores homogéneos.
- Si suponemos que en la zona n entra una concentración neta de impurezas ( $N_D$ ) y en la p una concentración neta ( $N_A$ ), y la temperatura del estudio (intermedia) se cumple que  $N_D \gg n_i$  y  $N_A \gg n_i$

## 2.2.2.2 Distribución de campos y potencial eléctricos en equilibrio

- En las zonas de transición aparecen las puntas de carga neta (+ en n y - en p) debido a los iones estáticos. Solo en esta zona habrá campo eléctrico.
- $l_T = l_p + l_n$
- En las zonas dipolar solo existen impurezas ionizadas, distribuidas homogéneamente podemos representar la función de densidad de carga,  $\rho(x)$ , positiva en n y negativa en p
  - $\rho(x) = -qN_A$  si  $-l_p \leq x \leq 0$
  - $\rho(x) = qN_D$  si  $0 \leq x \leq l_n$



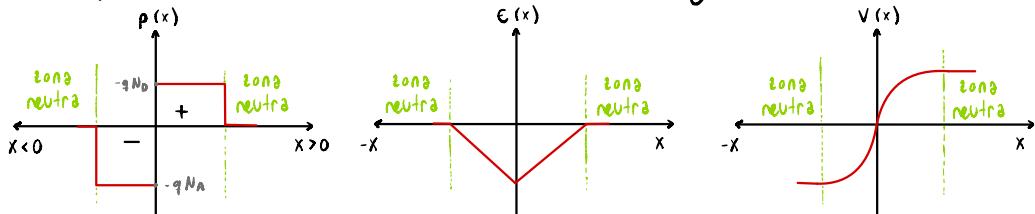
- A partir de la densidad de carga obtenemos la distribución del campo eléctrico
  - $E(x) = -\left(\frac{1}{\epsilon}\right) qN_A x + K_1$  si  $-l_p \leq x \leq 0$
  - $E(x) = \left(\frac{1}{\epsilon}\right) qN_D x + K_2$  si  $0 \leq x \leq l_n$ 
    - $\epsilon$  (constante dielectrónica absoluta del semiconductor)
    - $\epsilon_0$  (constante dielectrónica del vacío)
    - $\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right) = 12$  (Si) y 16 (Ge)
    - $K_1$  y  $K_2$  (constantes de integración del campo eléctrico (continuo))
    - Campo nulo en zonas neutras  $x = -l_p$  y  $x = l_n$

- $E(x = -l_p) = -\left(\frac{1}{\epsilon}\right) q N_A (x + l_p)$  si  $-l_p \leq x \leq 0$
- $E(x = l_n) = \left(\frac{1}{\epsilon}\right) q N_D (x - l_n)$  si  $0 < x \leq l_n$
- Campo continuo en  $x=0$
- $E(x=0) = -\left(\frac{1}{\epsilon}\right) q N_A l_p = -\left(\frac{1}{\epsilon}\right) q N_D l_n$
- $N_A l_p = N_D l_n$

- Las anchuras de la zona de transición es más pequeña para las zonas más dopadas

- Unión p-n<sup>+</sup>  $l_n \ll l_p$   $N_D \gg N_A$
- Unión p<sup>+</sup>-n  $l_n \gg l_p$   $N_D \ll N_A$

- La carga total positiva de un lado de los nión es igual que la carga negativa del lado contrario (zona dipolar globalmente neutra)



- El campo eléctrico asociado un potencial  $E = -\text{grad } V$

- $V(x) = - \int E(x) dx$
- $V(x) = \left(\frac{1}{\epsilon}\right) q N_A \left(\frac{x^2}{2} + l_p x\right) + K_3$  si  $-l_p \leq x \leq 0$
- $V(x) = -\left(\frac{1}{\epsilon}\right) q N_D \left(\frac{x^2}{2} - l_n x\right) + K_4$  si  $0 \leq x \leq l_n$
- $K_3 = K_4 = 0$  en  $V(x=0)$

- La diferencia de potencial entre ambas zonas se llama potencial de contacto o termodinámico ( $V_0$ )

### 2.2.2.2.1 Potencial de contacto de una unión p-n en equilibrio

- La diferencia de potencial entre dos puntos de un semiconductor puede calcularse a partir de concentraciones de portadores:

$$\square V(x_2) - V(x_1) = \frac{KT}{qe_n \left( \frac{p(x_1)}{p(x_2)} \right)} = \frac{KT}{qe_n \left( \frac{n(x_1)}{n(x_2)} \right)}$$

-  $x_2$  (punto cualquiera de la zona neutra del lado n)

-  $x_1$  (punto cualquiera de la zona neutra del lado p)

$$\square V_0 = V(x_2) - V(x_1)$$

- Según la distribución de portadores en equilibrio y sustituyendo las fórmulas anteriores:

$$\square V_0 = \frac{KT}{q} \ln \left( \frac{p_{po}}{p_{no}} \right) = \frac{KT}{q} \ln \left( \frac{n_{no}}{n_{po}} \right) = \frac{KT}{q} \ln \left( \frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$$

- La zona n estará siempre a más potencial que la p

- También podemos calcular el potencial:

$$\square V_0 = V(x = e_n) - V(x = -e_p)$$

$$\square V_0 = -\left(\frac{1}{e}\right) q N_A e_p = -\left(\frac{1}{e}\right) q N_D e_n$$

$$\square V_0 = \frac{1}{2} |E(x=0)| (e_n + e_p) = \frac{1}{2} |E(x=0)| e_T$$

- Podemos determinar las anchuras  $e_T$  y las de unión ( $e_p$  y  $e_n$ )

$$\square e_T = \frac{2V_0}{|E(x=0)|} = \frac{2V_0 e}{q N_A e_p} = \frac{2V_0 e}{q N_D e_n}$$

$$\square N_A e_p = N_D e_n$$

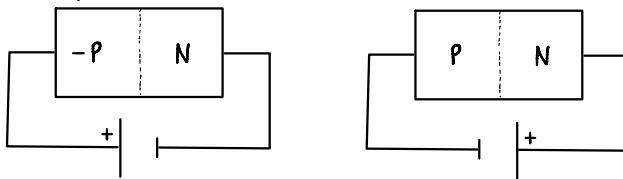
- Donde deducimos que:

$$\square e_T = \left( \frac{2e(N_A + N_D)}{q N_A N_D} V_0 \right)^{1/2}$$

- El potencial de contacto se relaciona con la anchura total de  $e_T$ .

- Si en una unión p-n en circuito abierto (equilibrio) medimos la diferencia de potencial en sus extremos será nula, debido a que se generan donaciones entre los puntos de los voltímetros y los portadores semiconductores.

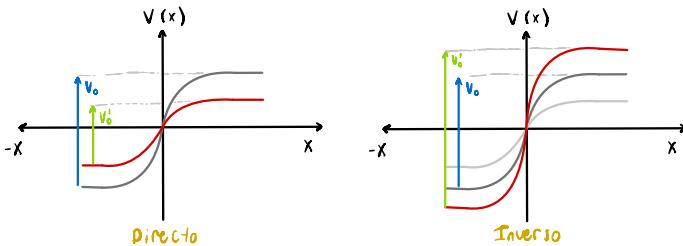
## 2.3 Unión p-n polarizada



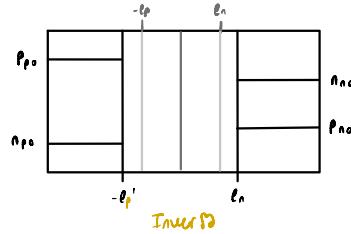
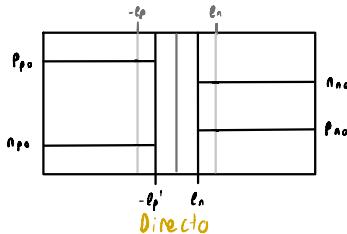
- Polarizar la unión o aplicar diferencia de potencial externa entre sus extremos. Si p queda a más potencial que n se llama polarización directa ( $V$ ), si n tiene más potencial que p, inversa ( $-V$ ).

### 2.3.1 Modificación de distribución de potencial y de ancho de $l_T$

- En equilibrio entre n y p existe una "barra" (diferencia de potencial) por el potencial de contacto ( $V_0$ ). Cuando polarizamos con tensión externa ( $V$ ) u directo se contrarresta la barra y se genera una nueva ( $V'_0$ )
  - $V'_0 = V_0 - V$
- Si se polariza en inverso, sustituimos  $-V$ , conduciendo a un aumento de potencial.



- Bajo la polarización obtenemos que las anchuras de  $l_T$  modificadas ( $l'_T$ )
  - $$l'_T = \left( \frac{2e(N_A + N_B)}{qN_A N_B} (V_0 - V) \right)^{1/2}$$
  - Bajo polarización directa ( $V > 0$ ),  $l_T$  se reduce
  - Bajo polarización inversa ( $V < 0$ ),  $l_T$  se aumenta



- Cuando está en equilibrio hay difusión de portadores (de + a - concentración) que contrarresta con el campo eléctrico. La corriente neta es nula.
- En polarización directa al disminuir la anchura, aumenta el gradiente de portadores (mayoritarias y minoritarias). Provocando difusión de un lado a otro (electrones de n a p y huecos al revés). Sin embargo el campo se contrarresta con polarización. Provocando ruptura del equilibrio y generando corrientes. Con un pequeño potencial directo aumenta el gradiente y con el gran cantidad de corriente (cuanto más proximo V a V\_0 mayor). La corriente irá en sentido de p a n.
- En polarización inversa el gradiente de portadores se reduce, siendo mayor el equilibrio. Rompiendo el equilibrio a favor del arrastre. Como el campo tiende a llevar los portadores de minoritarias a mayoritarias (electrones de p a n y huecos de n a p) genera corrientes muy pequeñas. Corriente de n a p.
- Al polarizar conseguimos corrientes importantes con poco potencial en directo y corrientes casi nulas en tensión inversa.

