

DISPOSITIVOS OPTOELECTRÓNICOS

Tema 3: Semiconductores

Lluís Prat Viñas

Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Telecomunicació de
Barcelona (ETSETB)

Universitat Politècnica de Catalunya

3.- Semiconductores

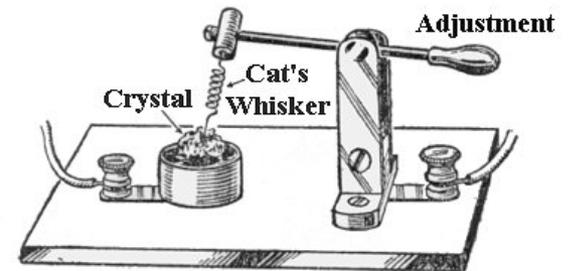
- 3.1.- Algunas notas sobre la historia de los semiconductores
- 3.2.- Estructura cristalina y portadores de corriente
- 3.3.- Bandas de energía en un semiconductor
- 3.4.- Semiconductor intrínseco, extrínseco tipo N y extrínseco tipo P
- 3.5.- Generación y recombinación de portadores
- 3.6.- Corrientes de difusión y de arrastre. Resistencia de un semiconductor
- 3.7.- Ecuaciones de continuidad
- 3.8.- Cargas y campos en un semiconductor
- 3.9.- Diagrama de bandas de energía
- 3.10.-Análisis de la unión PN
- 3.11.-Capacidades de transición y de difusión.
- 3.12.-Semiconductores de gap directo y de gap indirecto
- 3.13.-Absorción de radiación por un semiconductor
- 3.14.-La unión PN bajo iluminación

3.1.- ALGUNAS NOTAS SOBRE LA HISTORIA DE LOS SEMICONDUCTORES

1782: Alexander Volta introdujo el nombre de semiconductores para denominar una categoría de materiales de resistividad intermedia entre los conductores y los aislantes

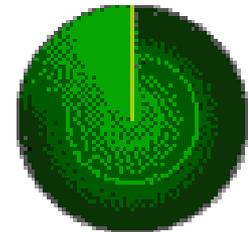
1873: Willoughby Smith descubre que el selenio aumenta su conductividad al ser iluminado.

1906: Greenleaf Pickart descubre que el silicio, la galena i otros cristales se pueden usar como detectores de ondas de radio presionando sobre ellos un hilo metálico (“bigote de gato”)



1938: Walter Schottky publica la teoría del diodo metal-semiconductor

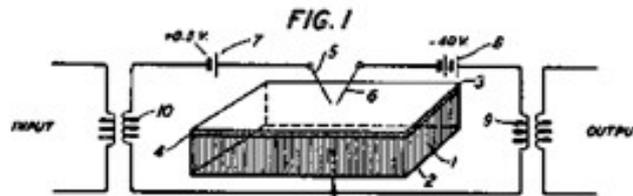
1942: El norteamericano de origen austriaco Karl Lark-Horovitz consigue obtener cristales de germanio de alta pureza y calidad. Los dopa con otros elementos y realiza rectificadores para radar. Eran dispositivos fiables, reproducibles y fabricados en gran cantidad. Los semiconductores empiezan a ser aceptados por la comunidad científica



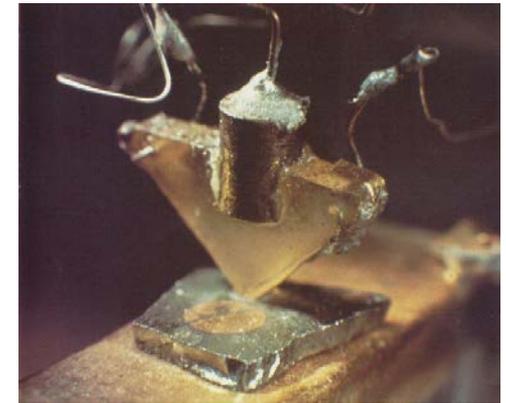
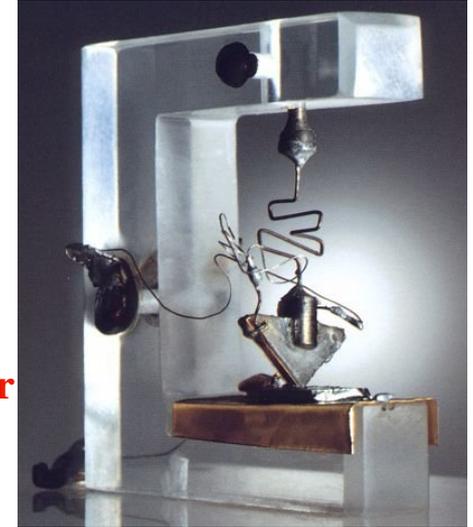
NACE LA ELECTRÓNICA MODERNA: EL TRANSISTOR BIPOLAR

EL PROBLEMA. La electrónica de las válvulas de vacío consumía mucha energía, ocupaba mucho espacio y era muy frágil. El director de Bell Labs, Mervin Kelly organiza en 1945 un grupo de investigación para encontrar un “amplificador de estado sólido”.

1947, 23 de diciembre: William Shockley, Walter Brattain i John Bardeen descubren el transistor bipolar, un transistor de puntas de contacto sobre germanio, mientras pretendían realizar un transistor de efecto de campo. Premi Nobel l'any 1956.



El nombre del nuevo dispositivo proviene de la contracción transfer – resistor (1948).



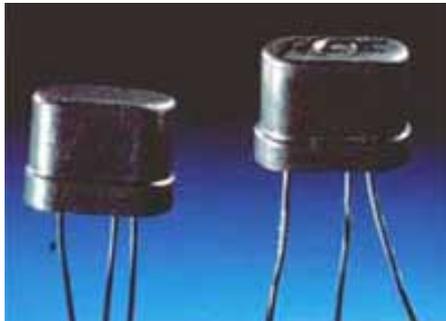
1952: Primera aplicación: amplificadores para sordos

1954: Primera radio a transistores: Regency-TR1. Precio: 49,95\$ + 3,95\$ por el estuche de piel + 7,50\$ por el auricular.

Problemas de los transistores de germanio: mal funcionamiento al aumentar la temperatura. Potencia de salida pequeña.

Alternativa: el silicio. Mismo columna tabla periódica pero más resistivo. Pero no se sabía obtenerlo puro y cristalino.

1954: Gordon Teal, fabrica los primeros transistores bipolares de silicio en Texas Instruments. Se confirma un excelente comportamiento con la temperatura.



Primeros transistores de silicio (1954)



LA INVENCIÓN DEL CIRCUITO INTEGRADO

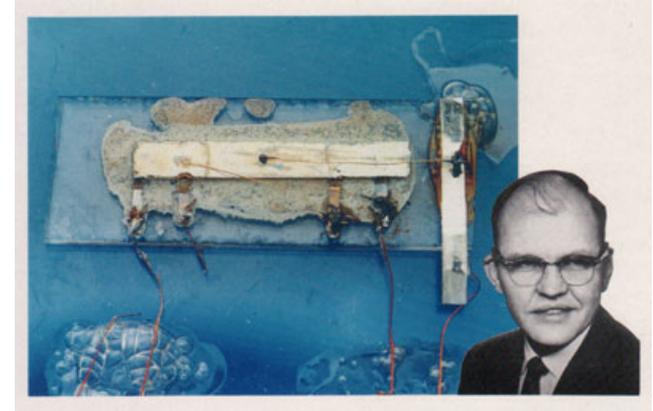
1958: Texas Instruments contrata a Jack Kilby el mes de mayo. En las vacaciones de verano queda solo en la fábrica y se dedica a “jugar” realizando un circuito biestable con todos los componentes (R, C, transistores) de silicio. Los suelda con hilos y funciona.

Después realiza un oscilador de fase en un único cristal de germanio con tecnología mesa y conecta los componentes con hilos. Vuelve a funcionar.

1959, febrero: Jack Kilby patenta su invento: el circuito sólido.

1959, julio: Robert Noyce, de forma independiente, patenta un circuit integrat de silicio con tecnologia planar. Se le considera co-inventor del circuito integrado.

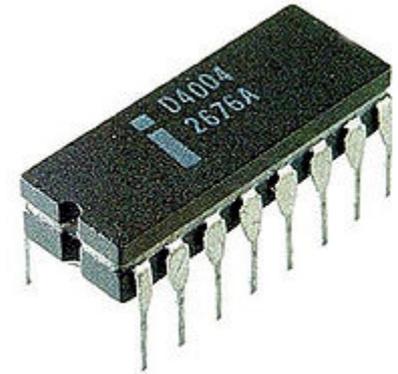
1968, Robert Noyce y Gordon Moore fundan INTEL, l'empresa lider de microprocessadors.



SE CREA EL PRIMER MICROPROCESADOR INTEL 4004

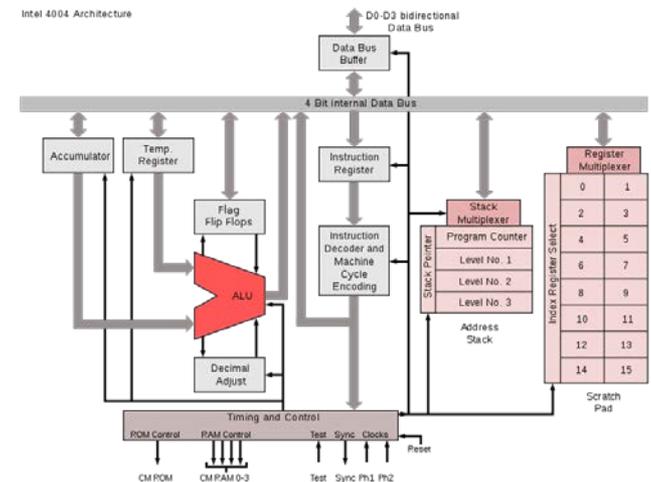
1969: INTEL recibe el encargo de la empresa japonesa **Busicom** para fabricar una calculadora de 12 chips.

1970: Federico Faggin es contratado por **INTEL** para desarrollar este proyecto. Después de muchos retardos el primer chip no funciona y **Busicom** rechaza el contrato. **INTEL** lo comercializa como un chip programable de propósito general. Tiene un éxito comercial inesperado.



Consistía en un conjunto de 3 chips con chip ROM de 2 kbits, un chip RAM de 320 bits y el procesador de 4 bits. Todo encapsulado en un DIP de 16 pins.

El procesador 4004 tenía 2300 transistores realizados con tecnología PMOS de 10 μm de anchura de línea. Utilizaba un señal de reloj de 108 KHz y el chip era de 13,5 mm^2



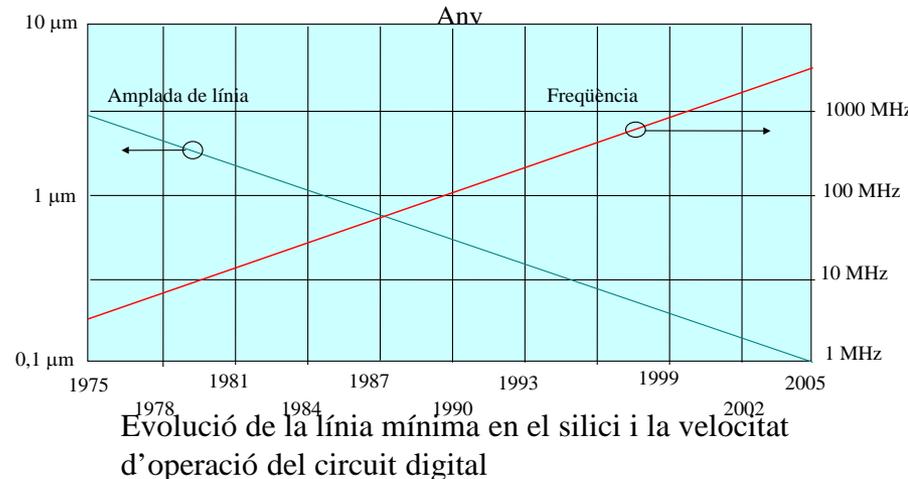
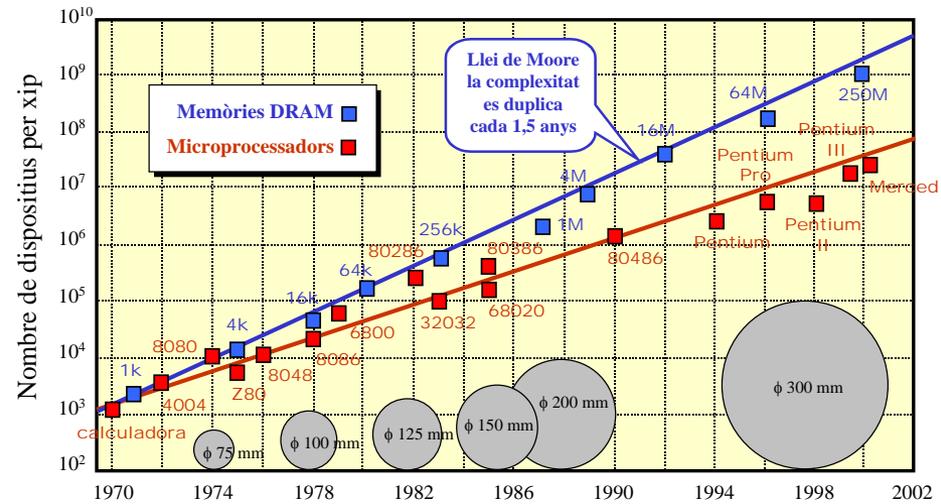
LA MICROELECTRÓNICA: UNA CARRERA DESENFRENADA

1964: Gordon Moore de INTEL pronostica que el número de transistors en un C.I. se duplicará cada 18 meses: ley de Moore

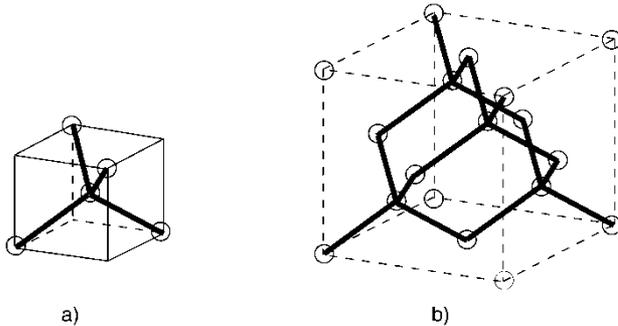
El pronóstico se ha cumplido durante 50 años. El desarrollo de los C.I. ha sido la base de la revolución informática que ha traído la red planetaria basada en internet.

Esta revolución se ha basado en la planificación de la investigación y desarrollo de los C.I.: ROADMAP que ha permitido superar todos los obstáculos que se presentaban y ofrecer C.I. mejores y más baratos.

¿Cuando la microelectrónica llega a su fin, la nanotecnología tomará el relevo?



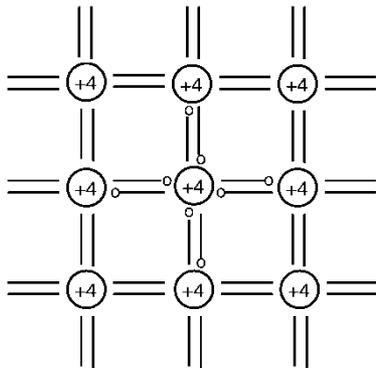
3.2.- ESTRUCTURA CRISTALINA Y PORTADORES DE CORRIENTE



Cada átomo está unido a cuatro átomos vecinos mediante cuatro enlaces covalentes. La repetición de esta estructura conduce a la **célula cristalina básica**: un cubo cuya arista mide 5,43 angstroms.

En el cristal de silicio hay $5 \cdot 10^{22}$ átomos por cm^3 .

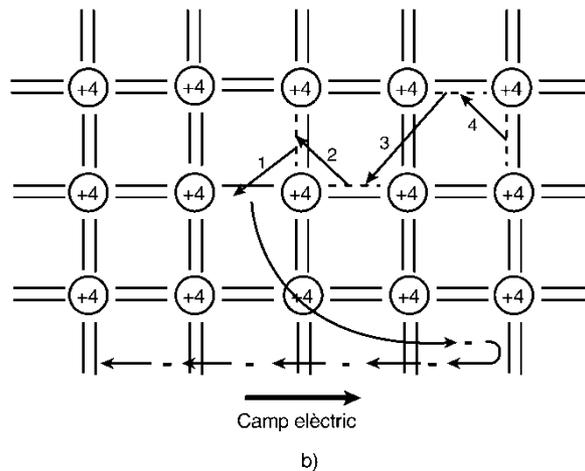
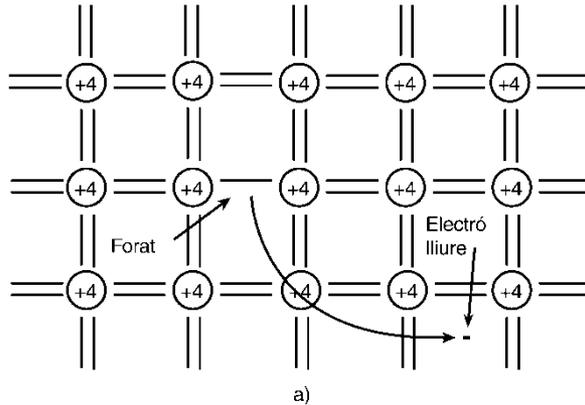
Modelo de enlaces: representación bidimensional de la estructura cristalina tridimensional.



Si en la estructura descrita se aplica un campo eléctrico no circularía corriente, ya que todas las cargas están ligadas.

Para que circule corriente se requiere que hayan cargas móviles que se desplacen por la acción del campo eléctrico. Son los denominados **portadores de corriente**.

PORTADORES DE CORRIENTE: ELECTRONES LIBRES Y HUECOS



Si un electrón de un enlace covalente captura un **cuanto** de energía puede romper el enlace y convertirse en un **electrón libre**: portador de corriente de carga $-q$.

El enlace covalente roto se mueve por el cristal de la misma forma que lo haría una carga positiva, que se denomina **hueco**: portador de corriente de carga $+q$.

($q =$ carga del electrón $= 1,6 \cdot 10^{-19}$ culombs)

Magnitudes fundamentales en semiconductores:

$n =$ concentración de electrones libres $= n^\circ$
electrons libres por centímetro cúbico.

$p =$ concentración de huecos $= n^\circ$ de huecos por centímetro cúbico.

3.3.- MODELO DE BANDAS DE ENERGÍA DE UN SEMICONDUCTOR

El modelo de bandas de energía de un semiconductor consiste en la descripción de las energías que tienen o pueden tener los electrones del semiconductor.

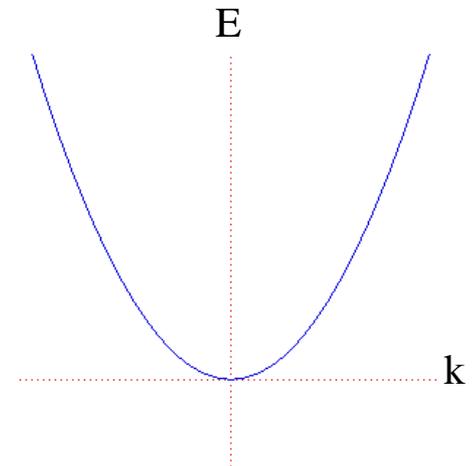
De forma similar a lo que ocurría en el pozo de potencial y en el modelo cuántico del átomo, los átomos del cristal crean una función potencial $V(r)$ que provoca que la energía y el momento de los electrones están cuantificados: solo están permitidos determinados valores.

El electrón en el semiconductor se comporta según su doble naturaleza cuántica: como partícula de energía E y momento p , y como onda con longitud de onda λ y frecuencia f .

Consideremos inicialmente un *electrón libre (fuera del cristal)* que tiene una energía cinética E :

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2m}(mv)^2 = \frac{1}{2m}p^2 = \frac{1}{2m}\left[\frac{h}{2\pi}k\right]^2 = \frac{h^2}{8\pi^2m}k^2$$

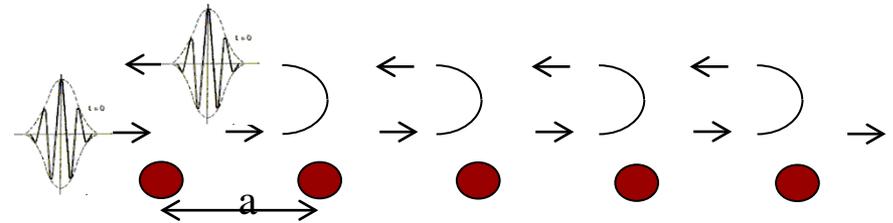
En donde se ha usado la hipótesis de De Broglie entre p y k (por esto se suele denominar a k “momento cristalino”). La relación entre E y k es una parábola y están permitidos todos los valores de E y de k .



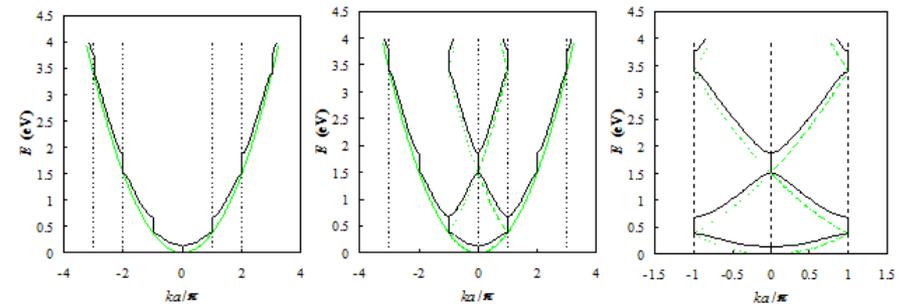
Consideremos ahora un *electrón en un cristal unidimensional* formado por una hilera de átomos.

Cuando una onda electromagnética incide en un cristal cada átomo re-emite la onda en todas las direcciones. Las ondas re-emitidas por los átomos se suman y se crean fenómenos de interferencia. Sea un electron avanzando hacia las x crecientes (función de onda ψ_+). La interferencia será constructiva cuando $n\lambda = 2a$. Para estas longitudes de onda el electrón es reflejado y cambia al sentido de las x decrecientes (función de onda ψ_-).

Pero como se sigue cumpliendo la condición de interferencia constructiva, el electron vuelve a ser reflejado de nuevo por el cristal hacia las x crecientes: el cristal impide la propagación de este electrón (onda estacionaria).



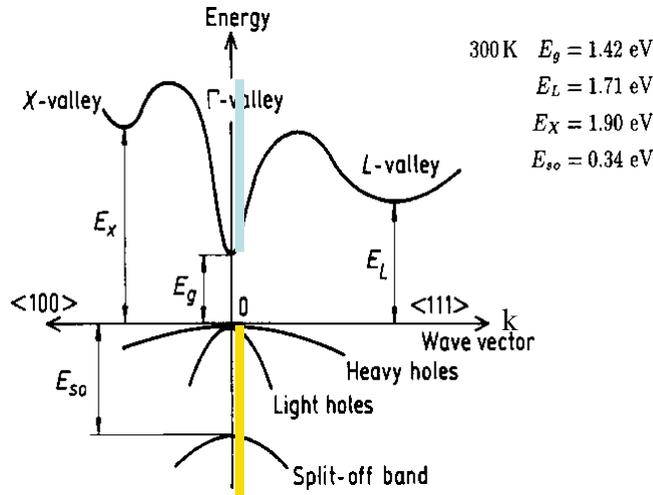
Cuando ocurren estas reflexiones la relación parabólica $E(k)$ del electrón libre se modifica y aparecen bandas prohibidas en los valores de k ($k = 2\pi/\lambda$) en los que el cristal impide la propagación.



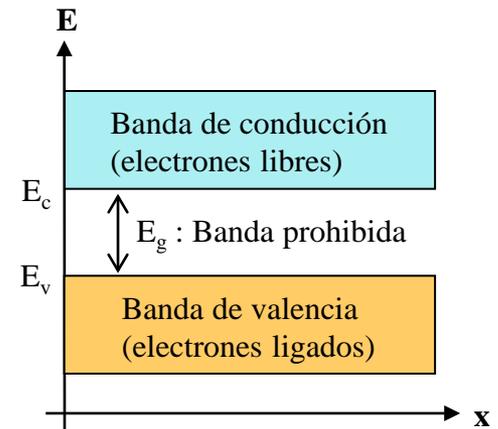
© Bart Van Zeghbroeck 2007

Además, la ecuación de Schrödinger muestra que en un cristal la función de onda es periódica con período $2\pi/a$. Y como es periódica basta con tomar un solo período. La anterior gráfica de la derecha muestra los valores permitidos de E en función de k , y se denomina esquema de bandas de energía en zona reducida del cristal unidimensional.

En un cristal tridimensional el electrón encontrará distintas familias de planos paralelos según sea la dirección de su movimiento. Cada una de estas familias de planos paralelos tendrá una separación distinta entre ellos que provocarán reflexiones del electrón (paquete de ondas) para distintos valores de k . En estos casos se dibuja el diagrama $E(k)$ en distintas direcciones del cristal (en la figura dirección $\langle 100 \rangle$ hacia la izquierda y en dirección $\langle 111 \rangle$ hacia la derecha).



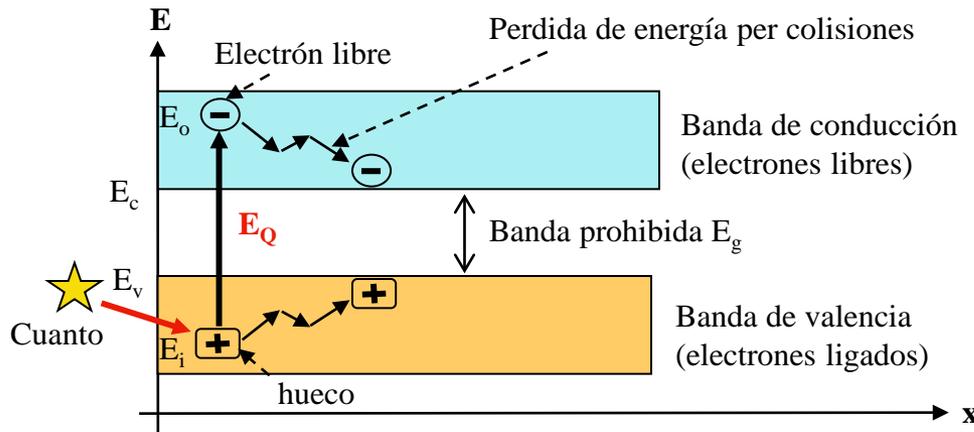
La proyección de estas curvas sobre el eje de ordenadas muestra los niveles permitidos y prohibidos de energía que pueden tener los electrones en el semiconductor.



Banda de conducción: niveles de energía de los electrones libres (por encima de E_c).

Banda de valencia: energía de los electrones de valencia en los enlaces (por debajo de E_v)

Banda prohibida: intervalo de energía entre E_c y E_v . Ningún electrón puede estar en esta banda. Su anchura es $E_g = E_c - E_v$: es la mínima energía que se requiere para romper un enlace covalente.



Cuando un electrón de valencia de energía E_i captura un cuanto E_Q , su energía pasa a $E_o = E_i + E_Q$, siempre que E_o esté en la banda de conducción. Si E_Q es inferior a E_g ningún electrón de valencia podrá pasar a la banda de conducción.

Este electrón libre tiene una energía cinética $E_o - E_c$.

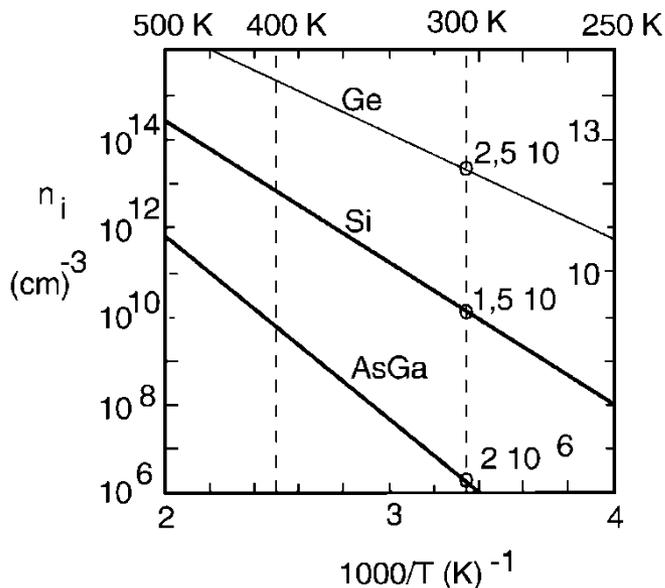
Se genera un hueco en el nivel E_i con energía cinética $E_v - E_i$.

3.4.- SEMICONDUCTOR INTRÍNSECO

Semiconductor intrínseco: semiconductor puro i perfectamente cristalino.

Sus portadores se generan por pares: electrón libre y hueco.

Por tanto $n = p = n_i$ ($n_i =$ concentració intrínseca). Se demuestra que:



$$n_i = A \cdot T^{3/2} \cdot e^{(-E_g/2KT)}$$

n_i aumenta con T: hay más cuantos de energía térmica disponibles para romper enlaces.

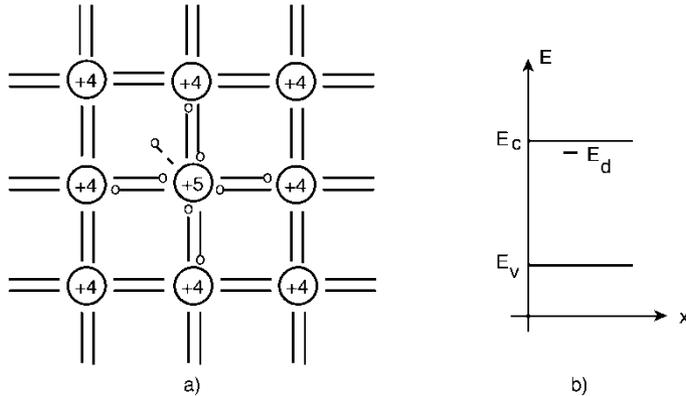
n_i disminuye cuando aumenta E_g : cuando más fuerte sea el enlace habrán menos enlaces rotos.

$E_g = 1.1$ eV para el silici (Si)

= 0.68 eV para el Germani (Ge)

= 1.43 eV para el Arseniuro de Galio (AsGa)

SEMICONDUCTOR TIPO N

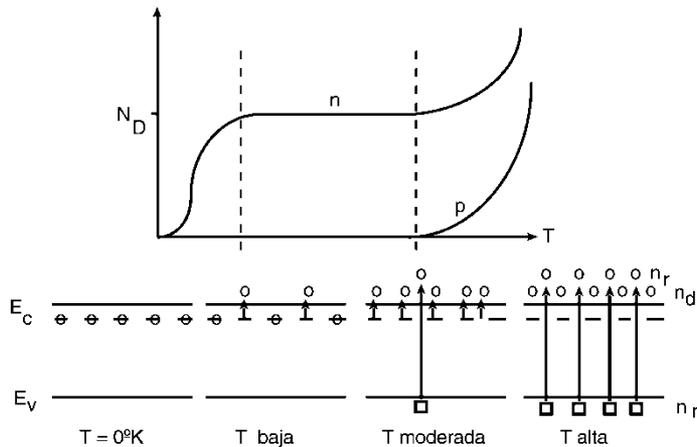


Semiconductor extrínseco tipo N: semiconductor dopado con impurezas donadoras en el que los electrones libres son mayoritarios.

Impureza donadora: átomo capaz de dar fácilmente un electrón libre (para el silici son átomos pentavalentes com el fòsforo).

El “quinto” electròn està debilmente ligado al átomo. Con poca energía salta a la banda de conducción: nivel donador E_d . Cuando este electròn abandona el átomo de impureza ésta se ioniza positivamente.

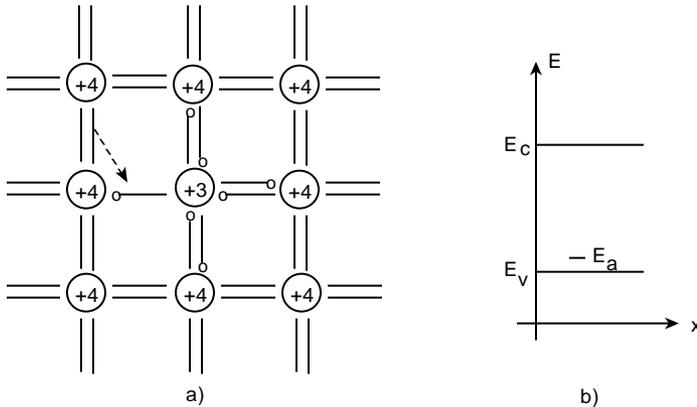
Al aumentar la temperatura desde el cero absoluto, primero “saltan” los “quintos” electrones de las impurezas. Solo a T altas es significativa la ruptura de enlaces covalentes. Se demuestra que:



$$n_0 = [N_D^+ + (N_D^{+2} + 4 \cdot n_i^2)^{1/2}] / 2$$

$$p_0 = n_i^2 / n_0$$

SEMICONDUCTOR TIPO P



Semiconductor extrínseco tipo P: semiconductor dopado con impurezas aceptoras en el que los huecos son mayoritarios.

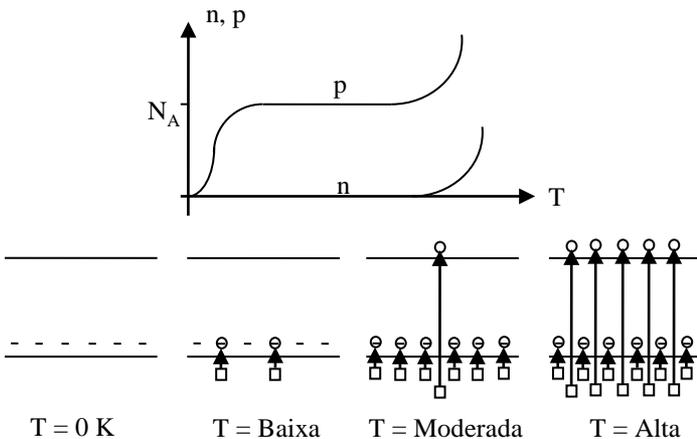
Impureza aceptoras: átomo capaz de aceptar fácilmente un electrón de valencia (para el silicio son átomos trivalentes como el boro).

Le falta completar el “cuarto” enlace covalente. Hay que dar muy poca energía a un electrón de un enlace vecino para que salte al enlace incompleto: nivel aceptor E_a . Cuando un electrón es aceptado por el átomo de impureza éste se ioniza negativamente.

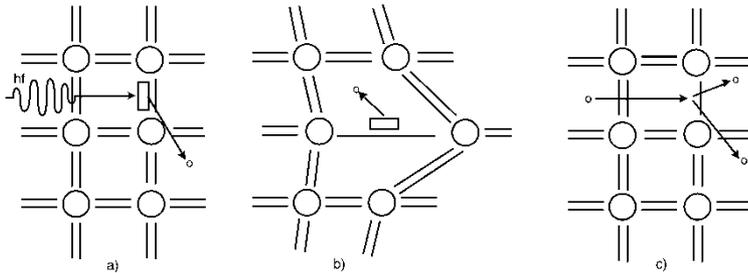
Al aumentar la temperatura desde el cero absoluto, primero “saltan” electrones de la banda de valencia a los niveles E_a , generando huecos. Solo a altas T es significativa la ruptura de enlaces covalentes.

$$p_0 = [N_A^- + (N_A^{-2} + 4 \cdot n_i^2)^{1/2}] / 2$$

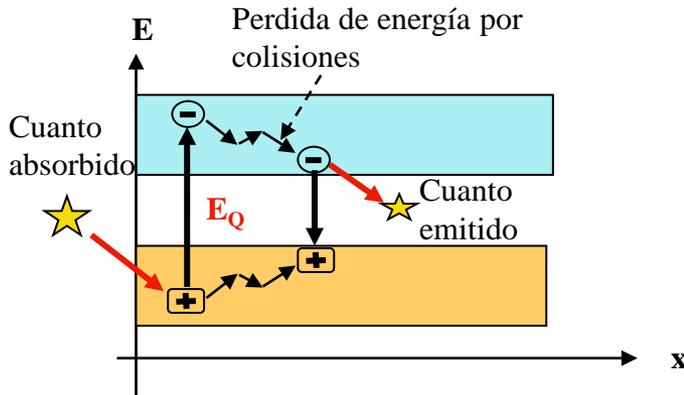
$$n_0 = n_i^2 / p_0$$



3.5.- GENERACIÓN Y RECOMBINACIÓN DE PORTADORES



En los procesos de recombinación las flechas van en sentido contrario



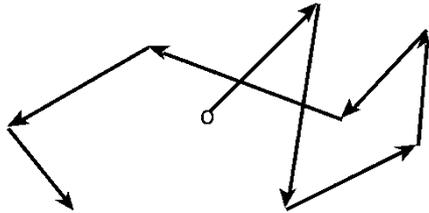
Generación: Creación de un par electrón-hueco mediante captura de un cuanto de energía térmica (fonón), electromagnética (fotón) o cinética. Se cuantifica por $g = n^\circ$ portadores generados por cm^3 y por segundo.

Recombinación: Aniquilación de un par electrón-hueco por reconstrucción del enlace covalente. Se emite la energía de exceso. Se cuantifica por $r = n^\circ$ de portadores recombinados Por cm^3 y por segundo.

Tiempo de vida de un portador: tiempo transcurrido desde la generación hasta la recombinación.

Régimen estacionario: situación en la que $r = g$, y que por tanto n i p son constantes. Un caso significativo es el del **equilibrio térmico** a una T determinada: $r_{th} = g_{th}$ i $n = n_0$, $p = p_0$

3.6.- CORRIENTE DE DIFUSIÓN



Movimiento de agitación térmica de los portadores: aleatorio (similar al de las molèculas de un gas)

Difusión de portadores: movimiento de los portadores que tiende a igualar las concentraciones en todos los puntos.

Es originado por la agitación tèrmica.

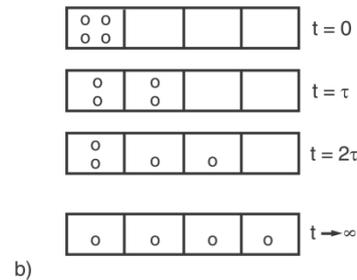
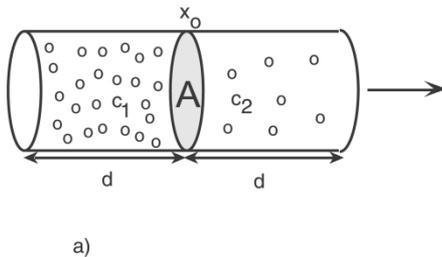
Hay un desplazamiento neto de portadores desde los puntos de mayor hacia los de menor concentración.

Corrientes de difusión:

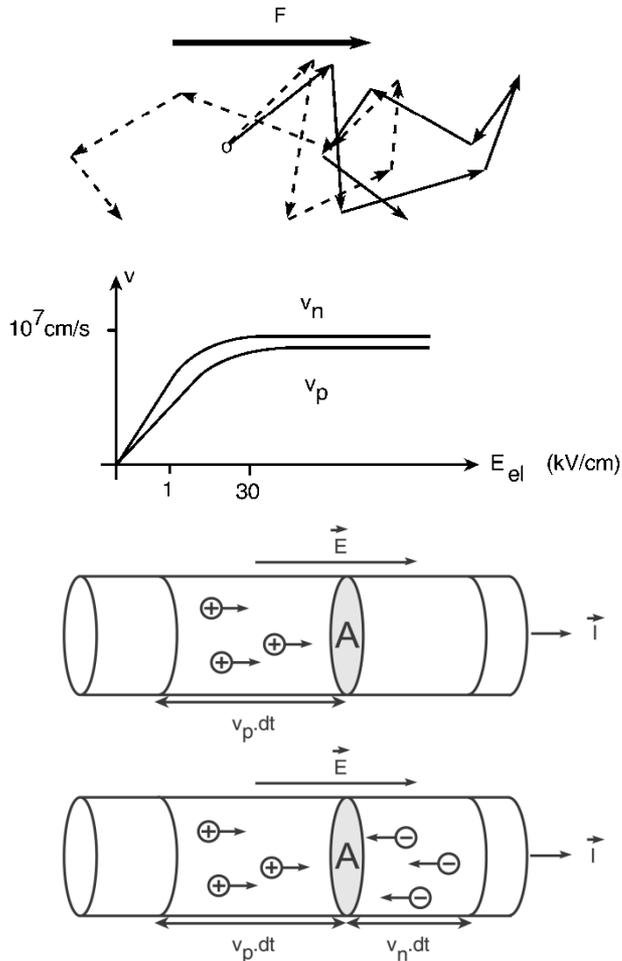
$$J_{dp} = -q \cdot D_p \cdot dp/dx \quad J_{dn} = +q \cdot D_n \cdot dn/dx$$

D_p, D_n = constantes de difusión

J_{dp}, J_{dn} = densidades de corriente de difusión de huecos y de electrones (A/cm²)



CORRIENTE DE ARRATRE



Arrastre de portadores: superpuesto al movimiento de agitación térmica. Movimiento con velocidad constante.

Velocidad de arrastre de los portadores: inicialmente proporcional al campo eléctrico. Después satura a un valor aproximado de 10^7 cm/s. Para campos débiles:

$$v_p = \mu_p \cdot E_{el} \qquad v_n = -\mu_n \cdot E_{el}$$

μ_p, μ_n = movilidad de huecos y de electrones

Corrientes de arrastre: corriente originada por un campo eléctrico (E_{el})

$$J_{ap} = q \cdot p \cdot v_p \qquad J_{an} = q \cdot n \cdot v_n$$

Los huecos se mueven en el mismo sentido que E_{el} .
Los electrones en sentido contrario, pero llevan la corriente eléctrica de arrastre en el mismo sentido que los huecos.

RESISTENCIA DE UN SEMICONDUCTOR

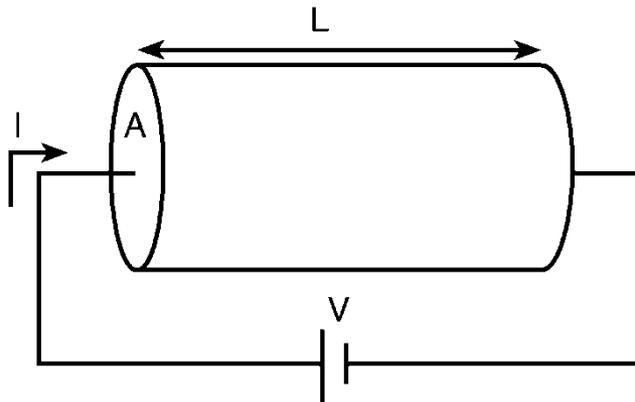
Concepto: cuando se aplica una tensión V a un semiconductor homogéneo circula una corriente proporcional a V : $I = V/R$.

Si el semiconductor es homogéneo al aplicar la tensión V se origina un campo eléctrico en su interior dado por: $E_{el} = V/L$

Este campo eléctrico origina una corriente de arrastre: $I = I_{ap} + I_{an} = qA p v_p + qA n v_n$

Si el campo eléctrico es débil las velocidades de arrastre son proporcionales a E_{el} . Por tanto:

$$I = qA[p \cdot \mu_p + n \cdot \mu_n] \cdot E_{el}$$



Finalmente,

$$R = V/I = \rho \cdot (L/A)$$

$$\rho = 1/\sigma; \quad \sigma = q[p \cdot \mu_p + n \cdot \mu_n]$$

σ = conductividad del semiconductor

Nota: Si E_{el} es intenso la velocidad deja de ser proporcional a E_{el} y la expresión de R no es válida

3.7.- ECUACIONES DE CONTINUIDAD

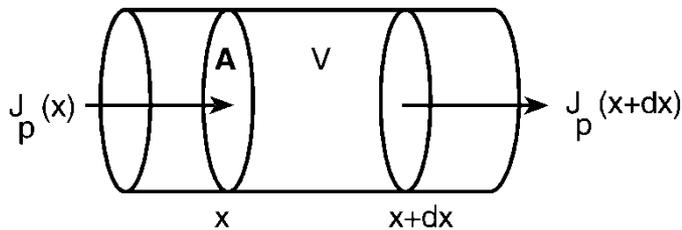
Concepto: incremento de la concentración en un volumen diferencial como resultado del balance entre la generación, la recombinación, el flujo de portadores que entran y que salen

Continuidad de huecos: $dp/dt = (g - r) - (1/q) \cdot (dJ_p/dx)$

Continuidad de electrones: $dn/dt = (g - r) + (1/q) \cdot (dJ_n/dx)$

Aproximación:

Si la concentración de mayoritarios es aproximadamente la de equilibrio, solo se resuelve la ecuación de continuidad de minoritarios aproximada de las siguientes formas:

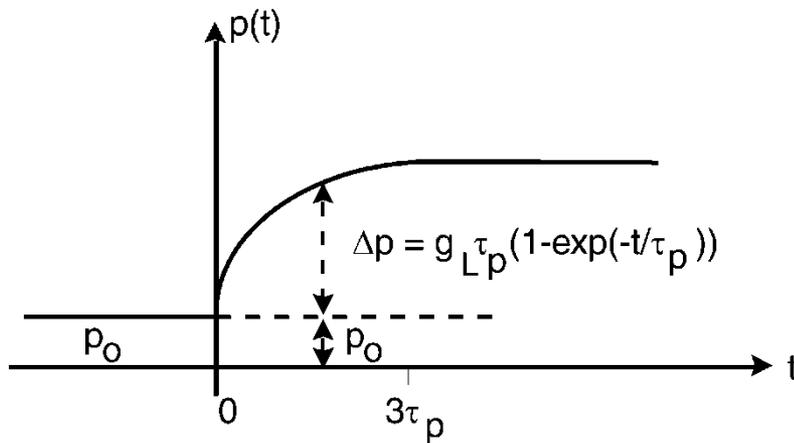


$$\frac{\partial p}{\partial t} = g_{ext} - \frac{p - p_0}{\tau_p} - \frac{1}{q} \frac{\partial J_p}{\partial x} \qquad \frac{\partial n}{\partial t} = g_{ext} - \frac{n - n_0}{\tau_n} + \frac{1}{q} \frac{\partial J_n}{\partial x}$$

con g_{ext} = generación no térmica, τ_p = tiempo de vida de los huecos, τ_n = tiempo de vida de los electrones.

EJEMPLO: APLICACIÓN A UN SEMICONDUCTOR ILUMINADO

Enunciado del problema: Se quiere conocer como varia la concentración de minoritarios (huecos) en un semiconductor N homogéneo (no hay variación con x), si a partir de $t = 0$ se le ilumina generándose g_L huecos por cm^3 y por segundo.



Al ser homogéneo: $dJ_p/dx = 0$

Ecuación a resolver: $dp/dt = g_L - (p-p_0)/\tau_p$

Condición inicial: continuidad de los huecos en $t = 0$: $p(0) = p_0$

Solución: $p = p_0 + g_L \tau_p [1 - \exp(-t/\tau_p)]$

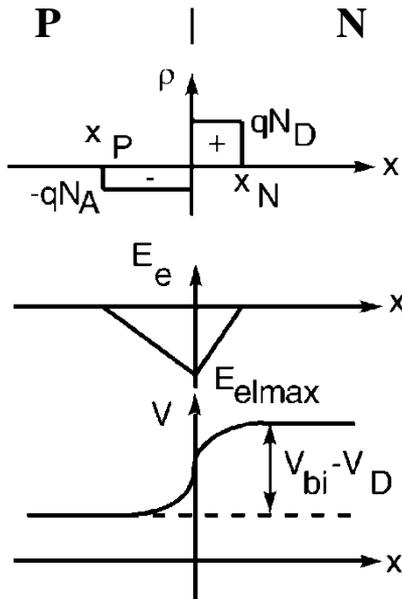
Nota: Exceso final $\Delta p = g_L \tau_p$, a partir de $3\tau_p$

3.8.- CARGAS Y CAMPOS EN UN SEMICONDUCTOR

Densidad de carga: $\rho(x) = q[p(x) - n(x) + N_D^+(x) - N_A^-(x)]$

Ley de Gauss: $dE_{el}/dx = \rho/\epsilon$

Campo eléctrico y potencial: $dV/dx = - E_{el}$



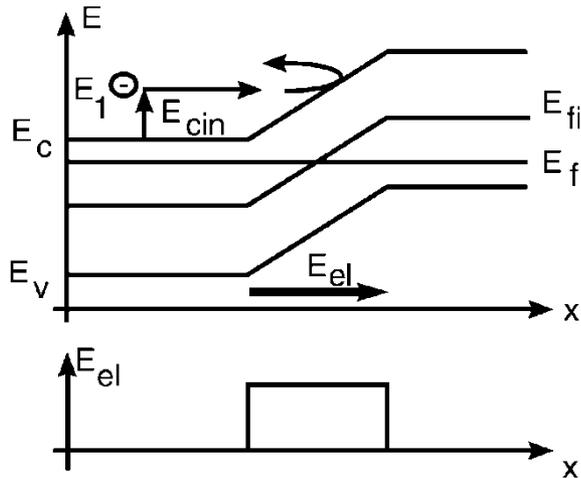
Ejemplo: unión PN

Suponiendo la densidad de carga de la figura y que $E_{el} = 0$ si $x < x_P$:

$$E_{el}(x) = \int \frac{\rho(x)}{\epsilon} dx \quad | E_{elmax} | = qN_A x_P / \epsilon$$

$$V(x) = - \int E_{el}(x) dx \quad \Delta V = (1/2)(x_P + x_N) \cdot | E_{elmax} |$$

3.9.- DIAGRAMA DE BANDAS DE ENERGIA



Concepto: Representación de los niveles de energía (E_c , E_v ,..) en función de la posición x . Proporciona información sobre los campos eléctricos y las diferencias de potencial en el interior del dispositivo:

$$E_{el}(x) = \frac{1}{q} \frac{dE_{fi}}{dx} \qquad V(x) - V(x_0) = \frac{1}{-q} [E_{fi}(x) - E_{fi}(x_0)]$$

siendo E_f = nivel de Fermi y E_{fi} = nivel de Fermi intrínseco. El nivel $E_{fi} = (E_c + E_v)/2$. Las concentraciones en equilibrio térmico en un punto vienen dadas por:

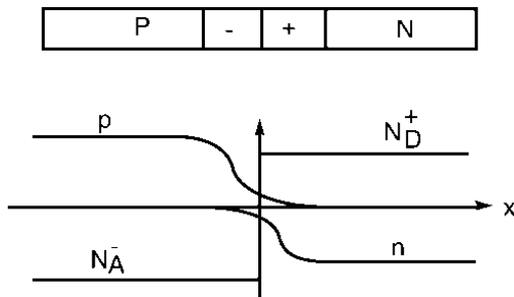
$$n_0 = n_i e^{(E_f - E_{fi})/KT} \qquad p_0 = n_i e^{-(E_f - E_{fi})/KT}$$

Construcción: se demuestra que el nivel E_f en equilibrio térmico es constante a través del dispositivo. Un dopado variable hace variar $E_{fi}(x)$, y como está en medio de la banda, varían E_c y E_v . La derivada de E_{fi} proporciona $E_{el}(x)$.

Interpretación: Un electrón de energía E_1 tiene una energía cinética $E_{cin} = E_1 - E_c$. Cuando las bandas se “doblan” la energía cinética del electrón disminuye (E_{el} lo frena) hasta que se anula (velocidad cero) cuando toca el nivel E_c .

3.10.- LA UNIÓN PN.

Supongamos un dopado N_A constante en la parte P y un dopado N_D constante en la parte N. En la parte P hay iones negativos fijos N_A^- y huecos móviles. En la parte N hay iones positivos fijos N_D^+ y electrones móviles.



Cuando las dos partes “entran en contacto” aparece una diferencia de concentración en los huecos entre las partes P y N que origina una corriente de difusión que tiende a igualar la concentración. Los huecos van de P a N y disminuye su concentración en la parte P. Algo similar ocurre con los electrones que van por difusión de N hacia P, disminuyendo su concentración en el lado N.

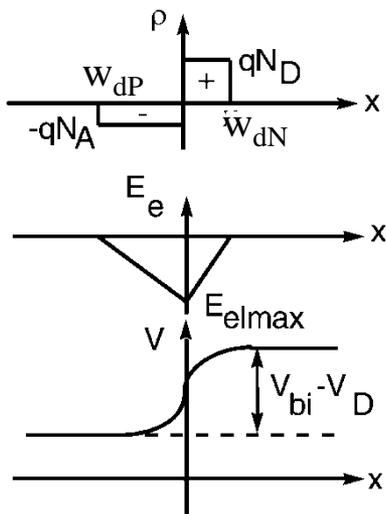
Las impurezas ionizadas están fijas en el cristal y no se desplazan.

Aparece una carga neta negativa en la parte P: $\rho_p(x) = q[p(x) - n(x) - N_A] \cong -qN_A$ (suponiendo, $n(x)$ y $p(x) \ll N_A$), y una carga neta positiva en la parte N: $\rho_N(x) = q[p(x) - n(x) + N_D] \cong +qN_D$

Estas cargas originan un campo eléctrico que va de N hacia P, que origina una corriente de arrastre que se opone a la de difusión. Cuando se alcanza el equilibrio térmico la corriente de difusión de huecos es balanceada en cada punto por la corriente de arrastre de huecos, y la corriente de difusión de electrones es también balanceada en cada punto por la de arrastre de electrones. Se establecen unas concentraciones fijas de electrones y de huecos.

ANÁLISIS DE LA ZONA DE CARGA ESPACIAL (ZCE)

En equilibrio térmico hay un dipolo de carga en la región de transición que genera un campo eléctrico y éste una diferencia de potencial entre la parte N y la parte P.



Debe haber neutralidad de carga: $qN_A w_{dP} = qN_D w_{dN}$

Integrando la densidad de carga se obtiene el campo eléctrico, y luego integrando el campo eléctrico se obtiene el potencial. El modulo del valor máximo del campo eléctrico en la unión, y la anchura de la zona de carga de espacio w_d vienen dados por:

$$|E_{el\max}| = \sqrt{\frac{2q}{\epsilon} \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} (V_{bi} - V_D)}$$

$$w_d = w_{dP} + w_{dN} = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \left[\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right] (V_{bi} - V_D)}$$

En equilibrio térmico, cuando $V_D = 0$, la diferencia de potencial entre la parte N y la parte P es V_{bi} , denominado potencial de difusión y vale $V_{bi} = (KT/q) \ln(N_A N_D / n_i^2)$. Cuando se aplica una polarización V_D a la unión PN, la diferencia de potencial en la unión pasa a ser $V_{bi} - V_D$

EL DIODO DE UNIÓN PN

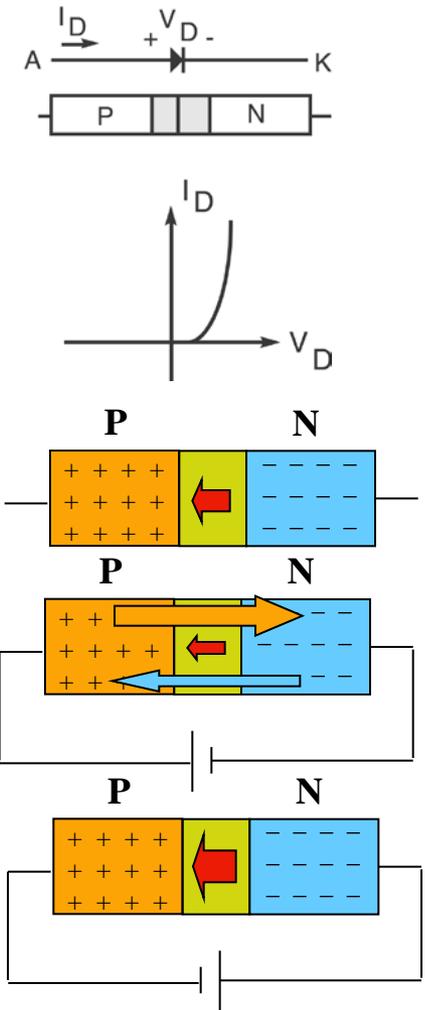
El diodo semiconductor está constituido por una unión PN. La región P es el ánodo del diodo y la región N el cátodo.

Presenta el efecto rectificador: permite el paso de corriente cuando la tensión aplicada a P es mayor que la aplicada a N, y bloquea el paso de corriente cuando la tensión aplicada cambia de signo.

Unión PN sin polarizar: corriente nula. El campo eléctrico en la región de transición confina a los electrones en la región N i a los huecos en la región P. Los huecos van por difusión de P a N, pero el campo eléctrico los devuelve a la región P. Los electrones van per difusión de N a P, pero el campo eléctrico los devuelve a N.

Unión PN con polarización directa: corriente de P a N. La tensión de polaritzación V_D disminuye el campo eléctrico en la región de transición. Pasan huecos de P a N electrones de N a P.

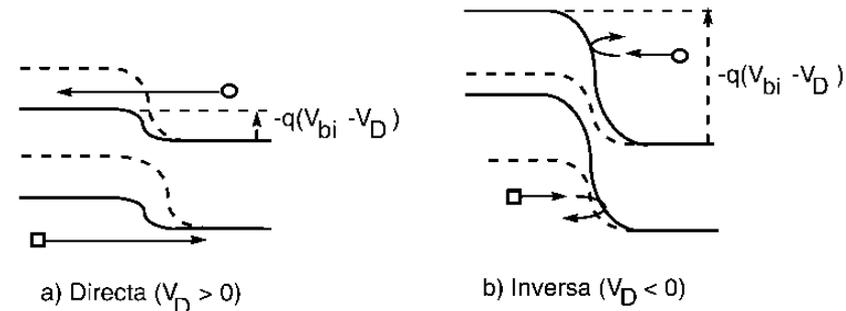
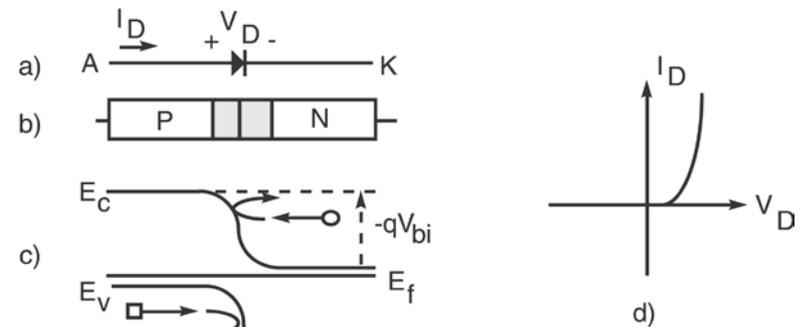
Unión PN con polarización inversa: No pasa corriente. La polaritzación aumenta el campo eléctrico en la región de transición. No pueden pasar huecos de P a N ni electrones de N a P.



BANDAS DE ENERGÍA Y EFECTO RECTIFICADOR

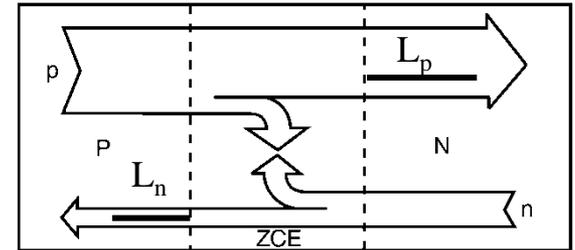
El diagrama de la unión PN en equilibrio térmico muestra que todos los electrones de la parte N con energía inferior a la barrera que presenta el nivel E_c no pueden pasar a la región P. Se demuestra (ley de Fermi) que la concentración de electrones en la banda de conducción disminuye exponencialmente al aumentar E. Como no hay prácticamente electrones que puedan superar la barrera, la corriente de electrones de N a P será aproximadamente cero. Un razonamiento similar rige para los huecos.

Al polarizar directamente ($V_D > 0$) disminuyen las barreras y hay una parte importante de electrones que pueden ir de N hacia P y de huecos que pueden ir de P hacia N. Por tanto, circula corriente. En cambio, con polarización inversa aumentan las barreras y los portadores no pueden pasar al otro lado, por lo que la corriente es nula.



ECUACIÓN DEL DIODO

En polarización directa ($V_D > 0$) la región P inyecta huecos a la región N y la región N inyecta electrones a la región P, ya que el campo eléctrico en la ZCE disminuye. Los portadores inyectados a la región adyacente son recombinados por los mayoritarios de la región, recorriendo una distancia media L : longitud de difusión. Se demuestra que $L = (D\tau)^{1/2}$. También hay una cierta recombinación en la ZCE.



La corriente por el diodo es

$$I_D = I_s [\exp(V_D / \eta V_t) - 1]$$

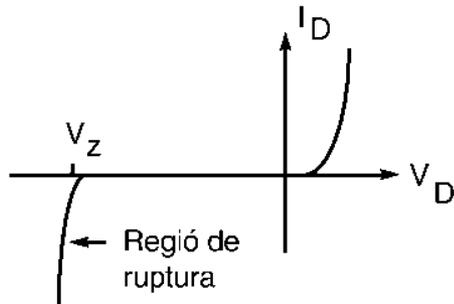
denominada **ecuación del diodo**

$I_s =$ **corriente inversa de saturación** $= A \cdot n_i^2$: varía con T y con E_g . Para el silicio un valor típico es 10^{-15} A, para el AsGa puede ser de 10^{-22} A. Notar que en inversa ($V_D < 0$) $I_D = -I_s$ que es prácticamente cero.

$\eta =$ factor de idealidad del diodo. Suele variar entre 1 y 2.

El diodo conduce una corriente apreciable cuando $V_D > V_\gamma$, $V_\gamma =$ **tensión de codo o tensión umbral**: $V_\gamma = \eta V_t \cdot \ln(I_{Dref} / I_s)$. Para el silicio con $I_{Dref} = 1$ mA $V_\gamma = 0,7$ V; para el AsGa $V_\gamma = 1,2$ V.

RUPTURA DE LA UNIÓN



Cuando $V_D < 0$ aumenta E_{el} en la región de transición. Cuando alcanza un valor determinado (E_{rupt}) empieza a circular corriente negativa (de cátodo a ánodo): se produce la ruptura de la unión.

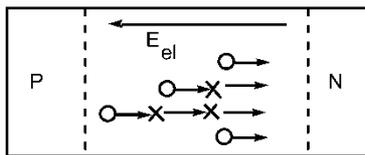
$$\text{Tensión de ruptura} = V_Z = -V_D|_{E_{elmax} = E_{rupt}}$$

$$E_{elmax} = E_{rupt} = [(2q/\epsilon) \cdot [N_A N_D / (N_A + N_D)] \cdot (V_{bi} + V_Z)]^{1/2}$$

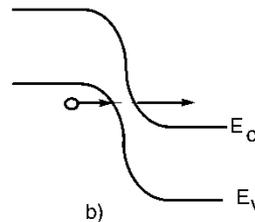
Mecanismos de ruptura:

Avalancha: un portador adquiere energía cinética del campo eléctrico i arranca otros electrones de valencia por colisión.

Efecto zener o efecto túnel: El propio campo eléctrico arranca electrones de los enlaces covalentes. Hace un "túnel" a través de la banda prohibida.



a)

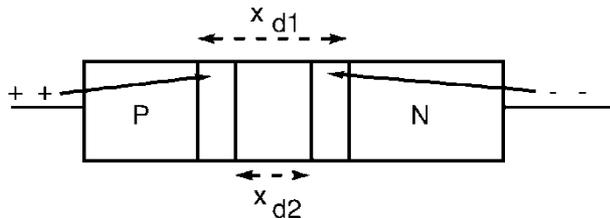


b)

3.11.- CAPACIDADES DE TRANSICIÓN C_j Y DE DIFUSIÓN

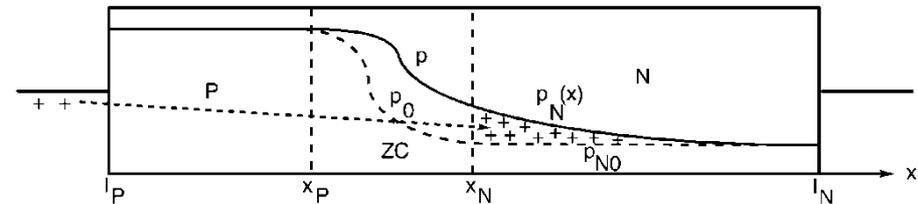
La anchura de la ZCE w_d varia con la polarización aplicada V_D . Al aumentar V_D la ZCE se hace mas delgada.

Para permitir este adelgazamiento de la ZCE hay que inyectar huecos desde el exterior del terminal P para neutralizar a las impurezas aceptoras negativas del borde de la ZCE, y electrones desde el terminal N para neutralizar a las donadoras del otro borde. Efecto capacitivo: se almacena carga en la ZCE cuando varia V_D .



$$C_j = - dQ_j/dV_D = \epsilon A/w_d$$

Al aumentar V_D aumenta $p(x)$ en todos los puntos. Se pasa de una curva $p(x)$ a otra curva de valores mayores.



Aumenta el número de huecos almacenados en la región neutra N, Q_{spN} , y el número de electrones almacenados en la región neutra P, Q_{snP} Efecto capacitivo:

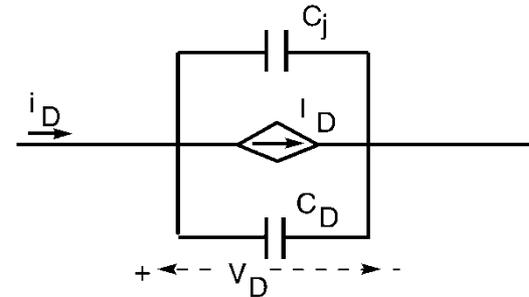
$$C_s = d(Q_{spN} + Q_{snP})/dV_D = \tau_t \cdot (I_s/V_t) \cdot \exp(V_D/V_t); \quad \tau_t = \text{tiempo de tránsito}$$

MODELO DINÁMICO DE LA UNIÓN PN

El circuito equivalente del diodo está formado por una fuente de corriente dependiente de la tensión entre terminales (ecuación del diodo en régimen estacionario) y dos condensadores en paralelo: C_j y C_s (en la figura C_s se denomina C_D)

$$i_D = I_D + C_j \cdot dV_D/dt + C_s \cdot dV_D/dt$$

$$\text{con } I_D = I_s [\exp(V_D/V_t) - 1]$$



3.12.- SEMICONDUCTORES DE GAP DIRECTO Y DE GAP INDIRECTO

Un semiconductor se denomina de gap directo cuando el mínimo de la banda de conducción y el máximo de la banda de valencia se dan para el mismo valor de k . De lo contrario es de gap indirecto. Así por ejemplo, el silicio es de gap indirecto y el Arseniuro de Galio de gap directo.

Cuando un electrón en un semiconductor absorbe o emite un cuanto de energía realiza la transición entre dos puntos de las curvas del diagrama $E(k)$. En estas transiciones se debe conservar la energía y el momento cristalino:

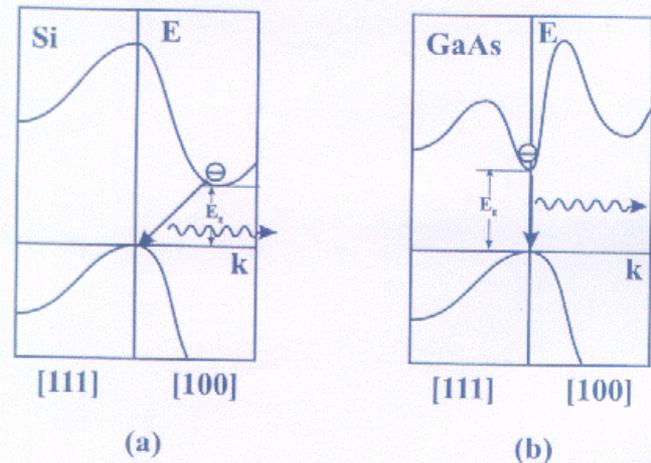
$$E_{ef} = E_{ei} \pm E_{cuanto}; \quad k_{ef} = k_{ei} \pm k_{cuanto}$$

con el signo + cuando se absorbe un cuanto y el – cuando se emite un cuanto.

El fotón tiene una k muy pequeña comparada con las k típicas del electrón. Por esto:

$$E_{e0} = E_{ei} \pm E_{fotón}; \quad k_{e0} = k_{ei}$$

Las transiciones que implican fotones son saltos verticales en el diagrama $E(k)$.



En la figura, la absorción directa de un fotón es una transición vertical desde la banda de valencia a la de conducción. Cuando un electrón hace una transición vertical desde la banda de conducción a la de valencia emite un fotón.

También son posibles las transiciones indirectas que consisten en la absorción/emisión simultánea de un fotón y un **fonón**. El salto vertical corresponde al fotón y el cambio de k se debe al fonón. La transición indirecta tiene una frecuencia mucho menor que la directa.

En equilibrio térmico los electrones tienden a ocupar los niveles más bajos de energía en cada banda. Por esto, los electrones libres residen en los “valles” de la banda de conducción, y los huecos en las cimas de la banda de valencia.

En la recombinación, un electrón de conducción pasa al lugar de un hueco. Si el semiconductor es de gap directo, se hará una transición vertical con emisión de un fotón. En el semiconductor de gap indirecto normalmente se emite un fonón (calor).

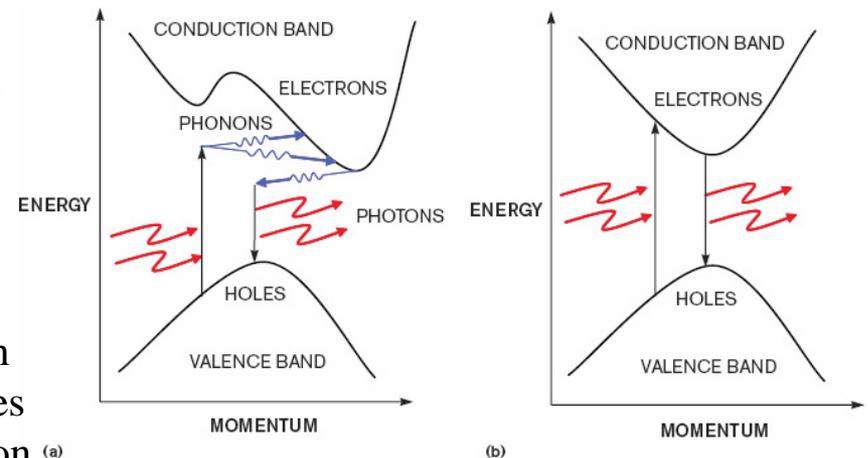


Figure 1 Silicon, an indirect-bandgap material, requires phonons, or lattice vibrations, to convert between photons and electron-hole pairs (a). GaAs and other III-V semiconductors are direct-bandgap materials and can achieve a 41% efficiency (b).

3.13.- ABSORCIÓN DE LA RADIACIÓN POR UN SEMICONDUCTOR

Cuando un fotón penetra dentro de un semiconductor puede crear un par electron hueco si su energía es superior a la banda prohibida del semiconductor:

$$E_{ft} = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1,24 eV \cdot \mu m}{\lambda} \geq E_g$$

El flujo de fotones de longitud de onda λ a una distancia x de la superficie iluminada viene dado por:

$$\Phi(\lambda, x) = \Phi(\lambda, 0)e^{-\alpha(\lambda) \cdot x}$$

siendo $\alpha(\lambda)$ = coeficiente de absorción.

La generación de pares electrón hueco a una distancia x de la superficie iluminada generados por una radiación de longitud de onda λ es

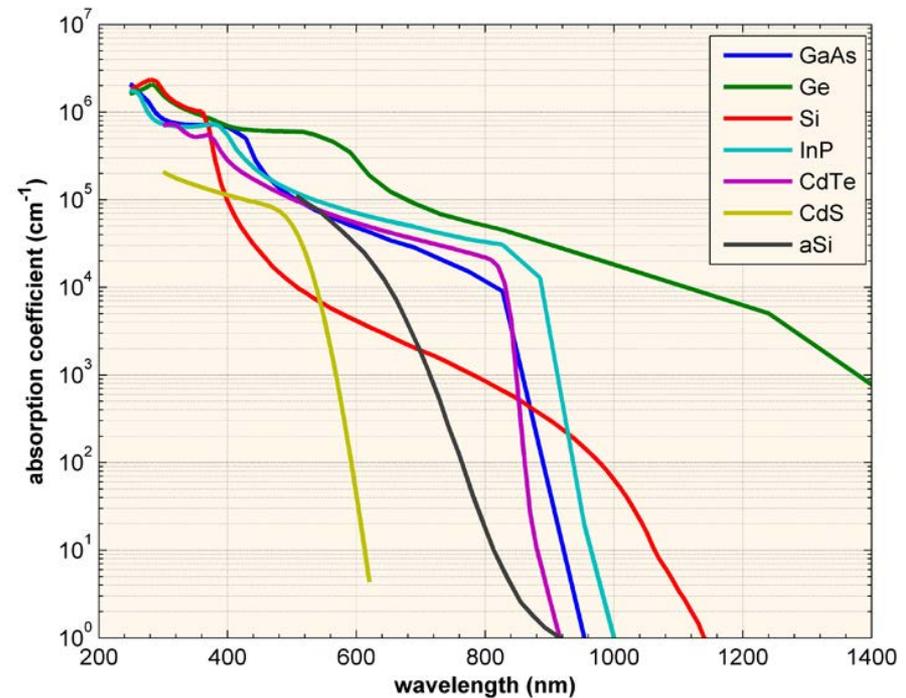
$$g_L(x, \lambda) = -\frac{d\Phi(\lambda)}{dx} = \alpha(\lambda) \cdot \Phi(0) \cdot e^{-\alpha(\lambda)x}$$

COEFICIENTE DE ABSORCIÓN.

La inversa del coeficiente de absorción, $1/\alpha(\lambda)$, es la profundidad de penetración de la radiación en el semiconductor, ya que es igual a la distancia media que penetra un fotón en un semiconductor antes de ser absorbido.

Cuando $\alpha(\lambda) = 0$ el fotón no es absorbido ya que su penetración sería infinita. Notar que esto ocurre cuando $\lambda (\mu\text{m}) < 1,24/E_g(\text{eV})$.

El coeficiente de absorción toma un valor elevado cuando la absorción es directa. En los semiconductores de gap indirecto como el silicio y el germanio, el coeficiente de absorción toma valores muy pequeños para valores de λ próximos a E_g , debido a que la absorción de estos fotones debe ser indirecta.



2.14.- LA UNIÓN PN BAJO ILUMINACIÓN

Cuando el dispositivo permite la entrada de luz en su interior se produce una generación adicional de portadores debido a g_L . La tasa de generación de portadores a una distancia x de la superficie iluminada es $g_L(x) = g_L(0) \cdot \exp(-\alpha x)$.

Para hallar la característica corriente tensión de la unión PN bajo iluminación hay que resolver las ecuaciones de continuidad en las regiones neutras incluyendo el término $g_L(x)$.

Para tener una visión cualitativa del resultado se aproxima $g_L(x)$ por un valor constante G_L . Se obtiene la siguiente expresión:

$$I_D = I_s [e^{V_D/V_t} - 1] - I_L$$

$$I_L = qAG_L [L_n + L_p + w_{ZCE}]$$

