

COMUNICACIONES OPTICAS

CONCEPTOS BASICOS DE SEMICONDUCTORES

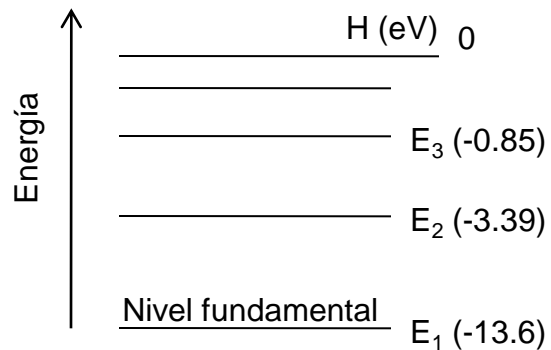
Universidad Autónoma de Baja California UABC
FACULTAD DE INGENIERIA ENSENADA
Dr. Horacio Luis Martínez Reyes

CONCEPTOS BASICOS

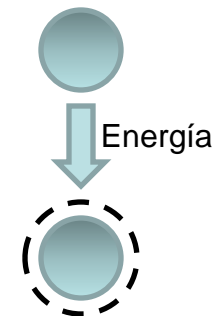
- La materia esta constituida por átomos, los cuales, son conjuntos de cargas en equilibrio.
- Los átomos se componen del núcleo (protones, neutrones) y electrones.
- La radiación electromagnética también esta cuantizada en forma de partículas llamadas fotones.
- La radiación electromagnética puede interaccionar con dichas cargas en sus elementos mas externos y deslocalizados: los electrones, y por lo tanto, con sus niveles energéticos que están discretizados.

ATOMOS AISLADOS

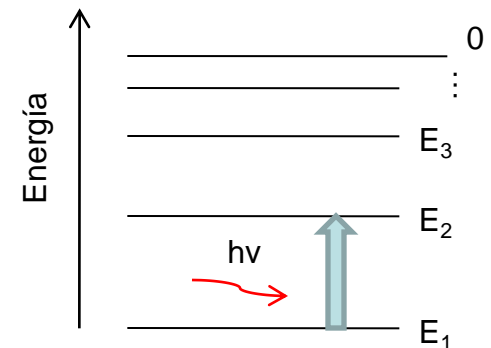
Dependiendo del material, se tienen niveles energéticos a determinadas posiciones precisas.



Un átomo se excita a un nivel superior de su nivel fundamental, si se le aplica una energía extra que coincida exactamente con una de las diferencias de energía entre niveles.



Un átomo puede ser excitado a un nivel superior de energía por medio de la absorción de un fotón con una energía igual a la necesaria para subir a un nivel excitado. Fotones con energías mayores o menores que dichos niveles nunca aportarán la energía necesaria para excitar el átomo.



ENERGIA DE UN FOTON

Energía de un fotón (J) $h\nu$

Energía de un fotón (eV) $\frac{h\nu}{e}$

Energía de un fotón (cm^{-1}) $\frac{\nu}{c}$

$h = 6.6256 \times 10^{-34} \text{ [J}\cdot\text{s]}$ (constante de Planck)

$e = 1.6022 \times 10^{-19} \text{ [C]}$ (carga eléctrica del electrón)

$c = 3 \times 10^8 \text{ [m/s]}$ (velocidad de la luz en el espacio libre)

Ejemplo:

fotón con longitud de onda $\lambda = 1 \mu\text{m}$

Su frecuencia es $\nu = 3 \times 10^{14} \text{ Hz}$

$$\longleftarrow \lambda = \frac{c}{\nu}$$

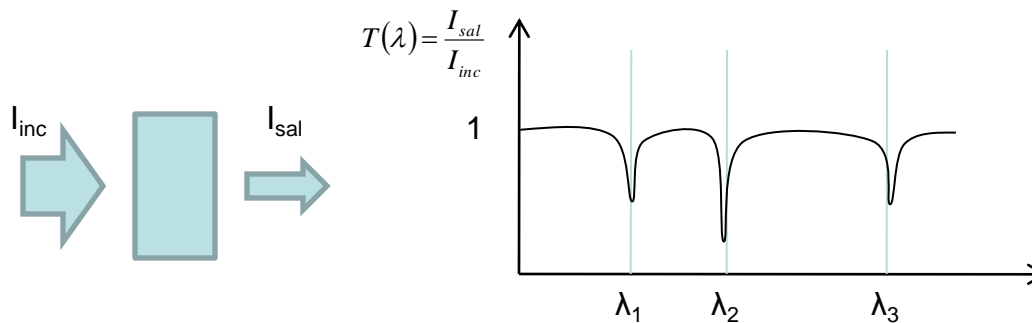
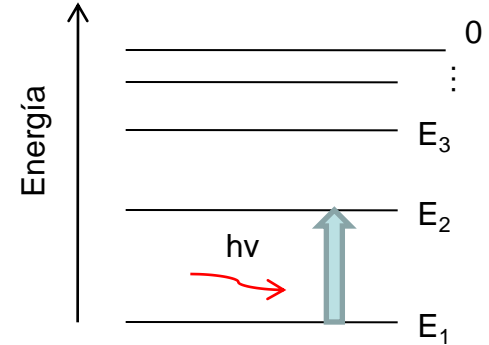
Tiene una energía:

$$E = 1.99 \times 10^{-19} \text{ [Joules]} = 1.24 \text{ [eV]} = 10000 \text{ [cm}^{-1}\text{]}$$

ABSORCION

ABSORCION DE LUZ EN UN MEDIO: fenómeno en el que un fotón cede su energía a un átomo, excitándolo a un nivel energético superior.

El fotón, por lo tanto, deja de existir, se absorbe en el medio.

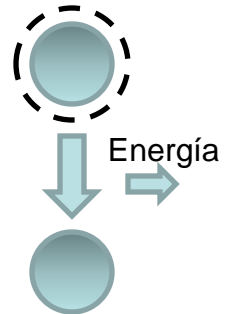


Hay absorción a determinadas longitudes de onda (aquellas cuyas frecuencias se ajustan a los niveles energéticos del material). En el resto de longitudes de onda el material es transparente. Se puede ver que no absorbe solo a una longitud de onda, sino en un intervalo estrecho en torno a ella.

La absorción es la base de los fenómenos de detección.

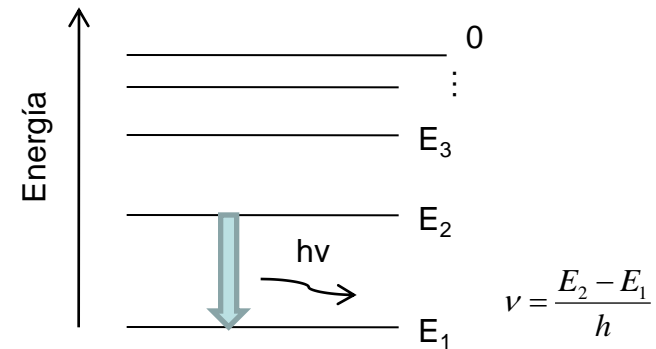
EMISION

Un átomo en un estado excitado no es estable, y tiende a desexcitarse en un tiempo que depende del nivel energético preciso desde el que pierde energía. A menudo, el átomo al desexcitarse emite un fotón con una energía igual a la pérdida en la desexcitación: emisión espontánea.

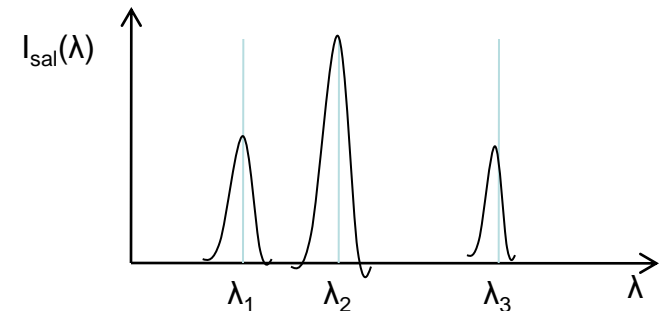
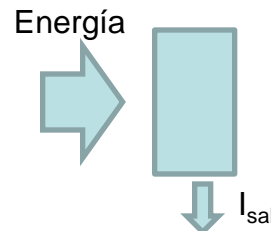


Esto no ocurre siempre: el átomo puede donar su energía a otro átomo, a vibraciones de la red (en sólidos), etc.

Así, al inyectar energía (eléctrica, por ejemplo) en un material se puede conseguir que los átomos lleguen al nivel excitado, y produzcan emisión de luz. Considerando que los niveles de energía sean tales que se produzcan fotones en el intervalo de las frecuencias ópticas.



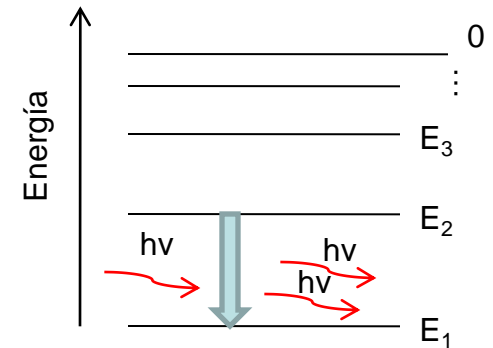
Para que exista a determinadas longitudes de onda hay que escoger los materiales.



EMISION ESTIMULADA

La emisión espontánea se produce en todas direcciones, con polarizaciones aleatorias y con anchuras espectrales que dependen de los materiales.

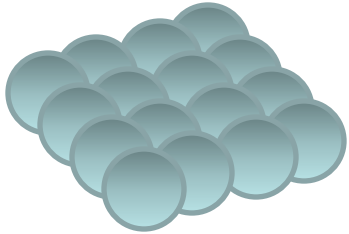
Emisión estimulada: suponiendo que existe un átomo que este en un nivel energético excitado y todavía no se ha desexcitado por emisión espontánea. Si aparece en las cercanías un fotón con una energía igual a la diferencia de energías entre el nivel excitado y el nivel fundamental (o al que se vaya a desexcitar) se generará otro fotón que será exactamente igual en frecuencia, polarización y dirección de propagación a aquel que lo generó.



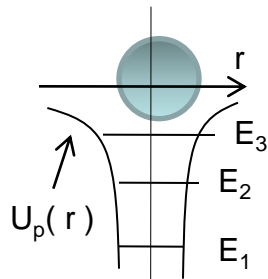
La emisión estimulada Representa la base de funcionamiento del láser. En equilibrio térmico es mucho menos probable que la emisión espontánea.

Las longitudes de onda en las que se generara serán muy similares a las de la emisión espontánea para el mismo material. Sin embargo, no todos los materiales sirven para ser utilizados como láser.

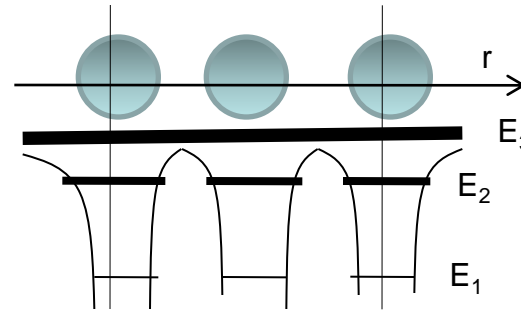
SÓLIDOS



En los sólidos los átomos están muy próximos entre si, de forma que interaccionan fuertemente unos con otros modificando los niveles energéticos.

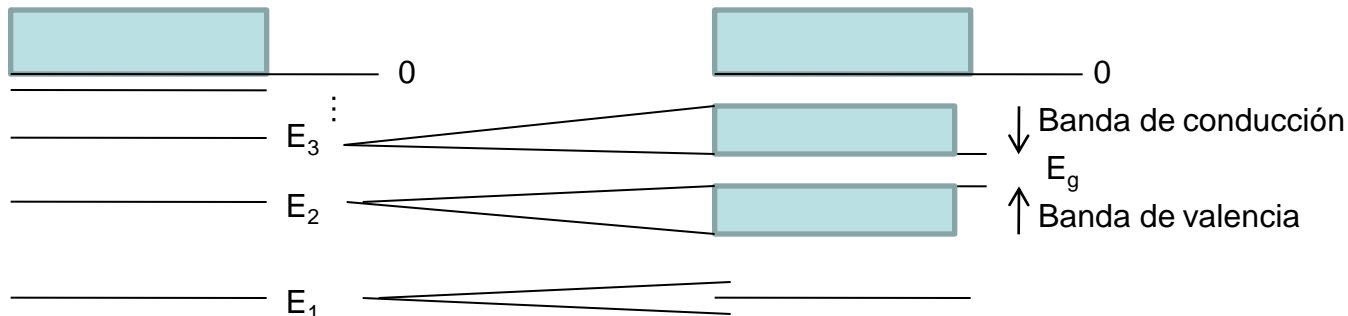


Átomo aislado

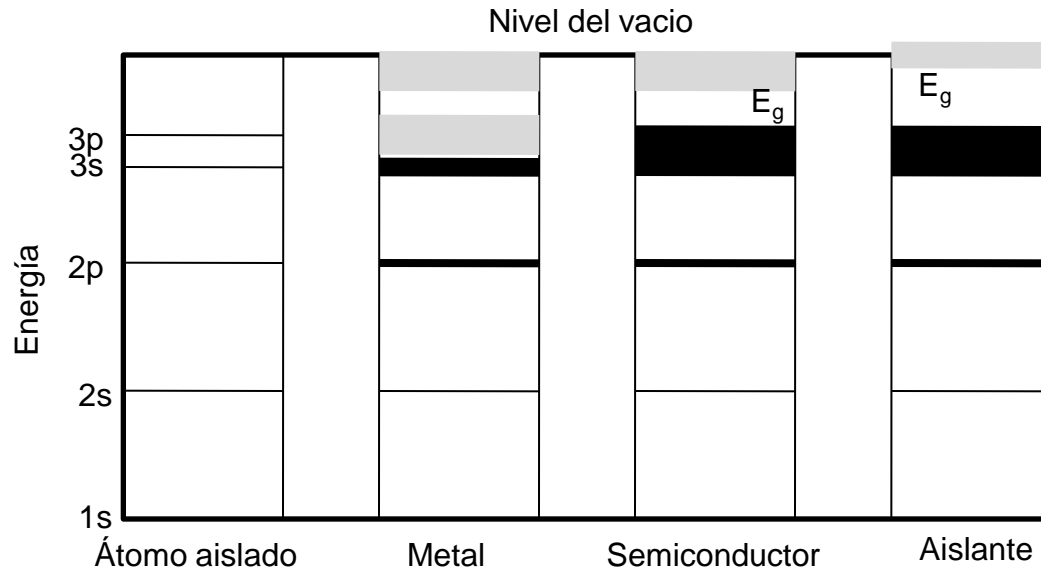


Los e^- se deslocalizan

Agrupación (sólido): la fuerte interacción entre átomos da lugar a la aparición de bandas de energía en lugar de los niveles



TIPOS DE SÓLIDOS



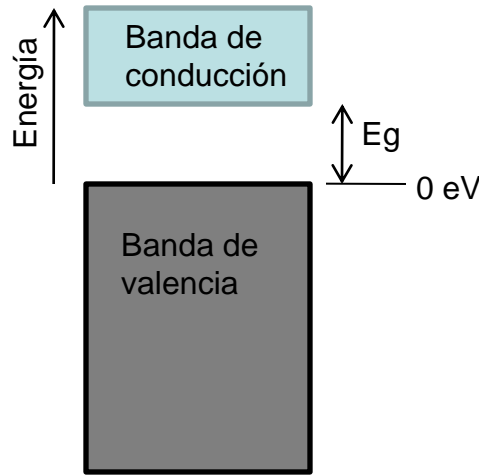
El tipo de material se define por su energía de gap E_g :

muy pequeña para METALES

intermedia para SEMICONDUCTORES (0.1 a 3 eV)

grande para AISLANTES

SEMICONDUCTORES



Si, $E_g = 1.11 \text{ eV}$
GaAs, $E_g = 1.42 \text{ eV}$

Un semiconductor es un sólido, cuya conductividad eléctrica es intermedia entre la de un metal y la de un aislante, pudiendo cambiar con la temperatura, la concentración de impurezas o radiación luminosa.

A $T=0 \text{ }^\circ\text{K}$ la banda de valencia está completamente llena y la de conducción vacía.

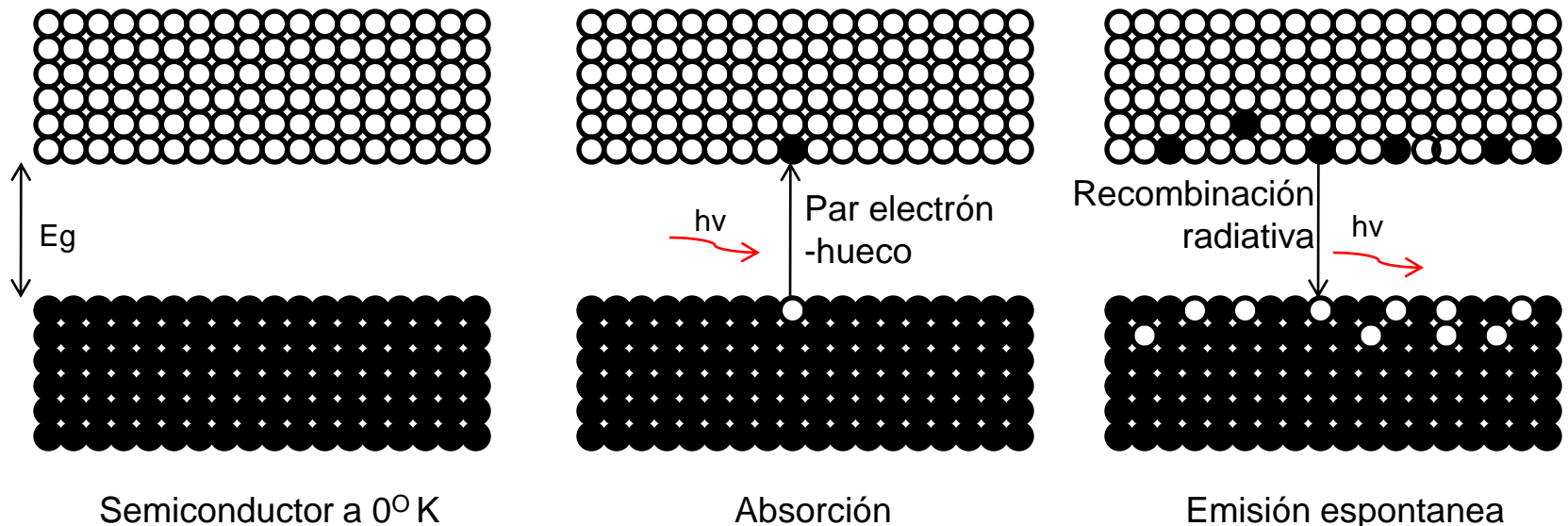
Al aumentar la temperatura pueden saltar electrones a la banda de conducción, que pueden contribuir a corriente eléctrica aplicando una diferencia de potencial.

Dichos electrones dejarán un nivel energético accesible de forma que los electrones de banda de valencia pueden cambiar de estado. La falta de electrón en banda de valencia se comporta como una partícula (hueco).

SEMICONDUCTORES: EMISION Y ABSORCION

La absorción es muy probable en semiconductores intrínsecos. La emisión espontánea es poco probable porque se necesitan tener bastantes niveles energéticos accesibles en banda de valencia. La emisión estimulada es todavía menos probable porque precisa de un nivel de energía determinado.

Las transiciones no radiativas se pueden producir principalmente por: la existencia de defectos en el material, el aporte de energía a vibraciones de la red (fonones) o la existencia de impurezas que aportan niveles intermedios en la región prohibida o gap.



SEMICONDUCTORES INTRINSECOS

Semiconductores intrínsecos: semiconductores que no tienen impurezas.

si N es el numero total de portadores, n el numero de electrones en banda de conducción en equilibrio térmico y p es el numero de huecos en banda de valencia.

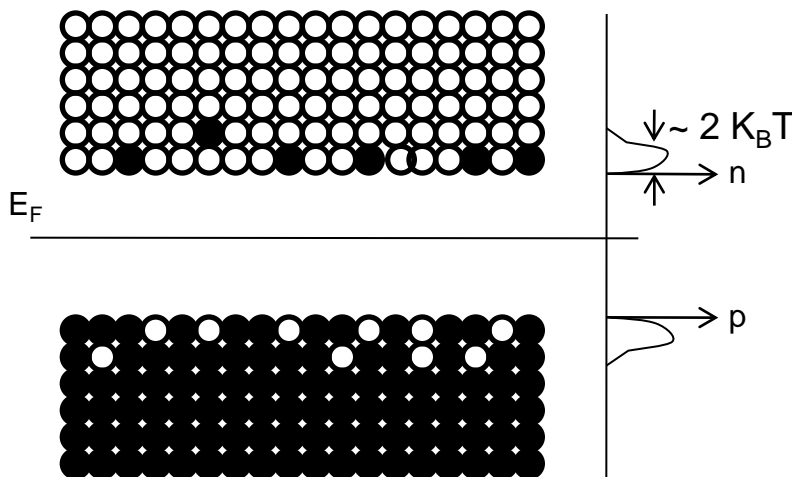
$$n = p = 2 \left(\frac{2\pi k_B T}{h^2} \right)^{3/2} (m_e m_h)^{3/4} e^{-E_g / 2k_B T}$$

- Si $n_i \rightarrow 1.5 \cdot 10^{10}$

- GaAs $n_i \rightarrow 1.8 \cdot 10^6$

Para un semiconductor intrínseco, n es muy pequeño en comparación con N : por unidad de volumen $n \sim 10^{10}$, y N es del orden de 10^{23} . n es dependiente de la temperatura, con lo que, las propiedades electrónicas del material también dependen de este parámetro.

Se puede obtener la probabilidad de que un determinado electrón ocupe un estado de energía E (distribución de Fermi-Dirac)

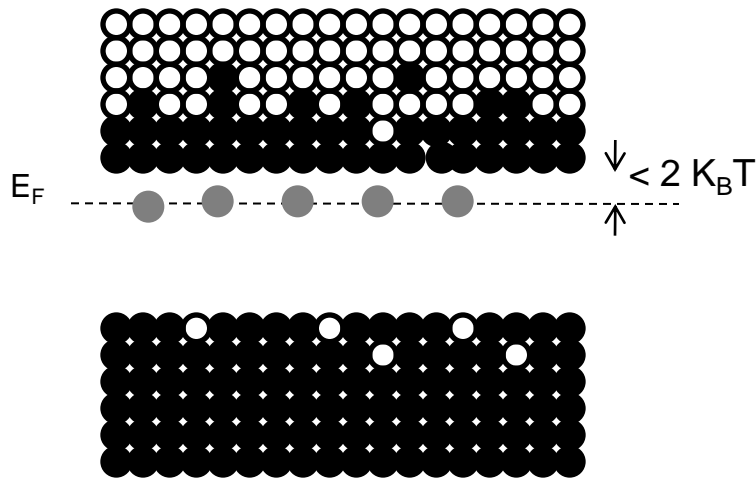


$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E - E_F) / k_B T}}$$

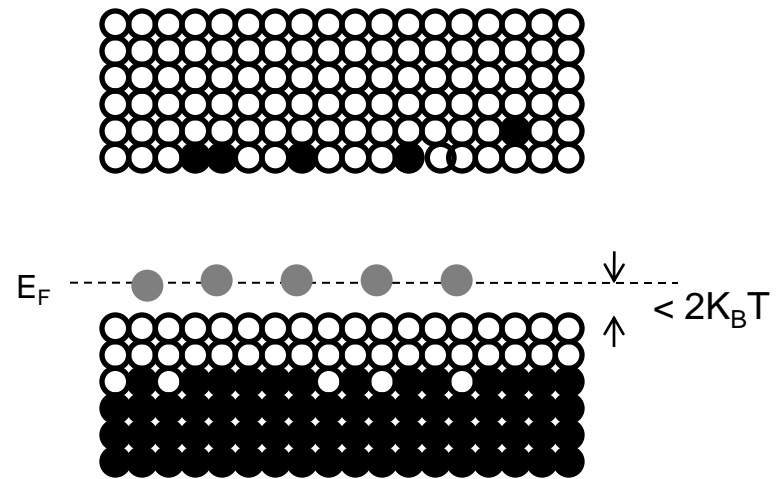
El nivel de Fermi (E_F), representa al nivel energético que, de existir, tendría probabilidad $1/2$ de estar ocupado. Para semiconductores intrínsecos esta en el centro del gap.

SEMICONDUCTORES EXTRINSECOS (DOPADOS)

Es conveniente tener semiconductores en los que: el numero de portadores no dependa tanto de la temperatura y, se pueda ajustar al numero de portadores de acuerdo a las propiedades deseadas para el semiconductor.

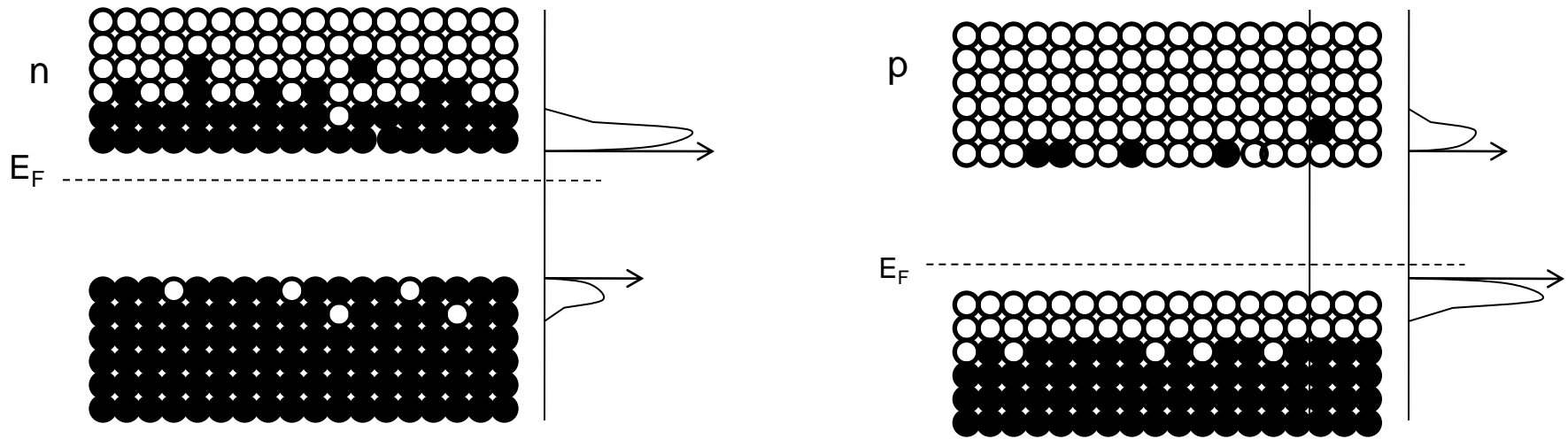


Semiconductor tipo n: se dopa el semiconductor con átomos que tengan un e^- mas en su capa externa que el material intrínseco: donores (P, As). El material extrínseco queda con mas electrones, por lo que si se dopa con n_D donores, el numero de portadores es n_D ($n_D \gg n_i$).



Semiconductor tipo p: se dopa el semiconductor con átomos que tengan un e^- menos en su capa externa que el material intrínseco: aceptores (B, Ga). El material extrínseco queda con mas huecos, por lo que si se dopa con n_A aceptores, el numero de portadores es n_A ($n_A \gg p_i$).

Mientras la concentración de dopantes este por debajo de un valor umbral se puede considerar que: $n \cdot p = n_i^2$ (ley de acción de masas)



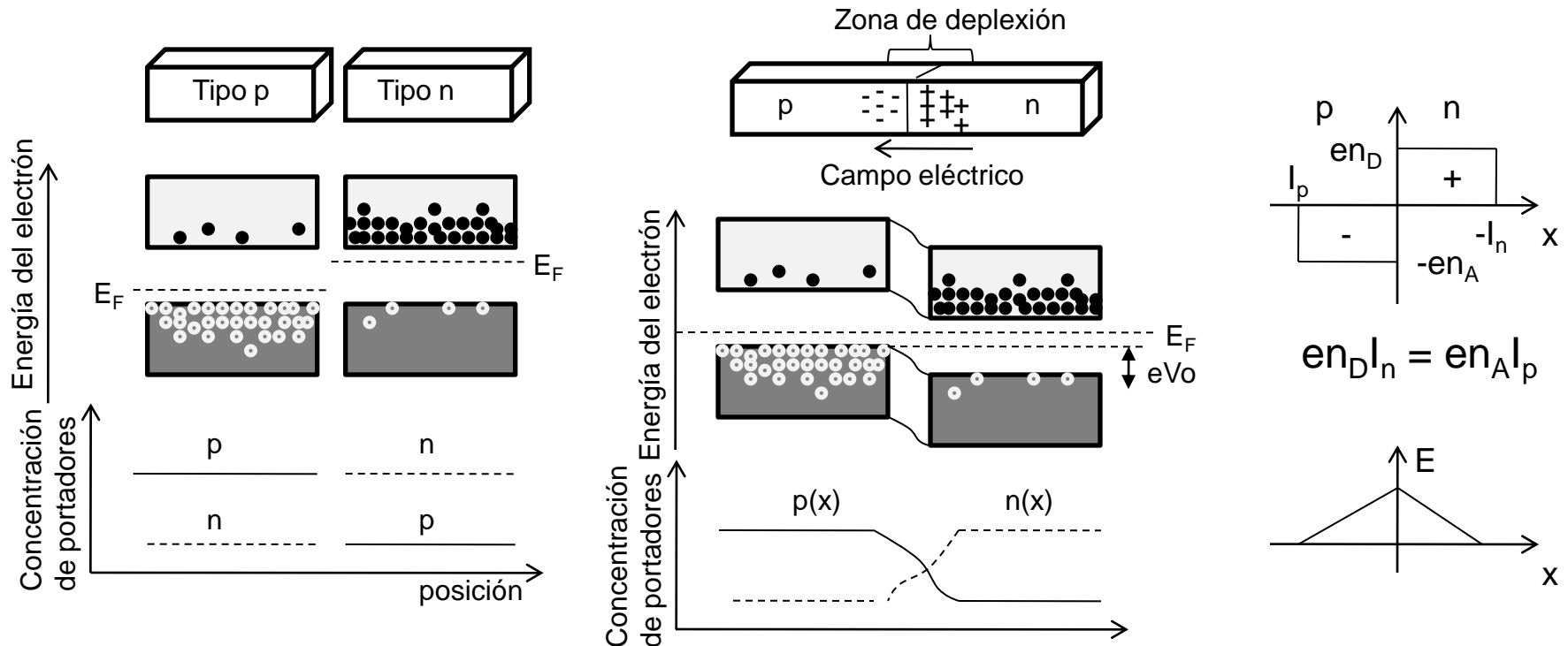
Por lo tanto, para un semiconductor tipo n el numero de electrones en banda de conducción (mayoritarios) es n_D y el numero de huecos en banda de valencia es $p = n_i^2 / n_D$. Para un semiconductor de tipo p es análogo, considerando que los portadores mayoritarios son los huecos.

Si la concentración de dopantes es muy alta, la ley de acción de masas no se cumple. A este tipo de semiconductores se les denomina degenerados.

Los semiconductores extrínsecos no se utilizan tal cual para la realización de dispositivos electroópticos (se utilizan uniones). La unión entre dos semiconductores del mismo tipo pero dopados de forma diferente se llama homounión. Si la unión es entre diferentes semiconductores se llama heterounión.

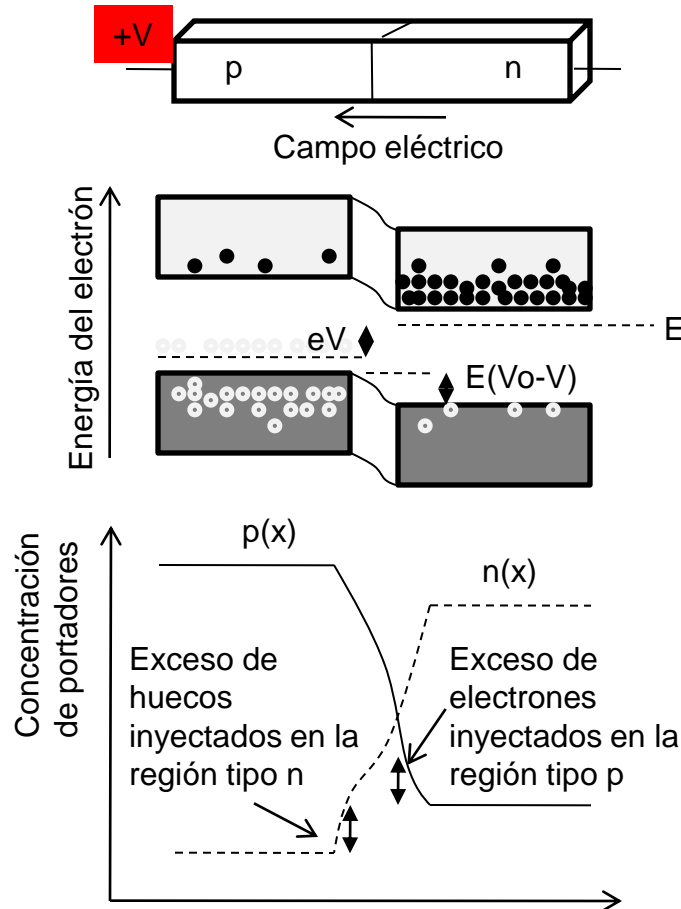
LA UNION P-N

La unión p-n se da entre un semiconductor dopado p y uno dopado n. esta es la base de funcionamiento de emisores y detectores electroópticos.



Cuando la unión p-n llega al equilibrio se modifican las bandas de energía, el nivel de Fermi es continuo, la zona de deplexión queda vacía de portadores móviles y no existe emisión.

UNION P-N POLARIZADA EN DIRECTA



Al polarizar en directa ($p+$, V):

- Disminuye el campo eléctrico en la zona de deplexión, y el tamaño de dicha zona
- Disminuye la barrera de potencial en una cantidad igual a eV
- Aumenta la concentración de mayoritarios en las regiones cerca de la zona de deplexión
- Aparece un flujo de portadores mayoritarios hacia regiones donde son minoritarios (por difusión): inyección de minoritarios
- Hay una gran probabilidad de que se produzcan recombinaciones cerca de la zona de deplexión.

$$I = I_S \left(e^{eV/k_B T} - 1 \right)$$

Comportamiento típico de un diodo

! El numero de recombinaciones (posibles fotones) depende del numero de portadores inyectados!

EFICIENCIA DE INYECCION

La radiación luminosa se produce (en caso de existir), en una región próxima a la zona de deplexión. Es preferible que la radiación se produzca mayoritariamente en uno de los dos lados de la unión. Por lo que hay que potenciar la inyección de uno de los dos tipos de portadores sobre el otro. (si se aumenta la corriente de huecos J_h se produce en zona n y si la de electrones J_e en la zona p).

Eficiencia de inyección de electrones: $\eta_{iny} = \frac{J_e}{J_h + J_e}$

Si $J_h \ll J_e$ ($\eta_{iny} = 1$), de forma que la radiación se produzca de forma mayoritaria en la zona p. Los valores de corriente se obtienen de:

$$J_e = e \sqrt{\frac{D_e}{\tau_p}} \frac{n_i^2}{n_A} (e^{eV/k_B T} - 1) \quad J_h = e \sqrt{\frac{D_h}{\tau_n}} \frac{n_i^2}{n_D} (e^{eV/k_B T} - 1) \quad \text{Por lo tanto:} \quad \frac{J_h}{J_e} = e \sqrt{\frac{D_h \tau_p}{D_e \tau_n}} \frac{n_A}{n_D}$$

D_e coeficiente de difusión de e-
 D_h coeficiente de difusión de h+
 T_p tiempo de vida de e- en zona p
 T_n tiempo de vida de h+ en zona n

Para aumentar J_e sobre J_h se puede actuar sobre el dopaje del material semiconductor.

Para que la radiación se produzca en zona p:

$n_D \gg n_A$ (la unión será n⁺-p)

TIEMPO DE VIDA MEDIA DE LOS PORTADORES

Tiempo de vida medio de portadores minoritarios inyectados (τ), es el tiempo en estado excitado antes de desexcitarse :

$$\Delta n(t) = \Delta n(0)e^{-t/\tau}$$

El tiempo de vida medio depende de las transiciones radiativas y las no radiativas.

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{nr}}$$

Componente radiativa: $\tau_r = \frac{1}{r \cdot n_A}$

Inversamente proporcional a la concentración de mayoritarios en la zona donde se produce la emisión. r es el coeficiente de recombinación radiativa (m^3/s) y depende de cada semiconductor

Componente no radiativa: $\tau_{nr} \approx \frac{10^{14}}{N_{tr}}$

Inversamente proporcional a la concentración de defectos N_{tr} . Para la mayoría de semiconductores es del orden de 10^{21} , por lo que $\tau_{nr} \sim 100 \text{ ns}$

Eficiencia cuántica interna: $\eta_i \approx \frac{\tau}{\tau_r}$

Relación del numero de recombinaciones que dan lugar a radiación frente al total

SEMICONDUCTORES DE GAP DIRECTO E INDIRECTO

Cuando un electrón “cae” de banda de valencia a banda de conducción emitiendo un fotón, se está cumpliendo el principio de conservación de la energía.

A su vez, debe cumplirse el principio de conservación del momento lineal, también llamado impulsión cristalina:

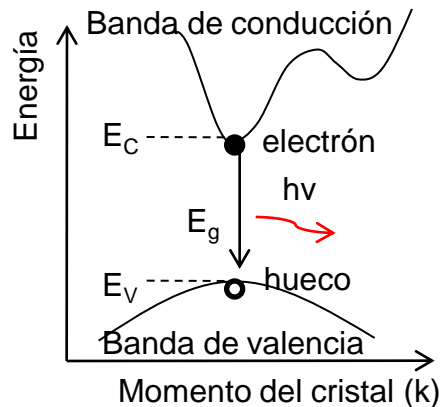
$$\vec{p} = \hbar \vec{k} = m\vec{v}$$

El momento asociado a un fotón es prácticamente nulo, por lo que en su desexcitación un electrón debe conservar prácticamente su momento lineal.

Semiconductores de gap directo: GaAs, $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$

$$r \sim 10^{-16} \text{ m}^3 / \text{s}; \tau_r \sim 100 \text{ ns}; \eta_i \sim 0.5$$

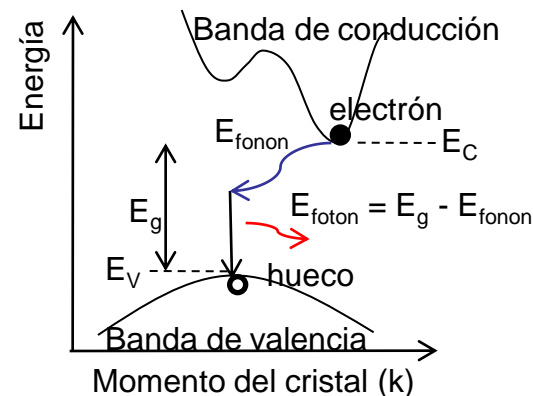
Las transiciones radiativas son muy probables



Semiconductores de gap indirecto: Si, Ge

$$r \sim 10^{-21} \text{ m}^3 / \text{s}; \tau_r \sim 10 \text{ ms}; \eta_i \sim 10^{-5}$$

Se necesita que se produzca a la vez la emisión y que exista un fonón accesible para darle el momento lineal al electrón (lo cual es poco probable).



Estos materiales no se utilizan para emisores.

HETEROUNIONES

La homounión NO es un buen diseño para realizar emisores aplicados a las comunicaciones ópticas, debido a que:

La inyección de portadores es poco efectiva.

No se controla la anchura de la zona de deplexión, que depende del dopaje de los materiales.

Los fotones generados se van a propagar en un medio que es fuertemente absorbente.

La heterounión es una estructura que resuelve estos problemas.

heterounión: es la unión de dos semiconductores diferentes con distintas propiedades (energía de gap, permitividad, etc.). La única condición que deben cumplir es que la constante de red de ambos materiales debe ser similar para que las heterouniones sean tecnológicamente realizables.

Los tipos de heterouniones que se pueden realizar son:

n-N, p-P; uniones óhmicas (resistivas)

n-P, p-N; uniones p-n como las vistas pero con diferentes características

HETEROUNION p-n con dos materiales diferentes: un material tipo n de “gap” pequeño y un material tipo p de “gap” grande.

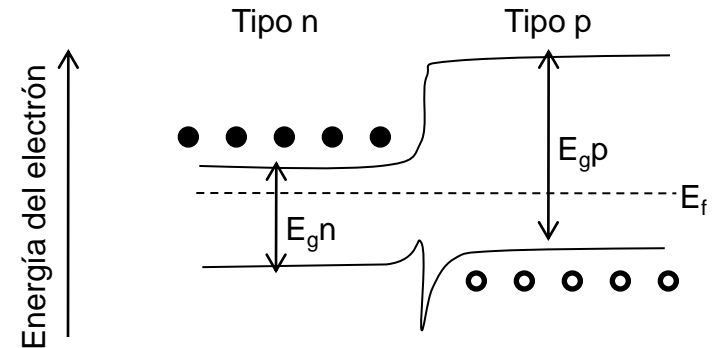
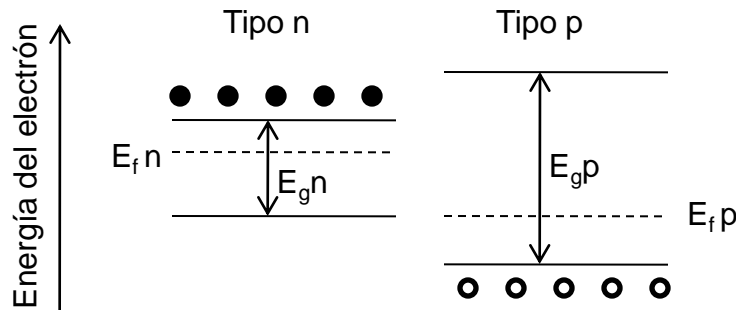


Diagrama del nivel de energía para los semiconductores aislados

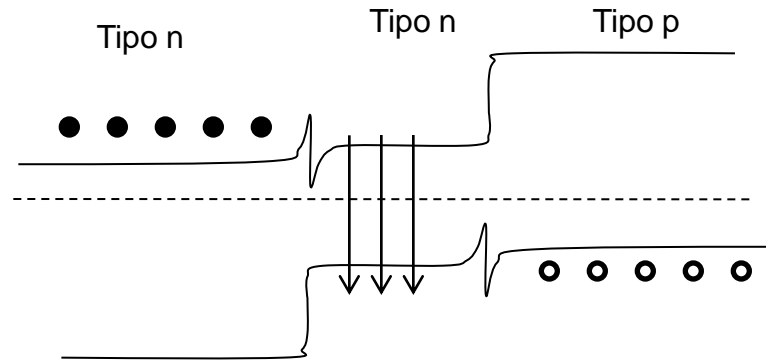
Diagrama del nivel de energía para la heterounión n-p

Propiedades importantes de heteroestructuras para la construcción de fuentes de luz

1. La barrera del flujo de electrones es mucho mayor que la barrera del flujo de huecos. Con lo que, para una polarización directa modesta, los huecos fluirán en el material tipo n, pero los electrones no fluirán en el material tipo p.
2. La constante dieléctrica, ϵ (y por lo tanto, el índice refractivo, $n = (\mu\epsilon)^{1/2}$) es mayor en la región de “gap” pequeño que en la región de gap grande. Esto da la posibilidad de crear una guía de onda dieléctrica.
3. La luz generada en el material 1 tiene una energía de gap menor que en el material 2. Así, la luz generada en el material 1 no es absorbida en el material 2.

DOBLE HETEROUNION

La doble heteroestructura se realiza con una doble unión N-p-P, o, N-n-P. A las capas de gap mas elevado se denominan capas confinantes y a la de menor gap capa activa.



Mejora de los contactos con el uso de las capas exteriores (una de ellas hará de sustrato).

Elevada eficiencia de inyección. No solo debido a la mejora por la heterounión, sino por el efecto añadido de confinamiento de portadores en la región activa que alcanza una elevada densidad, potenciando los efectos de recombinación y, por lo tanto, emisión con menores corrientes.

Aparición de un perfil de índices en la región activa (el índice de refracción es inversamente proporcional al gap), lo que confina en cierto modo la luz en la zona activa.

Los fotones generados en capa activa no son absorbidos por las capas confinantes debido a que el gap es distinto y no se producen efectos de absorción. Esto mejora la potencia final emitida de la estructura.

DOBLE HETEROUNION

Los emisores suelen realizarse con una doble heteroestructura mas dos capas exteriores utilizados para contactos óhmicos: n-N-p-P-p.

p- GaAs	contacto
P- AlGaAs	confinamiento
p- GaAs	Capa activa
N- AlGaAs	confinamiento
n- GaAs	contacto

MATERIALES SEMICONDUCTORES PARA EMISORES

Los semiconductores de gap indirecto (Si, Ge) no sirven. Los de gap directo suelen ser combinaciones binarias, terciarias e incluso cuaternarias de elementos III-V de la tabla periódica: Al, Ga, As, In, P para formar InP, GaAs (sustratos), AlGaAs, InGaAsP, etc.

Para formar heteroestructuras hace falta que las capas puedan juntarse.

