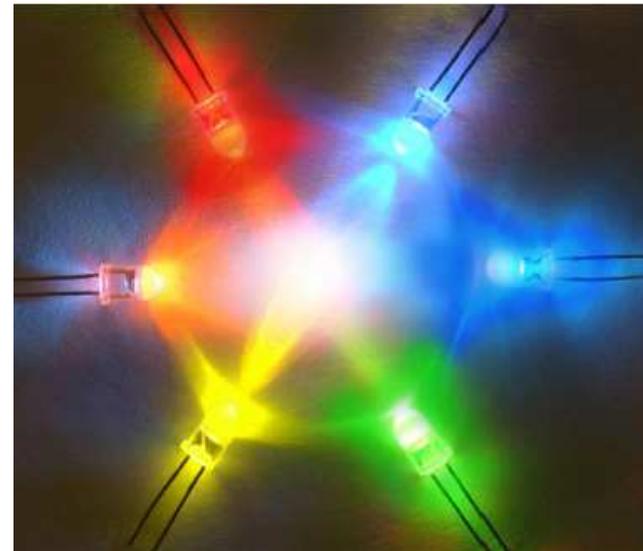


# Diodos Emisores de Luz (LED)

1. Introducción
2. Portadores y uniones *pn*
3. Luminiscencia por inyección
4. Materiales LED
5. Recombinación
6. Recombinación no-radiativa
7. Procesos de Recombinación radiativa
8. Eficiencia
9. Estructura de LEDs
10. Tiempos de respuesta
11. Circuitos para operación de LEDs
12. LEDs en una cavidad
13. Visión Humana
14. LEDs para iluminación
15. LEDs Orgánicos (OLED)



# 1

## Introducción

### LED

emisión espontánea

sin cavidad

incoherente

multimodo

anchura de línea grande

barato, fiable

output lineal  modulación

### LÁSER

emisión estimulada

necesita cavidad y espejos

coherente

1 modo

pequeño

degradación

no lineal, pero anchura de banda pequeña

# Aplicaciones de LEDs

- Comunicación óptica
- Pantallas
- Iluminación (color o luz blanca):
  - semiconductores
  - semiconductores con fósforos

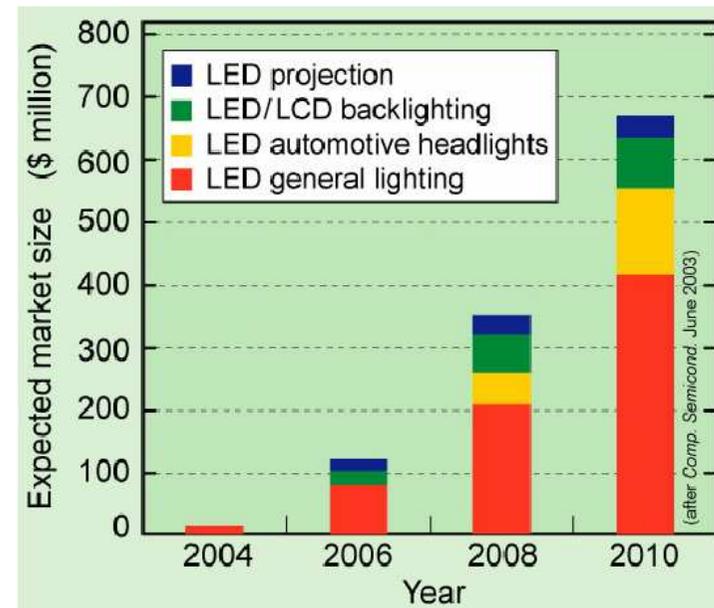


# Aplicaciones de LEDs

Desarrollo nuevo en:

- LEDs de alta potencia
- LEDs en cavidades resonantes
- LEDs de emisión azul/verde
- LEDs Orgánicos (OLED)

Previsión de la expansión del mercado de Iluminación por LED



## Emisión del primer LED

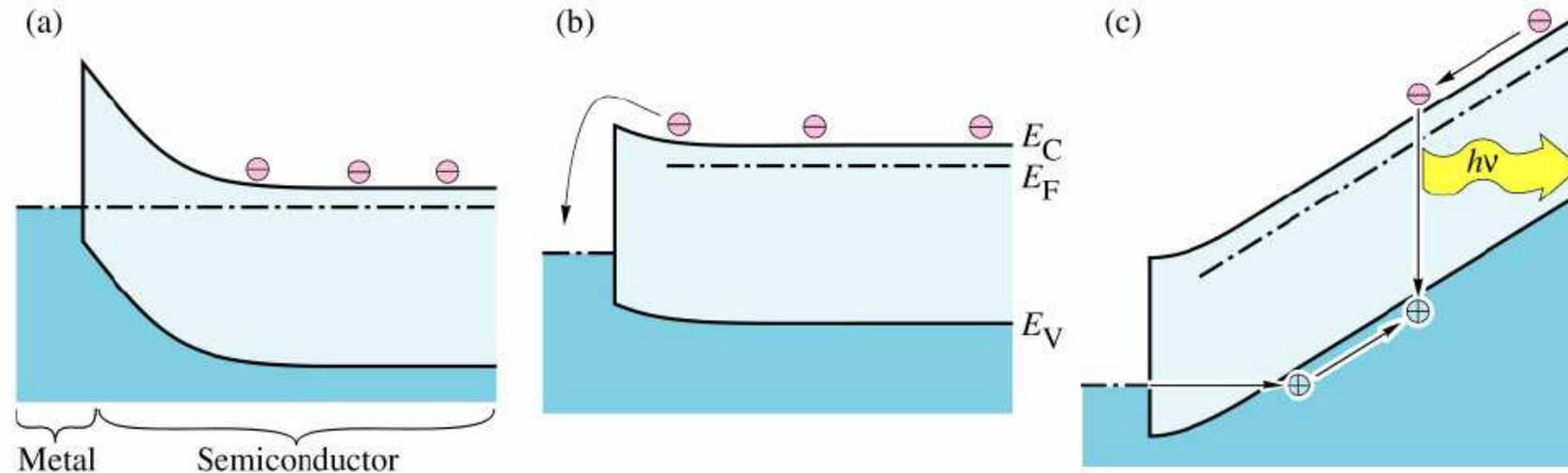


Fig. 1.2. Band diagram of Schottky diode under (a) equilibrium conditions, (b) forward bias, and (c) strong forward bias. Under strong forward bias, minority carrier injection occurs making possible near-bandgap light emission.

Emisión de un diodo Schottky de SiC en 1907

## 2. Portadores y Unión pn

### Distribución de portadores

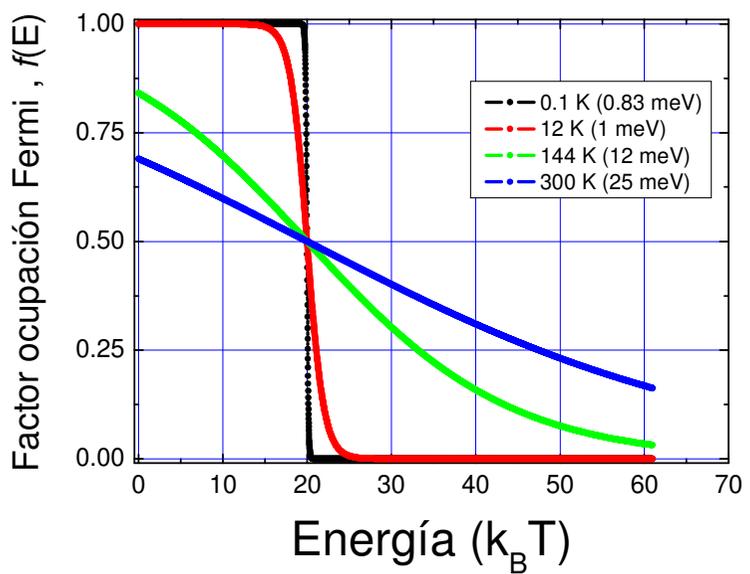
#### Mecánica estadística en semiconductores

Los electrones en equilibrio térmico se distribuyen según estadística de Fermi-Dirac

$$f_e(E, T) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E-\mu}{k_B T}}}$$

con  $\mu$  el potencial químico y  $k_B$  la cte. de Boltzman, [ $\mu \equiv E_F$ ]  
 ( $k_B T = 25 \text{ meV @ } 300 \text{ K}$ )

**Fermiones, Principio de Exclusión de Pauli**



$\mu$ , energía para la que ocupación = 1/2

A T=0, f  $\equiv$  función escalera

Para huecos:

$$f_h(E, T) = 1 - \frac{1}{1 + e^{\frac{E-\mu}{k_B T}}} = \frac{e^{\frac{E-\mu}{k_B T}}}{1 + e^{\frac{E-\mu}{k_B T}}} = \frac{1}{1 + e^{\frac{-(E-\mu)}{k_B T}}}$$

Energías hacia abajo

# Distribución de portadores

## Mecánica estadística en semiconductores

Para energías mucho mayores que  $\mu$ , la distribución se comporta como Maxwell-Boltzmann:

$$f_{M-B}(E, T) = A e^{-\frac{E}{k_B T}}, \quad \text{con} \quad A = e^{\frac{\mu}{k_B T}}$$

Probabilidades de ocupación bajas  poca influencia P<sup>po</sup> Exclusión de Pauli

La posición de  $\mu$  ( $E_F$ ) depende de N<sup>o</sup> e's, N, y de distribución en energía de estados disponibles

El n<sup>o</sup> de e's por unidad de intervalo de energía es:

$$n(E) = f(E, T)g(E), \quad \text{con } g(E) \text{ la densidad de estados}$$

Con lo que el número total de e's:  $N = \int f(E, T)g(E) dE$

y  $\mu$  es como un parámetro de normalización para dar N correcto

Para una densidad de estados parabólica y a T = 0 K:

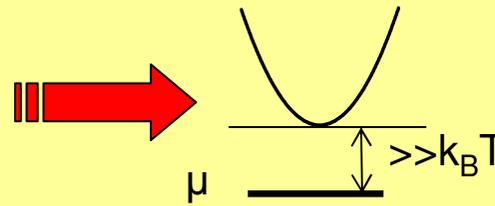
$$N = \int_0^{E_F} \frac{1}{2\pi^2} \left( \frac{2m^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} E^{1/2} dE = \frac{1}{3\pi^2} \left( \frac{2m^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} E_F^{3/2} \quad \longrightarrow \quad E_F = = \frac{\hbar^2}{2m^*} (3\pi^2 N)^{2/3}$$

# Distribución de portadores

## Mecánica estadística en semiconductores

### Estadísticas degeneradas y no-degeneradas

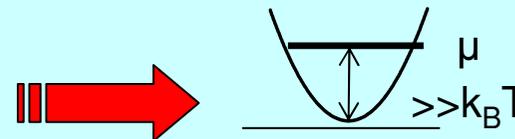
Muy pocos e's  
probabilidad de ocupación a T finita  $\ll 1$   
aproximación de **Maxwell-Boltzmann**



**no-degenerada**

$> 2k_B T$  dentro del gap

Muchos e's  
probabilidad de ocupación de algunos estados  $\sim 1$   
Estadística de **Fermi-Dirac**



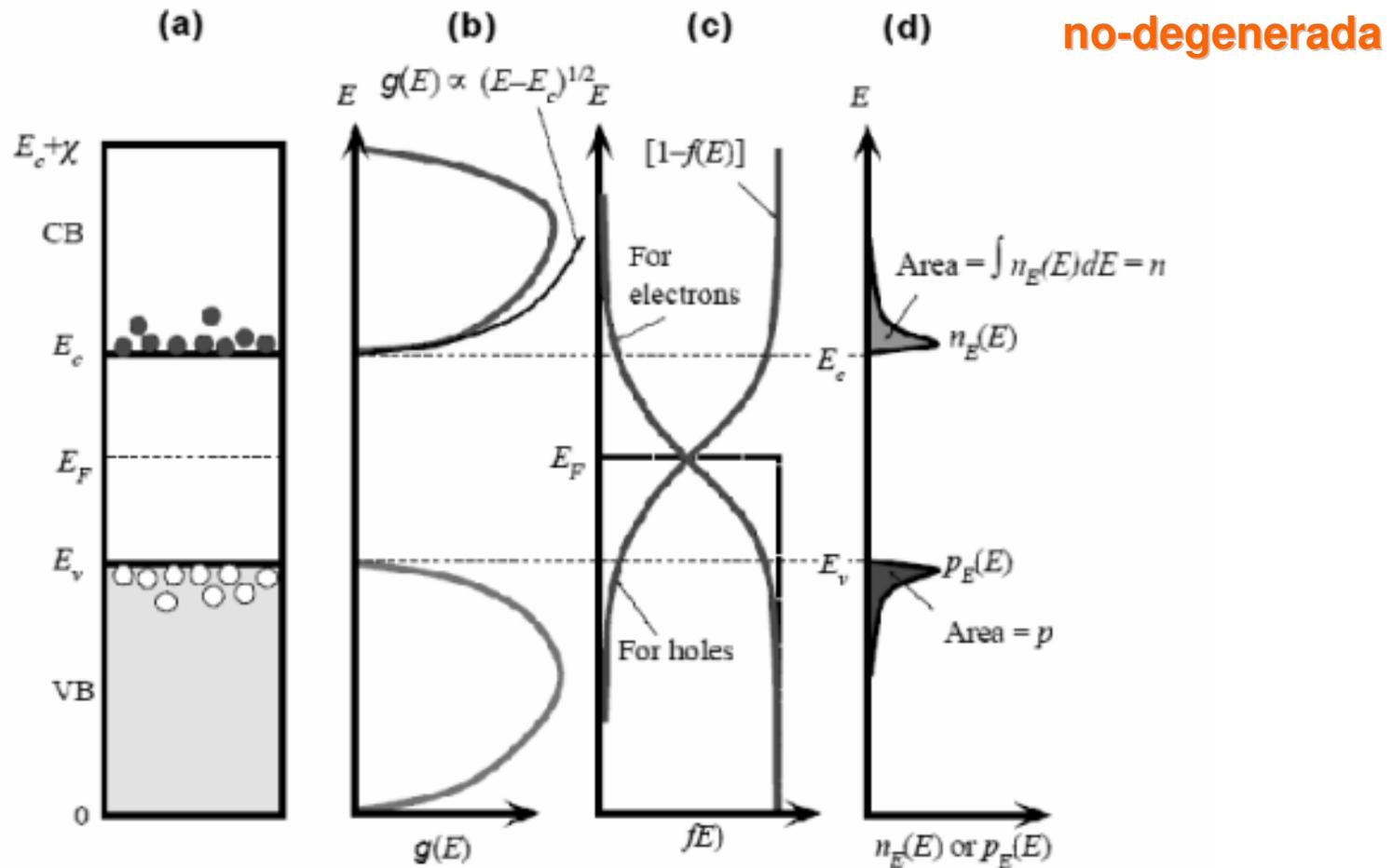
**degenerada**

Incluso a  $T \neq 0$ :

$$E_F = \frac{\hbar^2}{2m^*} (3\pi^2 N)^{2/3}$$

$> 4k_B T$  dentro de la banda

# Portadores, diagrama de energía



no-degenerada

DOS  
densidad de  
estados  $g(E)$

Distribución  
Fermi-Dirac

Densidad de energía de los  
electrones =  $f(E)g(E)$  (BC)

# Ley de acción de masas

## Mecánica estadística en semiconductores

Si uno de los siguientes criterios se cumple:

- Masa efectiva grande
- Concentración de portadores pequeña
- Alta temperatura



Válida **estadística no-degenerada**

Usando un mismo nivel de referencia de energías para BC y BV y mismo convenio de signos:

$$p \cong N_v e^{-\frac{E_{Fh}}{k_B T}} \quad n \cong N_c e^{-\frac{E_{Fe} - E_g}{k_B T}}$$

Por lo que:

$$np = n_i^2$$

Con  $n_i = \sqrt{N_c N_v} e^{-E_g/2k_B T}$

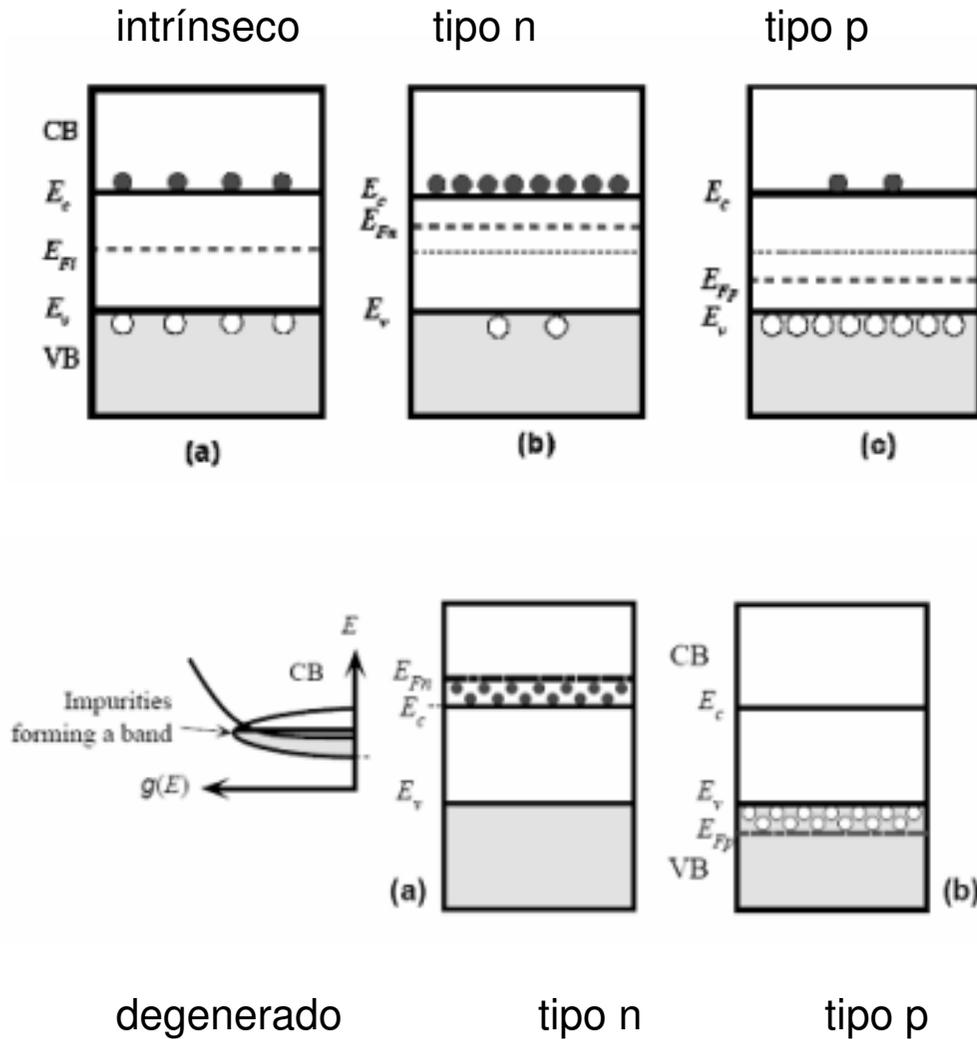
**Sin dopaje (intrínseco)**  
**el nº de e's y h's debe ser el mismo**

$n_i$ (cm <sup>-3</sup> )	0° C	50° C
Si	1.04x10 <sup>9</sup>	7.06x10 <sup>10</sup>
GaAs	1.02x10 <sup>5</sup>	2.18x10 <sup>7</sup>

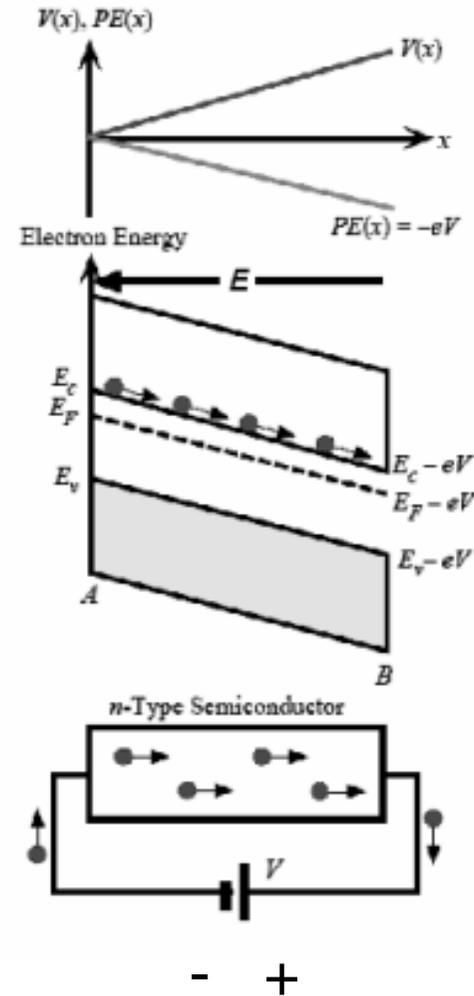
$$E_F = \frac{E_g}{2} + \frac{k_B T}{2} \log\left(\frac{N_c}{N_v}\right) = \frac{E_g}{2} + \frac{3k_B T}{4} \log\left(\frac{m_h^*}{m_e^*}\right)$$

**en (intrínseco)**  
**E<sub>F</sub> cerca del medio del gap**

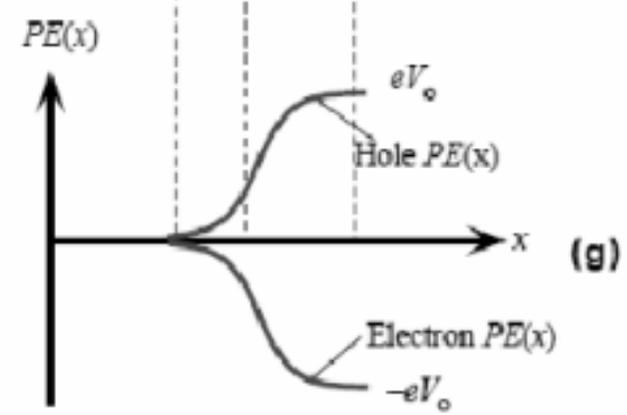
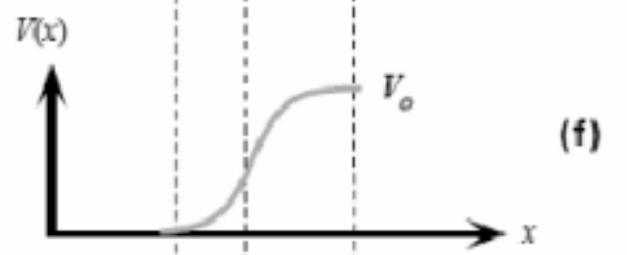
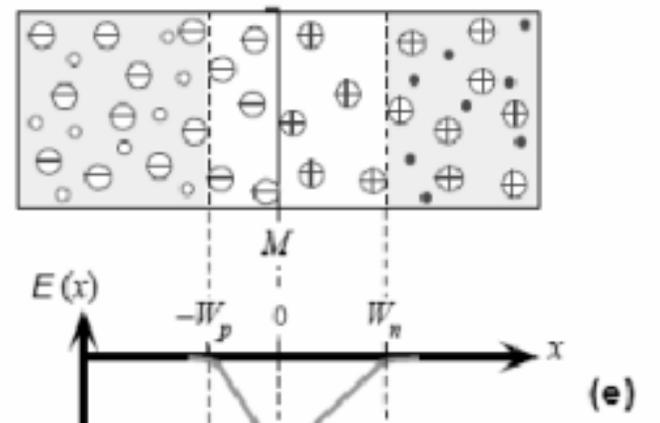
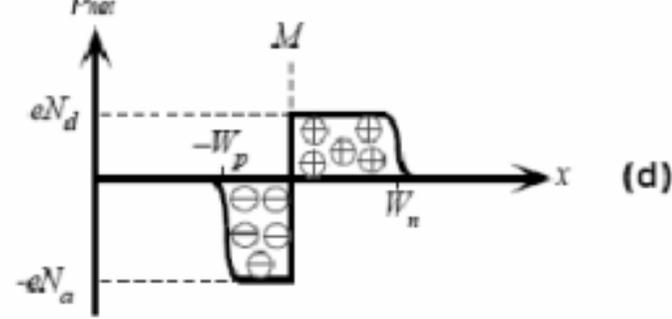
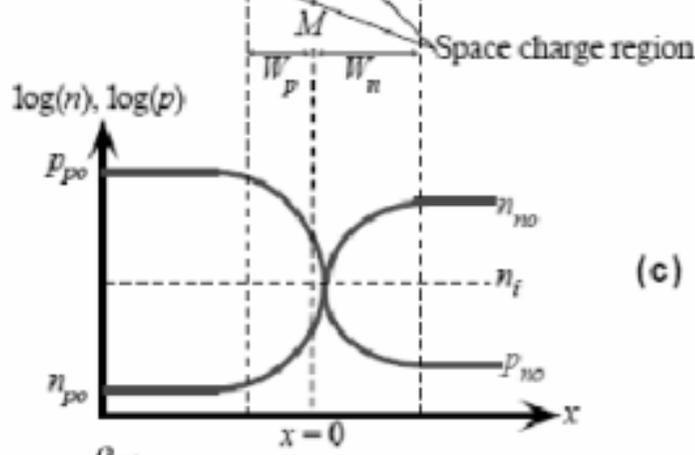
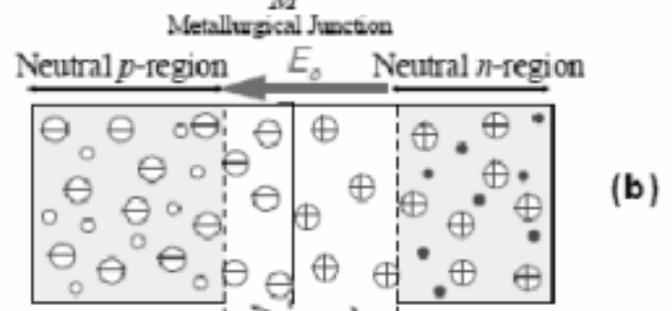
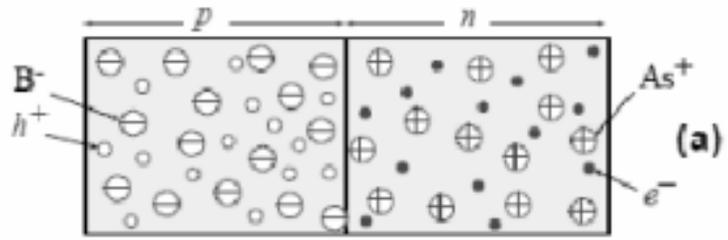
# Bandas de energía



$E_F$



# Unión $pn$



*'built-in potential'*

# Unión pn

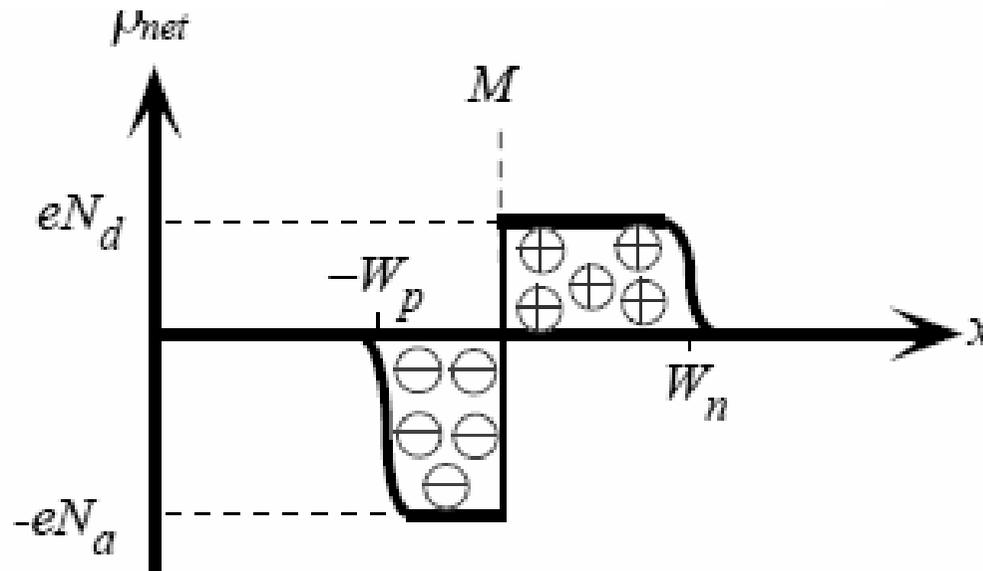
$N_A$  concentración de aceptores  
 $N_D$  concentración de donores

$$N_a W_p = N_d W_n$$

$$W_o = W_n + W_p$$

$$E_o = -\frac{eN_d W_n}{\epsilon} = -\frac{eN_a W_p}{\epsilon}$$

$$V_o = -\frac{1}{2} E_o W_o = -\frac{eN_a N_d W_o^2}{2\epsilon(N_a + N_d)}$$



<http://materials.usask.ca/samples/PNJunctionDevices.pdf>

# Unión pn

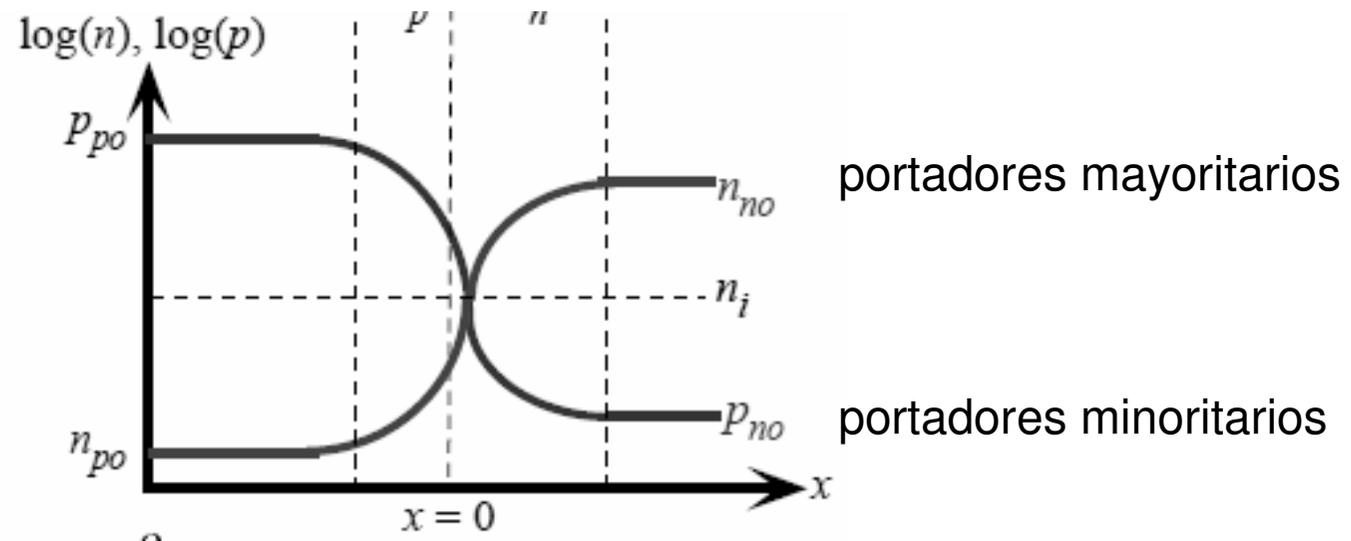
$$n_{po}/n_{no} = \exp(-eV_o/k_B T)$$

$$p_{no}/p_{po} = \exp(-eV_o/k_B T)$$

$$V_o = \frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{n_{no}}{n_{po}}\right)$$

and

$$V_o = \frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{p_{po}}{p_{no}}\right)$$

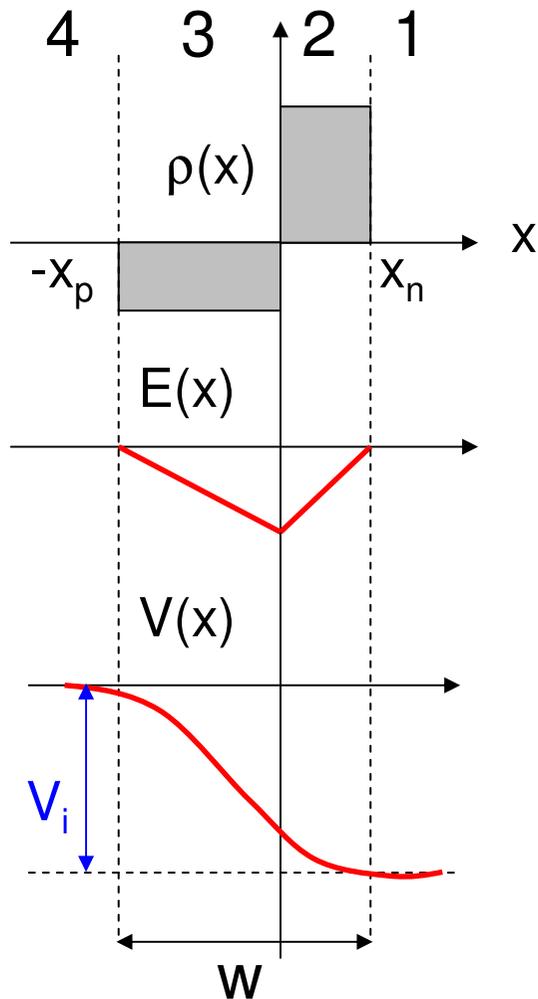


$$n_i^2/n_{no} = n_i^2/N_d$$

$$n_i^2 = (N_c N_v) \exp(-E_g/k_B T)$$

$$V_o = \frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right)$$

# Electrostática de la unión p-n



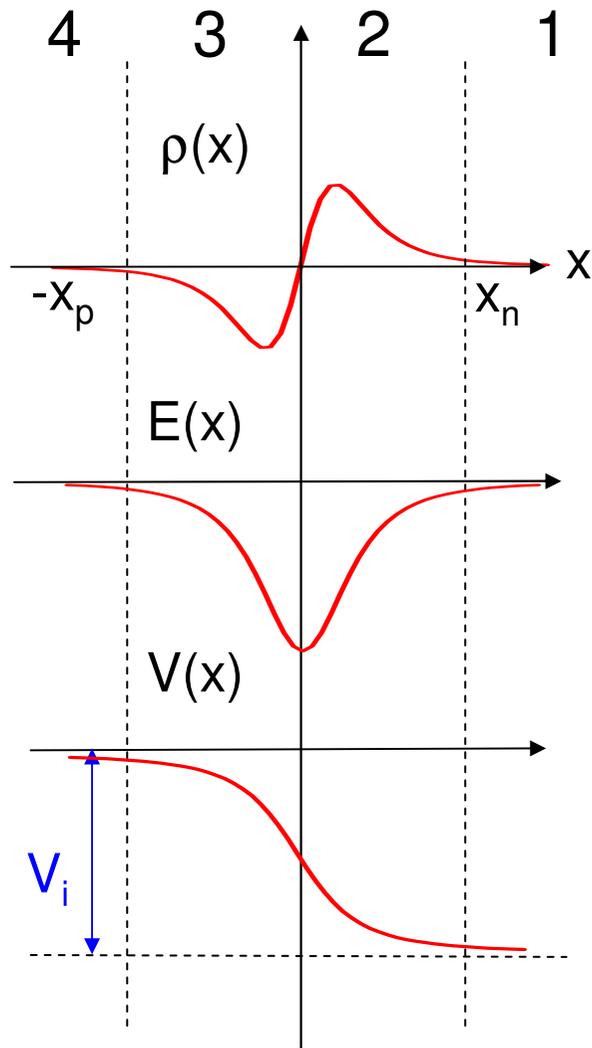
$$V_4 = 0$$

$$V_3 = \frac{qN_A}{2\epsilon} (x + x_p)^2$$

$$V_2 = \frac{qN_D}{2\epsilon} (-x^2 + 2xx_n + \frac{N_D}{N_A} x_n^2)$$

$$V_1 = \frac{qN_D}{2\epsilon} x_n^2 + \frac{qN_A}{2\epsilon} x_p^2 = V_i$$

# Electrostática de la unión p-n



Union real (LPE)

$$\rho(x) = \frac{3\epsilon_0 V a^2}{2(a^2 + x^2)^{5/2}} x$$

$$E(x) = -\frac{V a^2}{2(a^2 + x^2)^{3/2}}$$

$$V(x) = \frac{V}{2} \left( 1 - \frac{x}{(a^2 + x^2)^{1/2}} \right)$$

# Transporte

$N_A$  concentración de aceptores  
 $N_D$  concentración de donores

conductividad:  $\sigma = qn\mu_e + qp\mu_h$

## Drift

corriente ohmica: (*drift*)

movilidad= velocidad de *drift* promedio  
por unidad de campo

$$\mu_e = \frac{\bar{v}_D}{E} = -\frac{q\tau_e}{m_e}$$

## Difusión

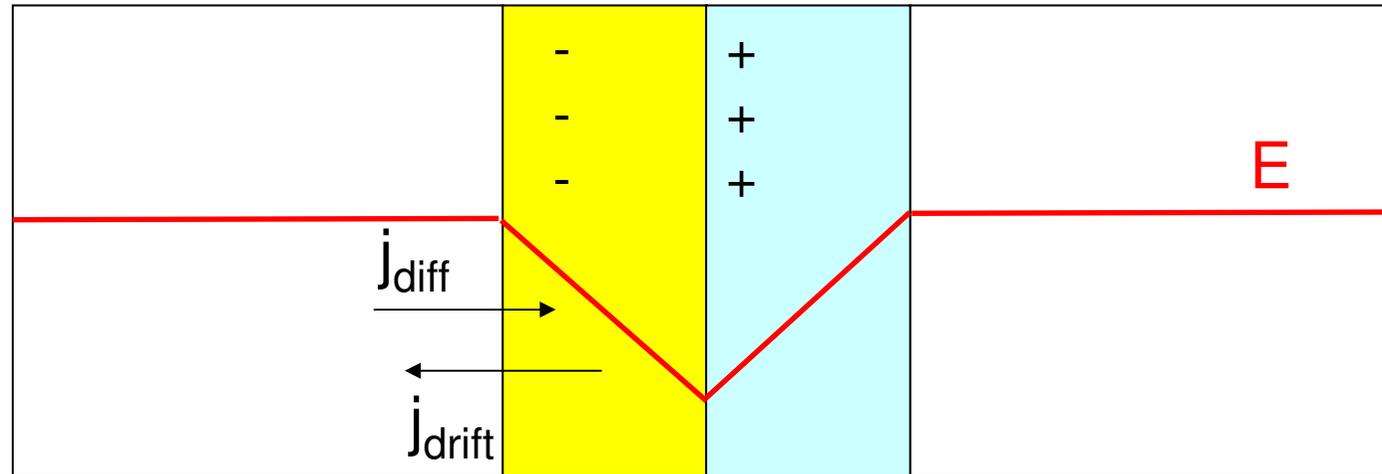
difusión:

$D_e$  (electrones)  $D_h$  (huecos)

relación de Einstein

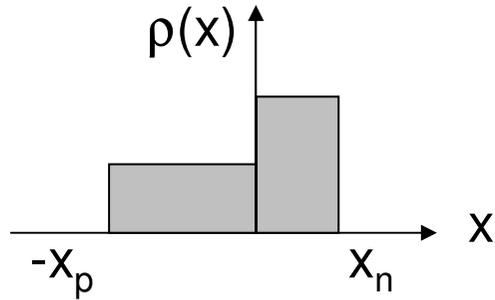
$$\left| \frac{D_{e,h}}{\mu_{e,h}} \right| = \frac{k_B T}{q}$$

## Electrostática de la unión p-n



$$j = j_{drift} + j_{diff} = q \left( n \mu E + D \frac{dn}{dx} \right) = 0$$

# Anchura de la zona de vaciado



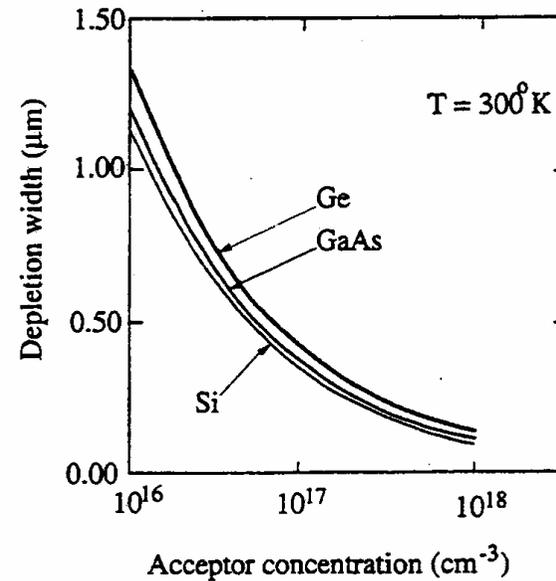
= depletion layer  
= space charge layer (SCL)

$$\left. \begin{aligned} E(0) &= \frac{qN_D}{\epsilon} x_n = \frac{qN_A}{\epsilon} x_p \\ |V_i| &= \frac{q}{2\epsilon} (N_A x_p^2 + N_D x_n^2) = \frac{E(0)}{2} (x_n + x_p) \end{aligned} \right\}$$

$$W = x_n + x_p = \left[ \frac{2\epsilon}{q} \left( \frac{1}{N_D} + \frac{1}{N_A} \right) |V_i| \right]^{1/2}$$

$$N_D \gg N_A \Rightarrow W = \left[ \frac{2\epsilon}{qN_A} |V_i| \right]^{1/2}$$

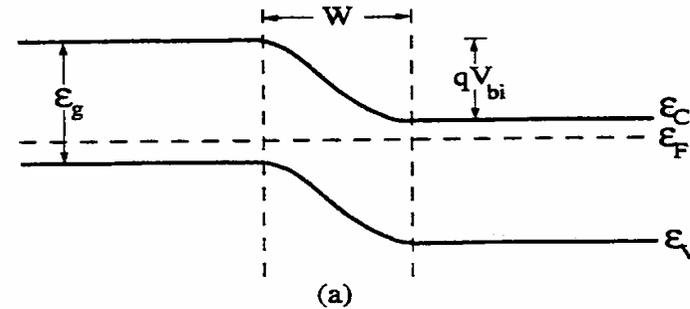
Manda el dopaje residual



# Polarización

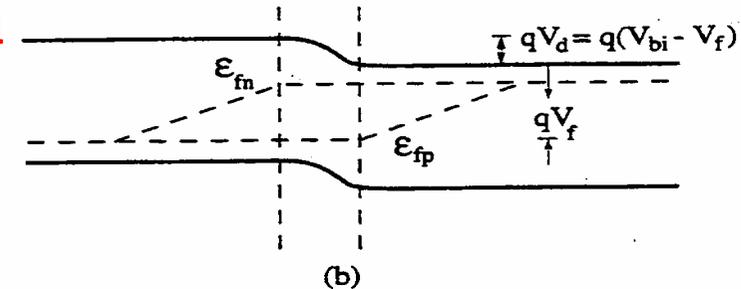
## Sin polarizar

Nivel de Fermi igual  
en todo el material



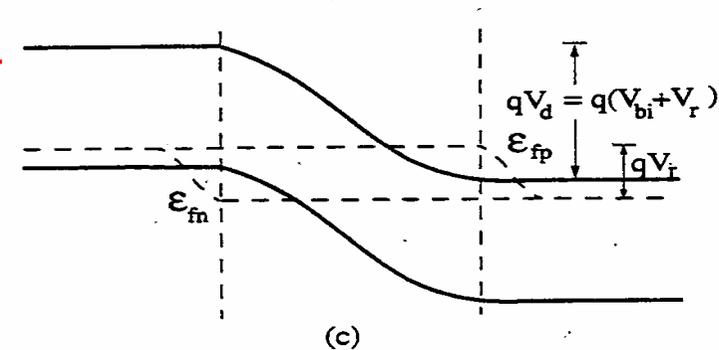
## Polarización directa

(forward bias)



## Polarización inversa

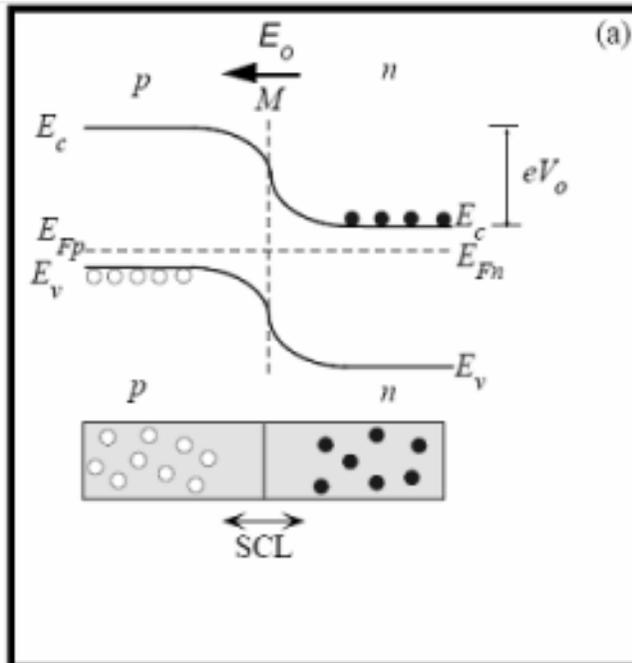
(reverse bias)



Polarización:  $V_i \Rightarrow V_i - V$

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} (V_i - V) \left( \frac{1}{N_D} + \frac{1}{N_A} \right)}$$

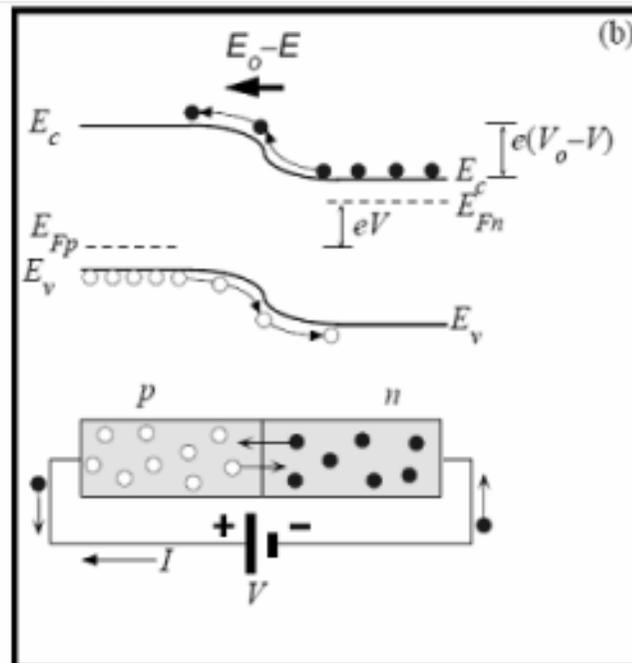
circuito  
abierto



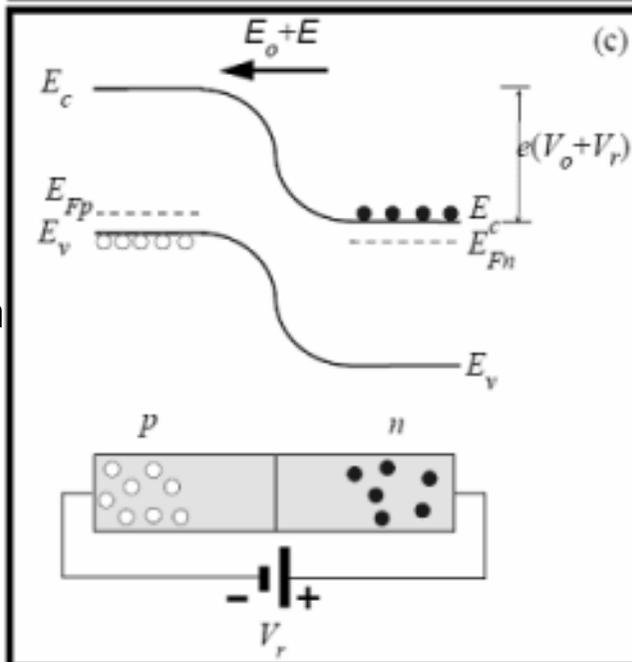
Boltzmann  

$$e^{-e(V_0-V)/k_B T}$$

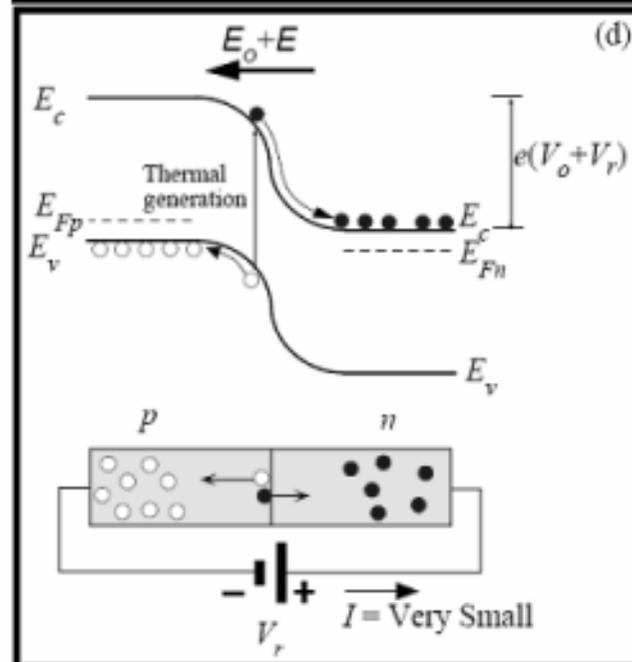
polarización  
directa



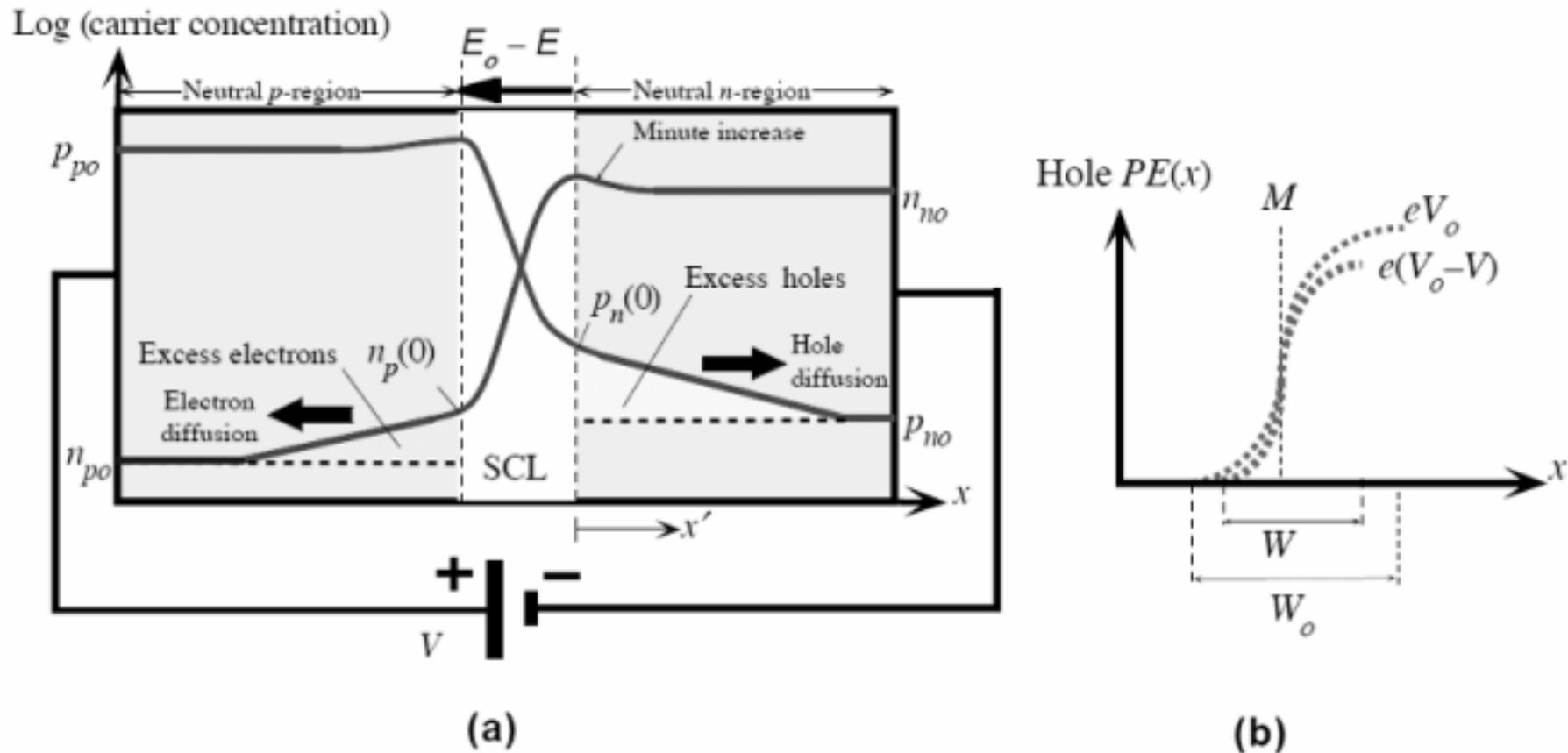
polarización  
inversa



generación  
térmica de  
portadores

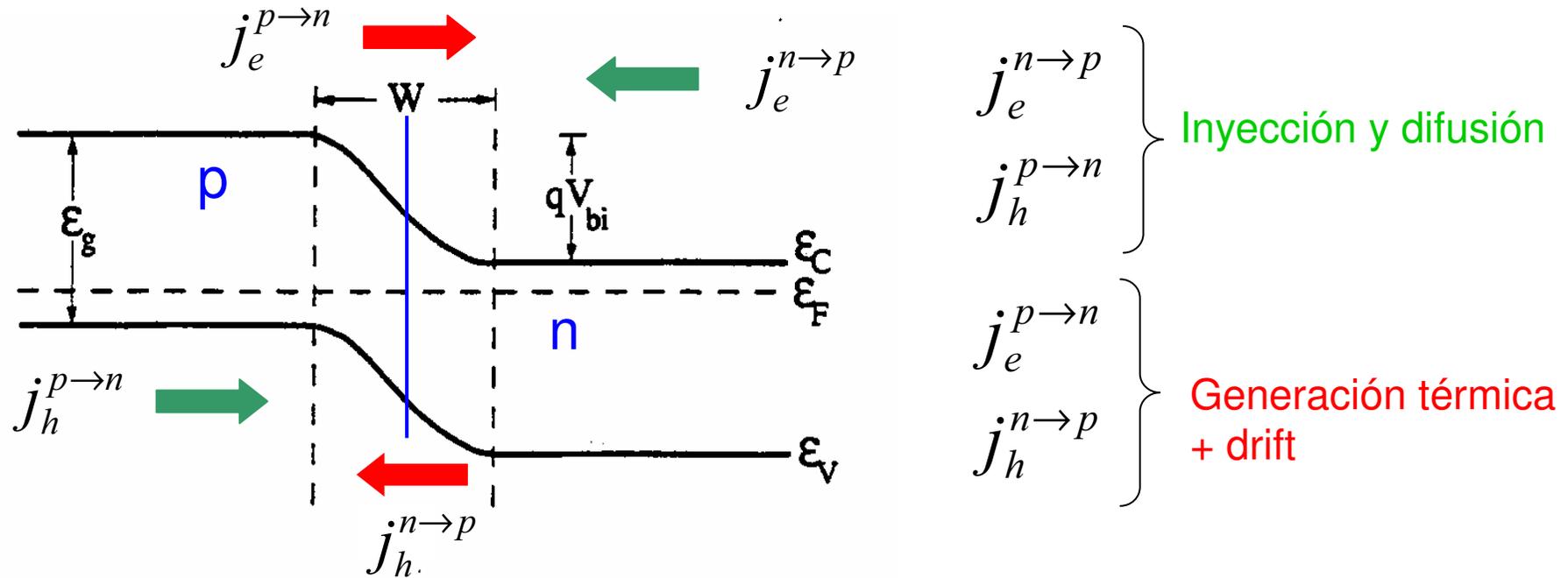


## Polarización directa



Forward biased  $pn$  junction and the injection of minority carriers (a) Carrier concentration profiles across the device under forward bias. (b). The hole potential energy with and without an applied bias.  $W$  is the width of the SCL with forward bias

## Corrientes a través de la unión p-n



Corriente ohmica

$$\vec{E} \neq 0 \Rightarrow J_{dr} = qn\mu E$$

Corriente de difusión

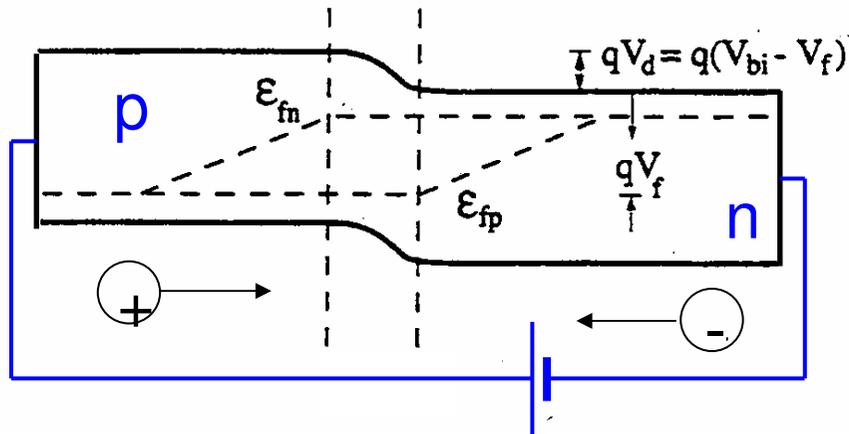
$$\frac{\partial n}{\partial x} \neq 0 \Rightarrow J_{diff} = qD \frac{d(\partial n)}{dx}$$

Equilibrio:

$$j_e^{p \rightarrow n} = j_e^{n \rightarrow p} \qquad j_h^{p \rightarrow n} = j_h^{n \rightarrow p}$$

# Corrientes a través de la unión p-n

## Polarización directa

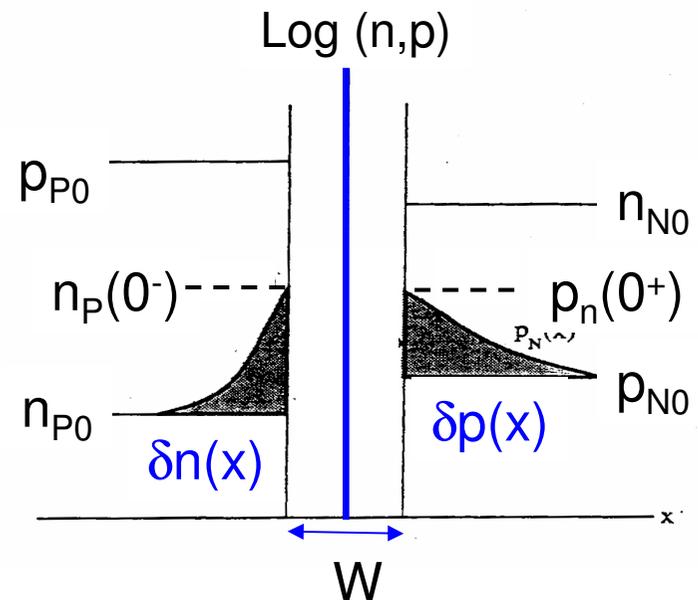


$$D_{e,h} = \frac{\mu_{e,h} k_B T}{q}$$

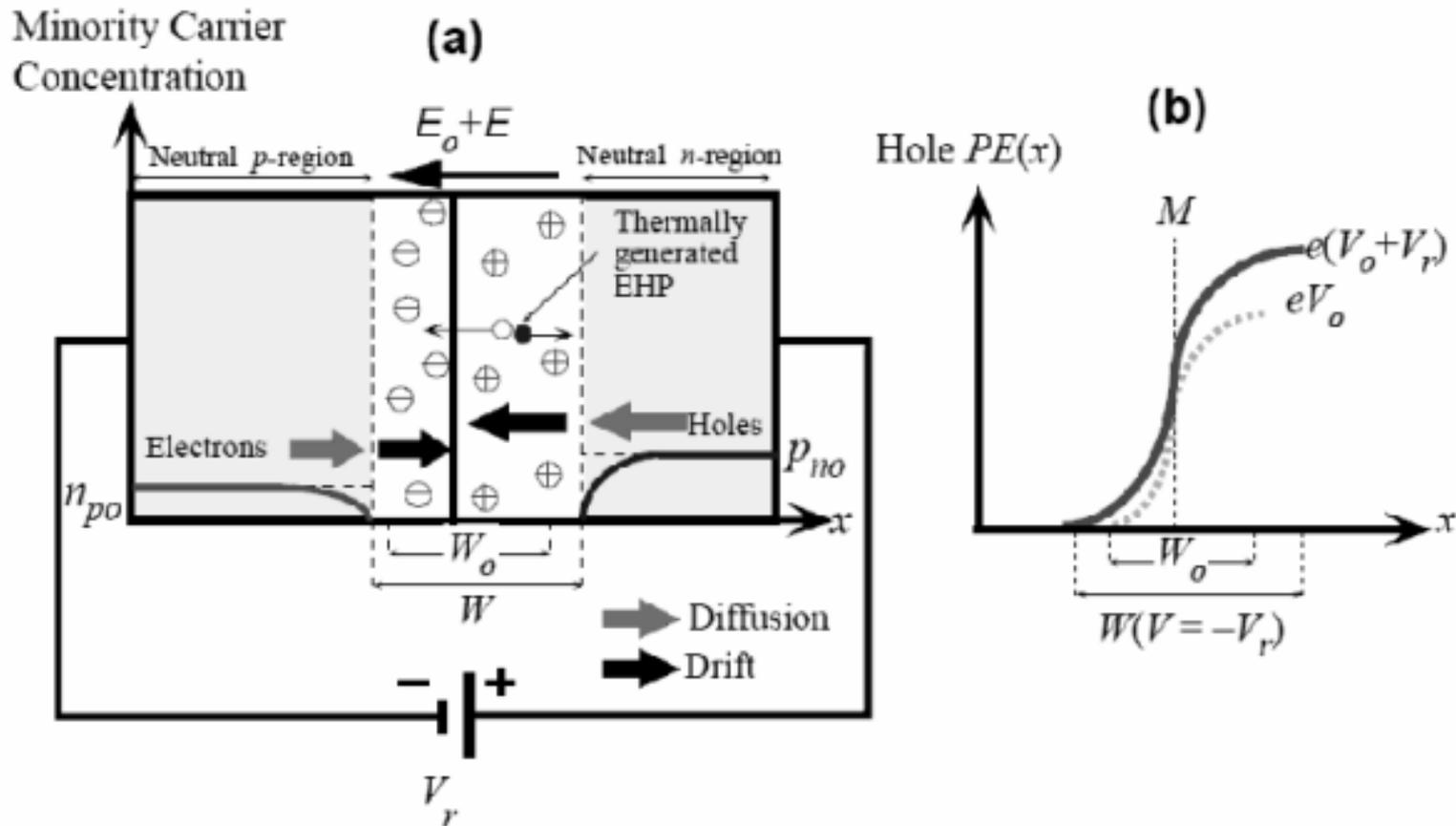
$$L_{e,h} = \sqrt{\tau_{e,h} D_{e,h}}$$

Longitud de difusión

$$j = q \left( \frac{D_h p_{N0}}{L_h} + \frac{D_e n_{P0}}{L_e} \right) \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$



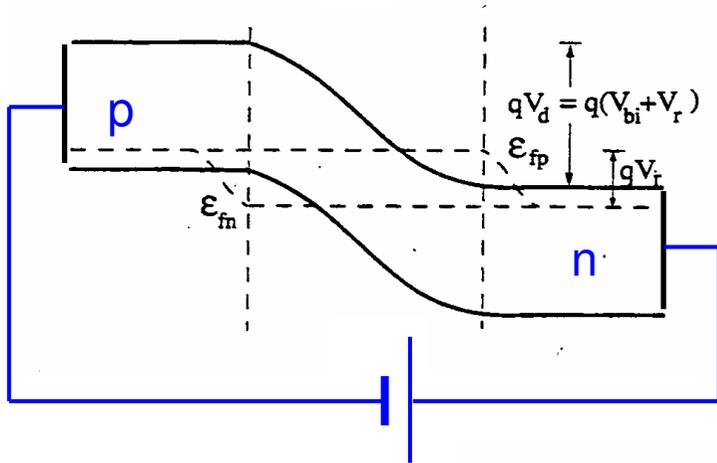
## Polarización inversa



Reverse biased  $pn$  junction. (a) Minority carrier profiles and the origin of the reverse current. (b) Hole  $PE$  across the junction under reverse bias

# Electrostática de la unión p-n

## Polarización inversa



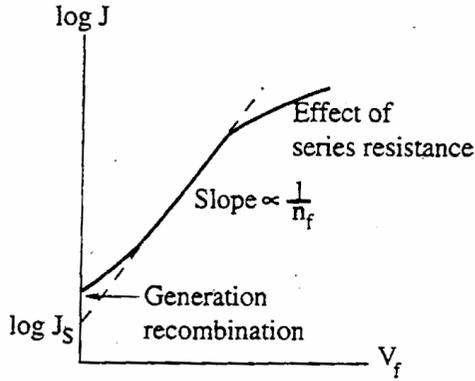
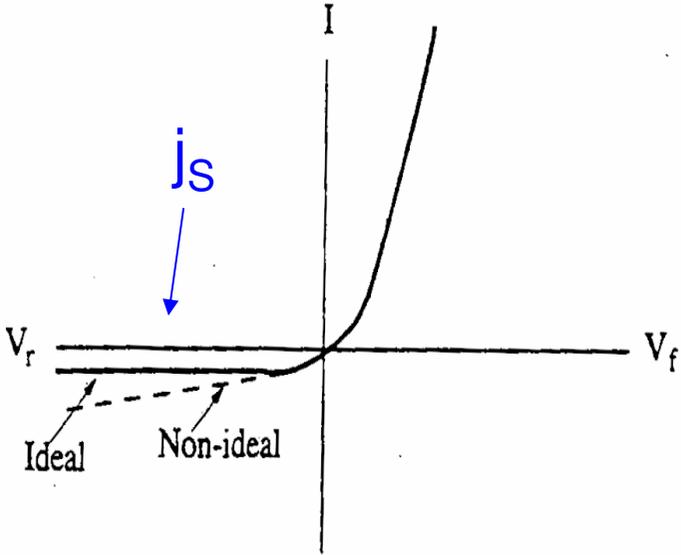
$$V \rightarrow -V \Rightarrow e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \rightarrow e^{-\frac{qV}{kT}} - 1 \approx -1$$

$$j \approx -q \left( \frac{D_h p_{N0}}{L_h} + \frac{D_e n_{P0}}{L_e} \right) = j_s$$

En general:

$$j = j_s \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

$V > \text{meV}$

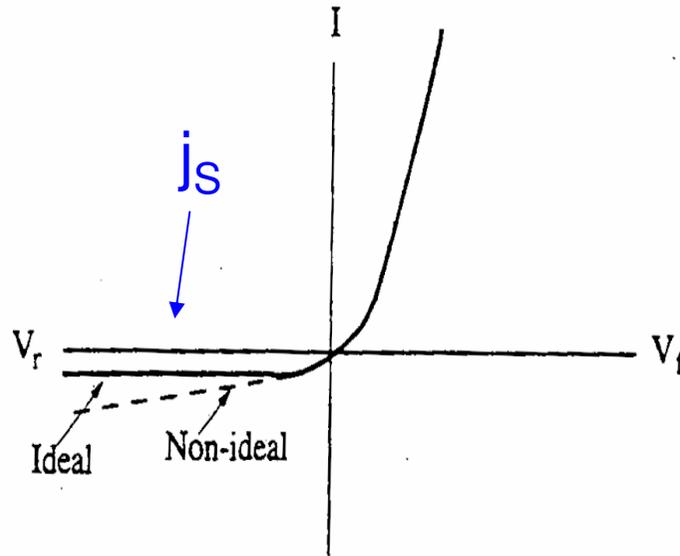


$$j = j_s e^{\frac{qV}{kT} \eta_f}$$

## Ecuación del diodo

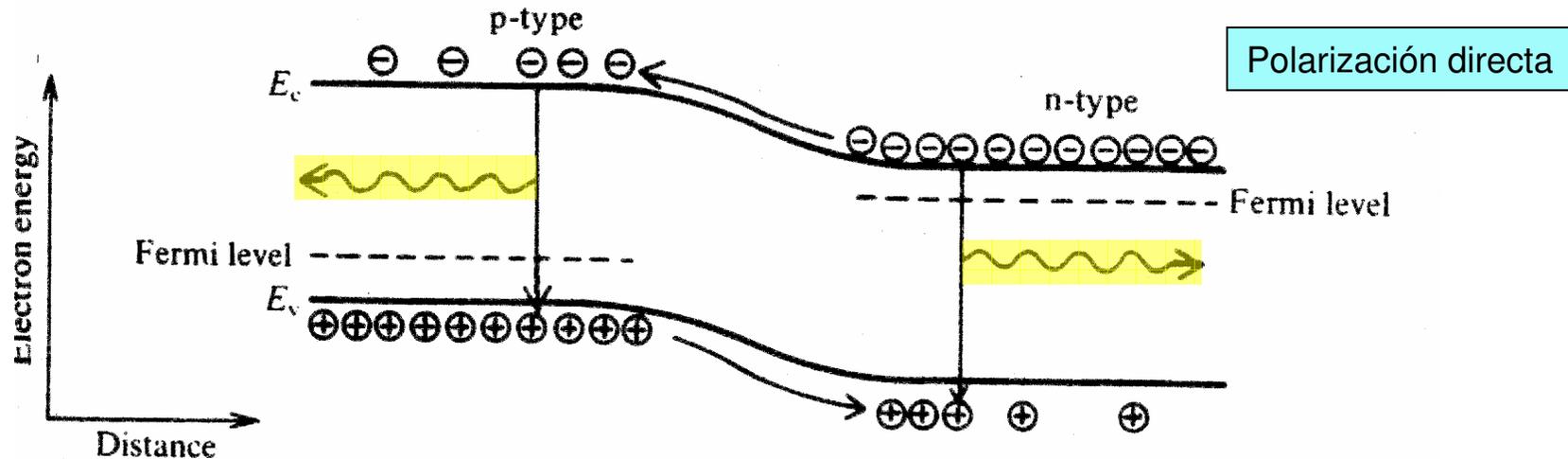
En general:

$$j = j_s \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$



### 3

## Luminiscencia por inyección



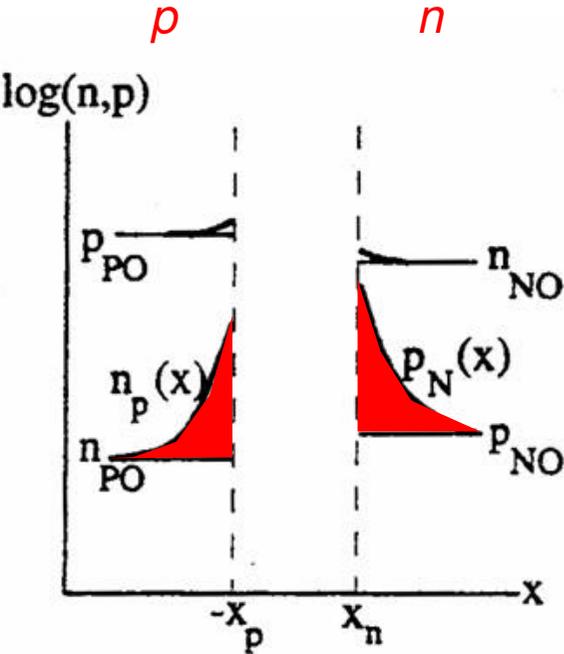
Inyección de portadores minoritarios  
Recombinación radiativa

$$\lambda_g = hc / E_g$$

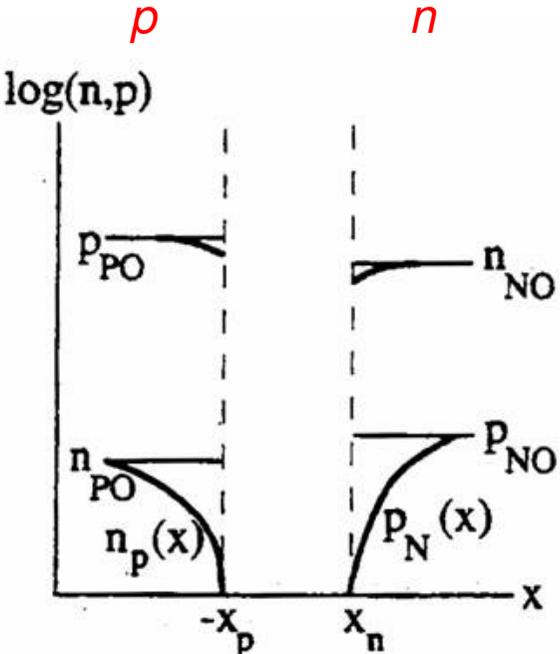
$$hc / \lambda_g = E_c - E_v = E_g$$

# Densidad de portadores

Polarización Directa



Inversa



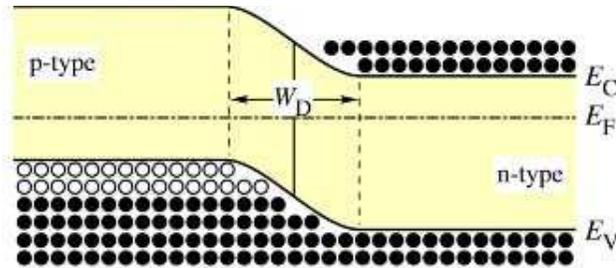
Portadores Mayoritarios

Portadores minoritarios

# Homouniones y heterouniones

Homounión

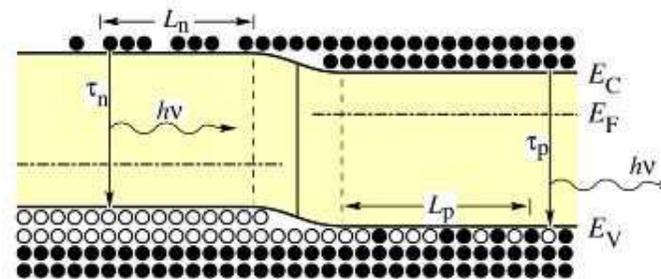
(a)  
Homojunction  
under zero bias



Sin Polarizar

Homounión

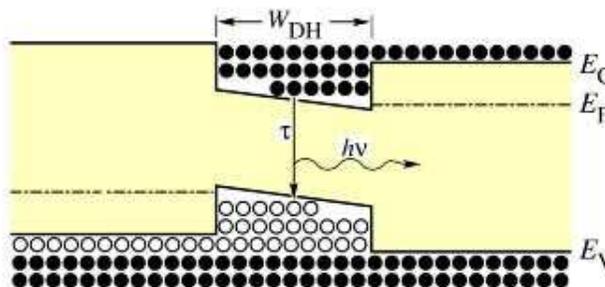
(b)  
Homojunction  
under forward bias



Polarización directa

Heterounión  
doble

(c)  
Heterojunction  
under forward bias



Polarización directa

Fig. 3.5. PN homojunction under (a) zero and (b) forward bias, and (c) heterojunction under forward bias. In homojunctions, carriers diffuse over the diffusion lengths  $L_n$  and  $L_p$  before recombining. In heterojunctions, carriers are confined by the heterjunction barriers.

## 4 Materiales para LEDs

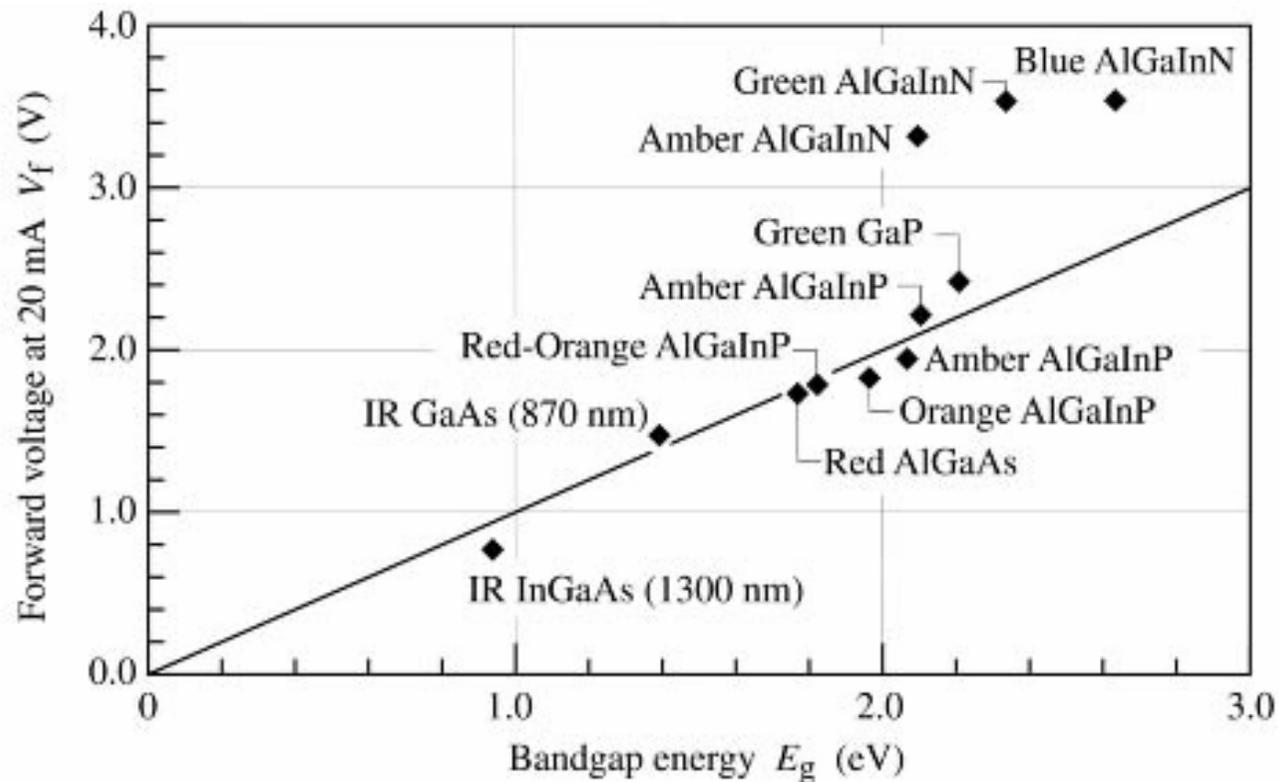
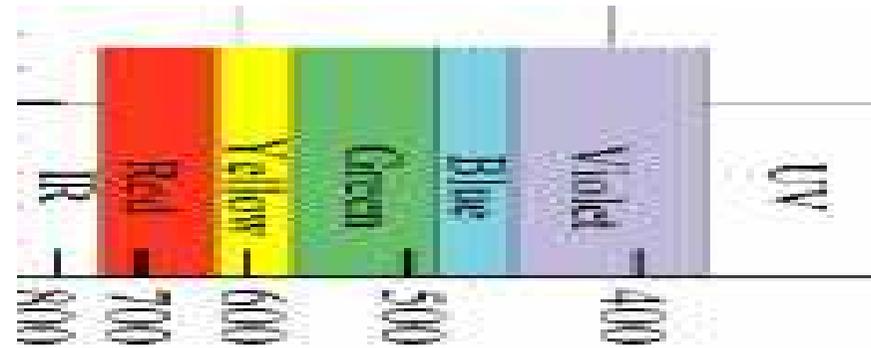


Fig. 3.3. Typical diode forward voltage versus bandgap energy for LEDs made from different materials (after Krames *et al.*, 2000).

# Materiales para LEDs

- GaAs  $E_g=1.43$  eV (860 nm)  
Zn en tipo n GaAs  
Si en material tipo p o n (más eficiente)
- GaP  $E_g=2.26$  eV (549 nm) gap **indirecto**  
O impureza profunda
- GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> de directo  $x<0.45$  a indirecto  $x>0.45$
- Ga<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>As alta eficiencia rojo e IR
- III-V Nitruros  
GaN, AlN, .. azul-verde
- InP (compuestos)  
InGaAs, InGaPAs IR cercano: 1.1 – 1.6  $\mu\text{m}$   
uso: comunicaciones con fibra óptica
- II-VI (ZnSe .. ) degradación
- SiC difícil fabricación

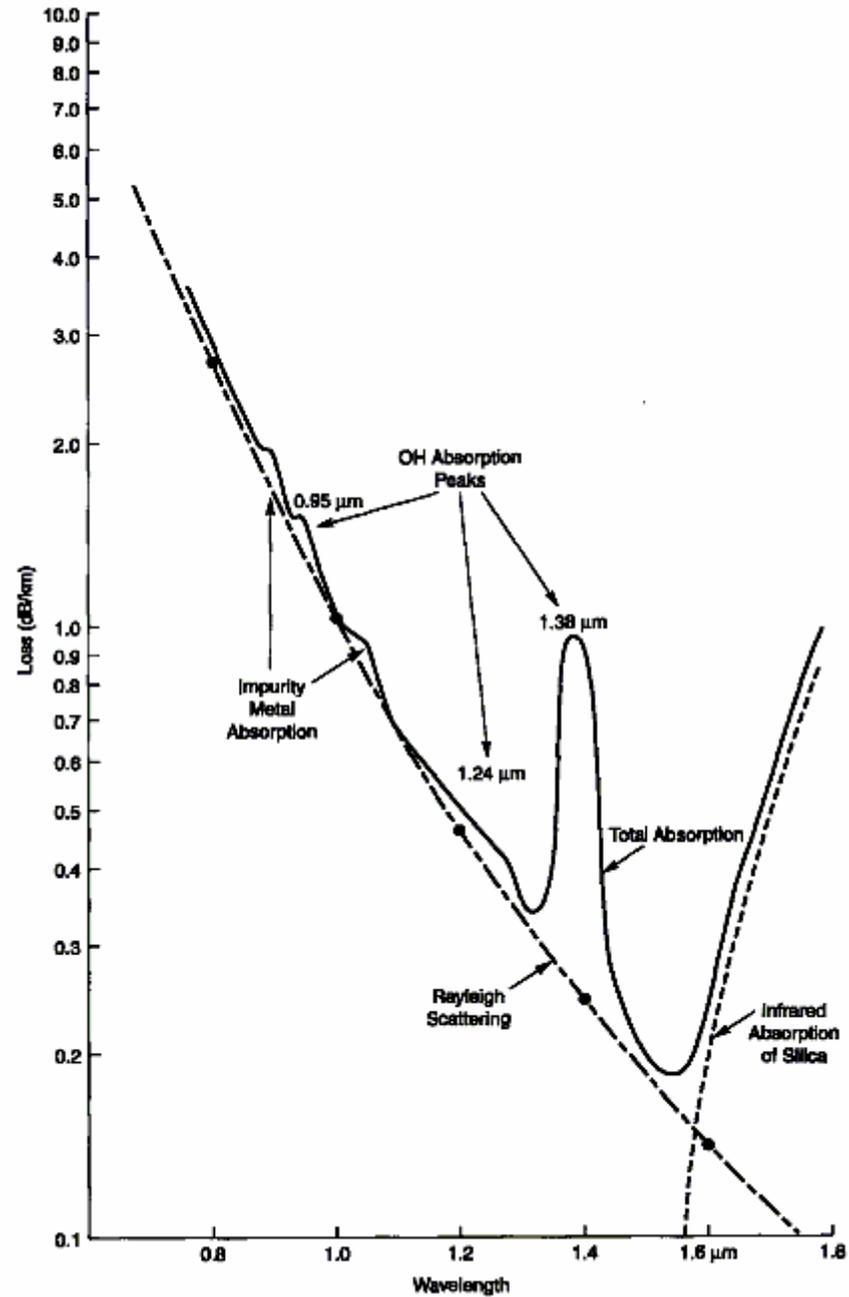
# Materiales semiconductores para LEDs

**TABLE 4.2 Characteristics of the most commonly used LED materials**

Material	Dopant	Peak emission (nm)	Colour	External quantum efficiencies (%)
GaAs	Si	910 → 1020	Infrared	10
$\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ ( $1 < x < 0.7$ )	Si	879 → 890	Infrared	15
GaP	Zn, O	700	Red	4
$\text{GaAs}_{0.6}\text{P}_{0.4}$		650	Red	0.2
$\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$	Zn	650	Red	15†
$\text{GaAs}_{0.35}\text{P}_{0.65}$	N	632	Orange	0.2
GaP	N, N	590	Yellow	0.1
AlInGaP		570	Yellow	1†
GaP	N	555	Green	0.1
$\text{Zn}_{0.9}\text{Cd}_{0.1}\text{Se}$		489	Blue	1.3†
SiC		470	Blue	0.03
$\text{In}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{As}$	Zn	450	Blue	3.8†

† Indicates a double heterostructure diode.

# Atenuación de una Fibra Óptica



# Semiconductores III-V

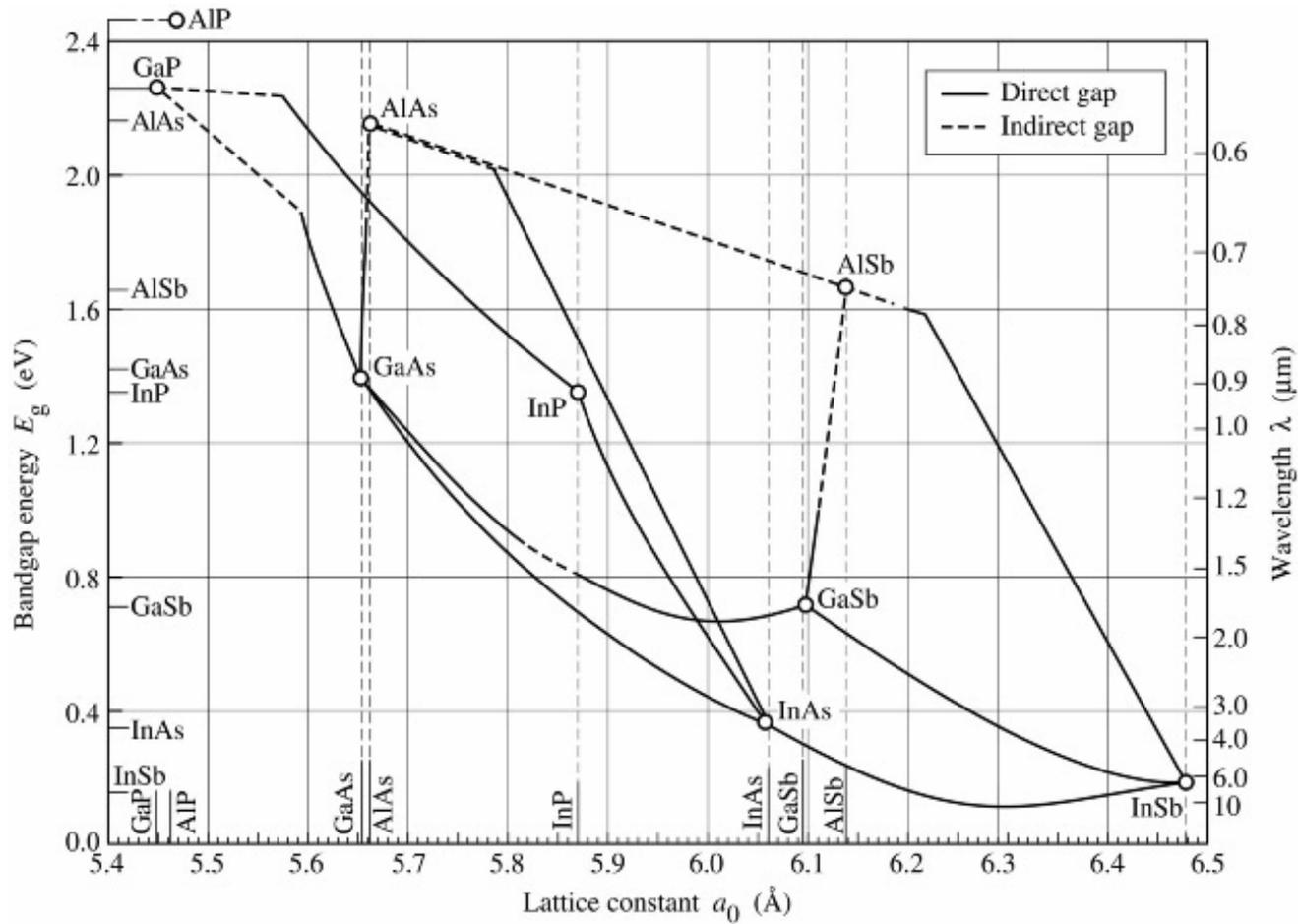


Fig. 7.6. Bandgap energy and lattice constant of various III-V semiconductors at room temperature (adopted from Tien, 1988).

El sistema AlGaAs apto para LEDs IR y rojo de alta potencia

# El sistema AlGaInP/GaAs

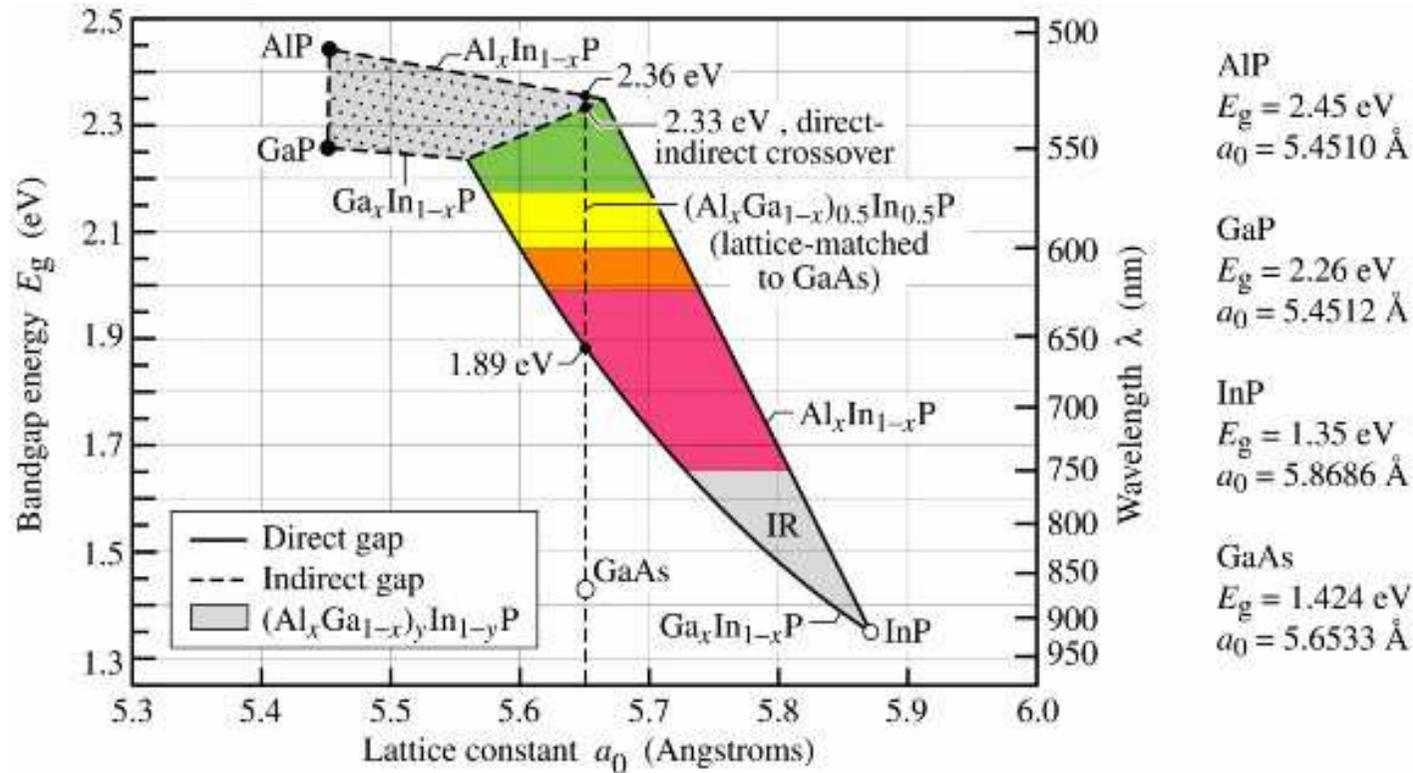
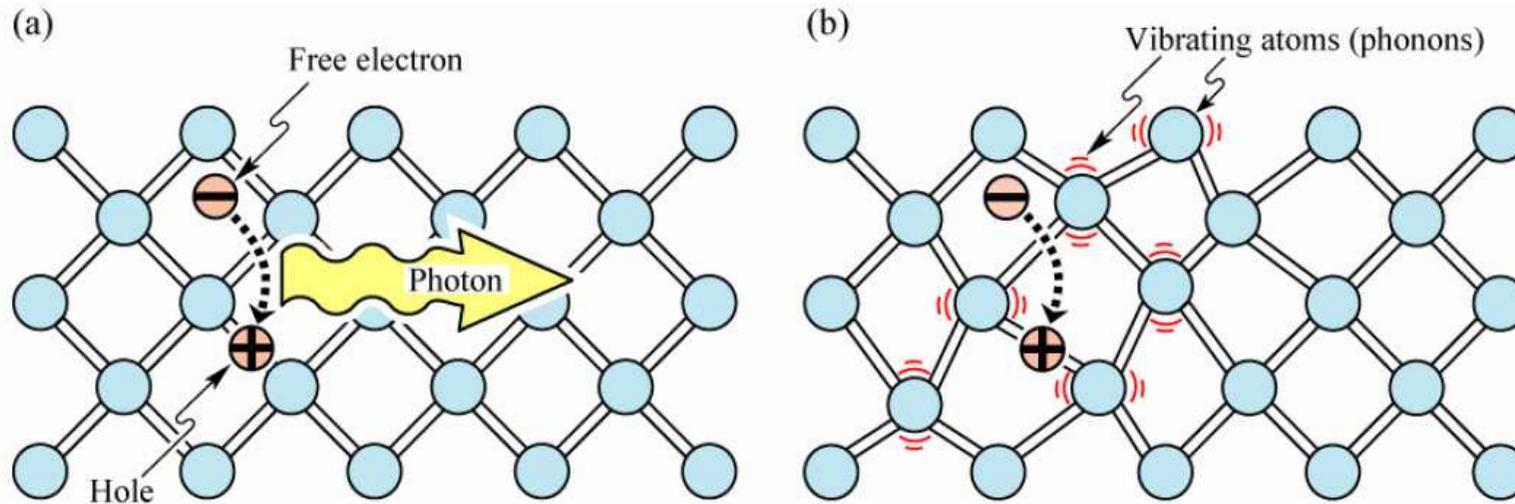


Fig. 7.9. Bandgap energy and corresponding wavelength versus lattice constant of  $(Al_xGa_{1-x})_yIn_{1-y}P$  at 300K. The dashed vertical line shows  $(Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P$  lattice matched to GaAs (adopted from Chen *et al.* 1997).

Sistema para LEDs muy brillantes en el rojo, naranja y amarillo

# 5 Recombinación



## A) radiativa

- Transiciones Interbanda
- Centros de Impureza
- Excitones

## B) NO-radiativa

- Trampas
- Superficie
- Auger

# Recombinación radiativa

## Transiciones Interbanda

Conservación de vector de onda total

$$k_{foton} = 2\pi/\lambda \ll \pi/a \approx k_{electron}$$

( $a$  constante de red)

-> transiciones verticales

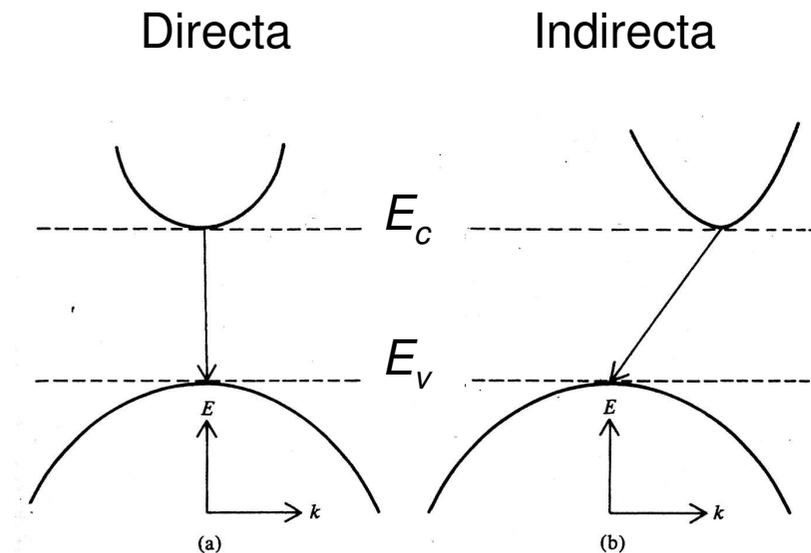
Coefficiente de recombinación  $r$ :

$$r = B n p$$

$B$  constante del material

(*direct recombination capture coefficient*)

Problema: reabsorción de fotones emitidos es posible



Transiciones indirectas necesitan fonon para conservación de  $k$

# Constante de Recombinación

**TABLE 4.1 Properties of various semiconductor materials**

Group(s)	Element/ compound	Direct/ indirect	$E_g$ (eV)	Readily doped n- or p-type	$B$ ( $m^3 s^{-1}$ )	$\lambda_g$ (nm)
IV	C	i	5.47			227
	Si	i	1.12	Yes	$1.79 \times 10^{-21}$	1106
	Ge	i	0.67	Yes	$5.25 \times 10^{-20}$	1880
IV-VI	SiC (hex. a)	i	3.00	Yes		413
III-V	AlP	i	2.45			506
	AlN	i	5.90	No		210
	AlSb	i	1.50			826
	AlAs	i	2.16			574
	GaN	d	3.40	No		365
	GaP	i	2.26	Yes	$5.37 \times 10^{-20}$	549
	GaAs	d	1.43	Yes	$7.21 \times 10^{-16}$	861
	InN	d	2.40			516
II-VI	InP	d	1.35	Yes	$1.26 \times 10^{-15}$	918
	InAs	d	0.35		$8.50 \times 10^{-17}$	3540
	InSb	d	0.18		$4.58 \times 10^{-17}$	6870
	ZnO	d	3.20	No		387
	ZnS( $\alpha$ )	d	3.80	No		326
	ZnS( $\beta$ )	d	3.60	No		344
	ZnSe	d	2.28	No		480
	ZnTe	d	2.58	No		544
	CdS	d	2.53	No		490
	CdSe	d	1.74	No		712
	CdTe	d	1.50	Yes		826

indirecto

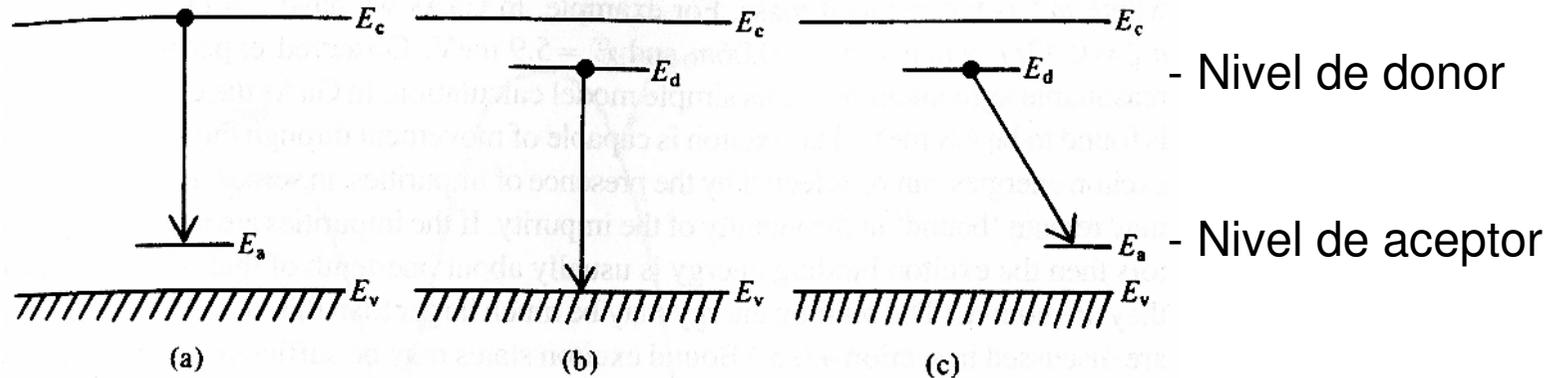
directo

# Recombinación radiativa

## Recombinación por centros de impureza

Banda de  
Conducción

Banda de  
Valencia



Electrón en impureza: localizado

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar/2 \quad \Delta k \geq \frac{1}{2\Delta x}$$

$$\Delta x \approx a \quad \Delta k \geq \frac{1}{2\Delta x} \approx \frac{1}{2a} \quad \text{comparable con} \quad \frac{\pi}{a}$$

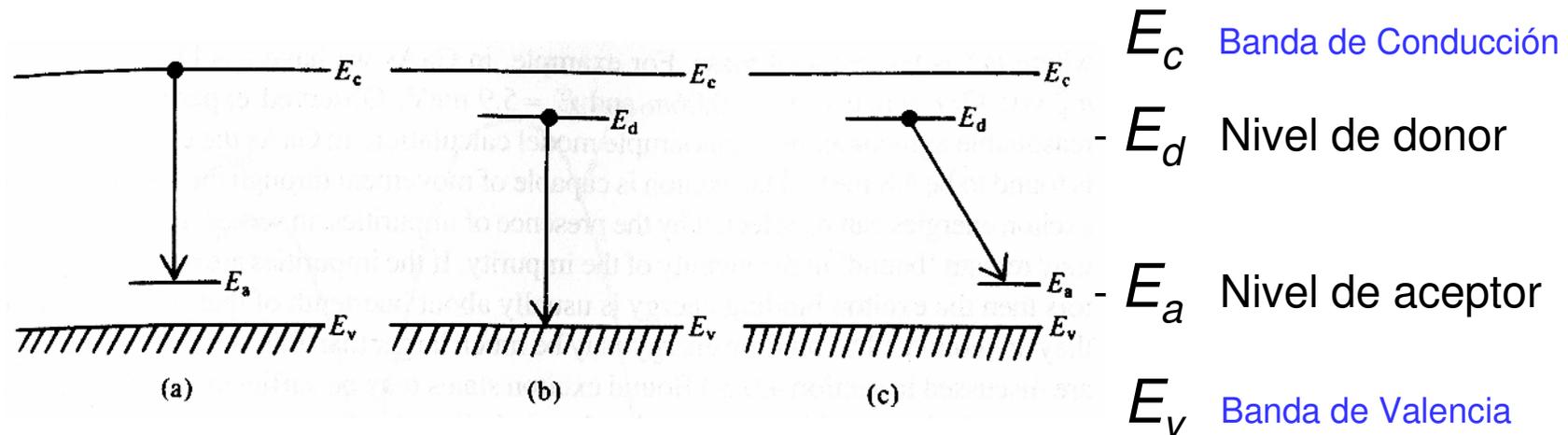
( $a$  constante de red)



transiciones indirectas  
posibles sin fonones

# Recombinación radiativa

## Recombinación por centros de impureza



### Impurezas poco profundas

$$E_c - E_d, E_a - E_v \approx 0.02 \text{ eV}$$

$$kT \approx 0.025 \text{ eV}$$

reabsorción posible

### Impurezas profundas

$$\approx 0.8 \text{ eV para O en GaP}$$

¡no hay reabsorción !

## Recombinación radiativa

### Recombinación por excitones

Energía de ligadura  $E_b$  del excitón (par de electrón-hueco ligado):

$$E_b = 13.6 \frac{m_r^*}{m_0} \left( \frac{1}{\epsilon_r} \right)^2 \text{ eV}$$

$m_r$  masa reducida

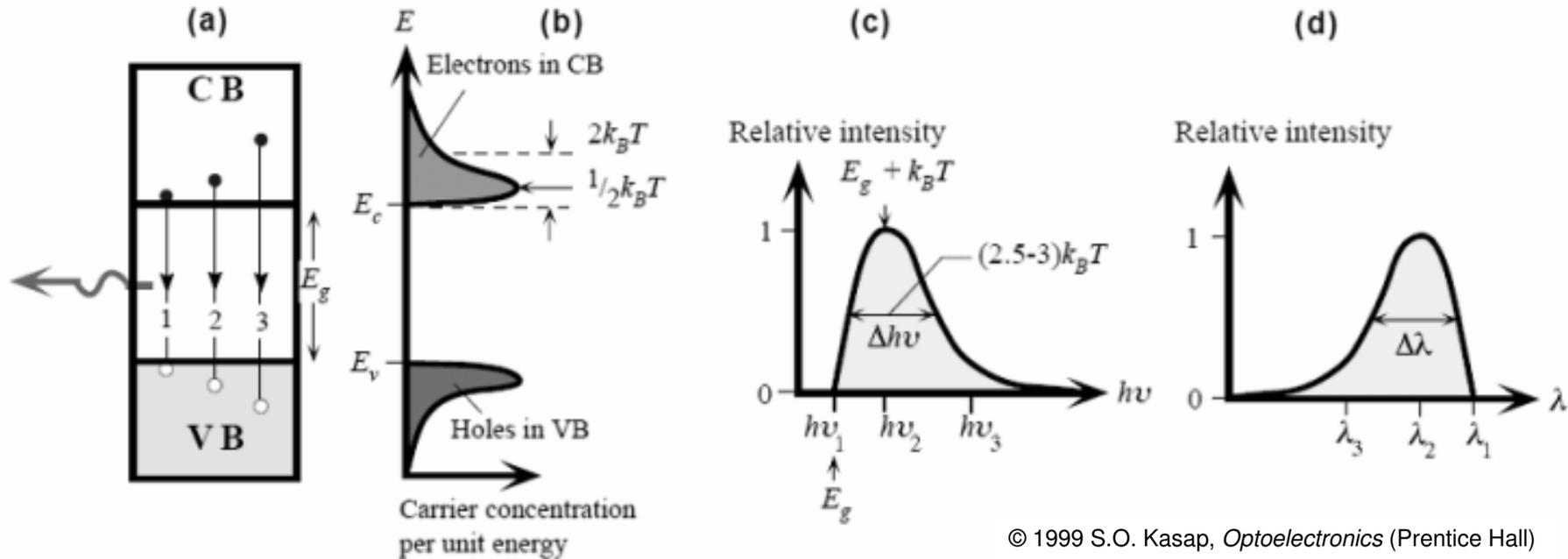
GaAs:  $\epsilon_r=11.5$ ,  $m_r=0.06m_0$ :  $E_b = 5.9 \text{ meV}$  (calc),  $4.8 \text{ meV}$  (medida)

Excitones libres o ligados a impurezas neutrales o ionizados

Energía de ligadura de un excitón ligado a una impureza:

$$E_b \approx 0.1 E_i$$

# Espectro de Emisión Interbanda



© 1999 S.O. Kasap, *Optoelectronics* (Prentice Hall)

$$I(E) \propto \sqrt{E - E_c} e^{-(E - E_F)/kT}$$

$$E_{emisión} \approx E_g + k_B T$$

$$\Delta E = (2.5 - 3) k_B T$$

$$\Delta \lambda_0 \approx \frac{3 k_B T \lambda_0^2}{hc}$$

$$\lambda = 870 \text{ nm}, T = 300 \text{ K} : \Delta \lambda_0 = 47 \text{ nm}$$

# 6

## Recombinación no-radiativa

- Trampas (niveles profundos)
- Superficie
- Auger

**no-radiativa** Nivel profundo

Auger

**radiativa**

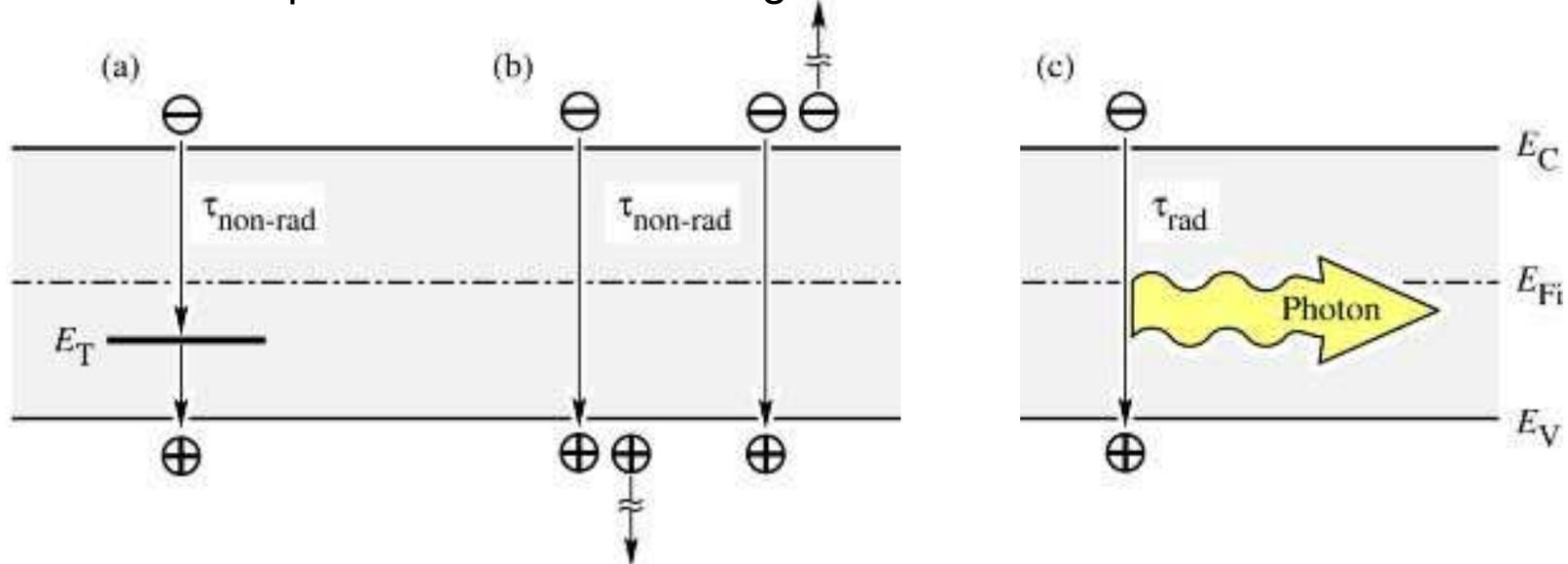
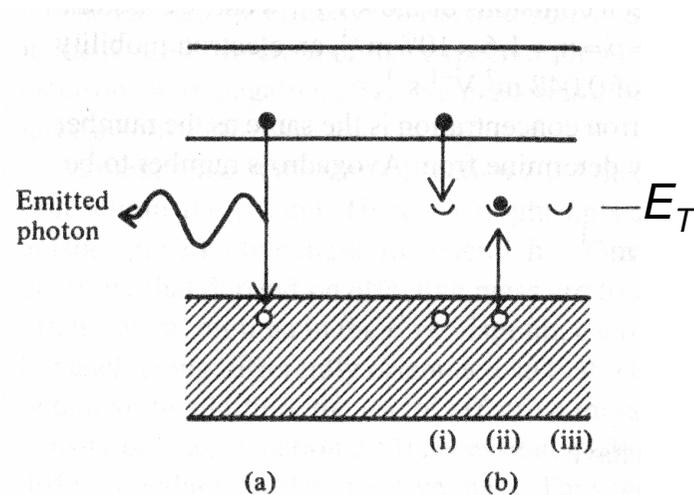


Fig. 1.6. Band diagram illustrating nonradiative recombination (a) via a deep level, (b) via an Auger process and (c) radiative recombination.

# Recombinación no-radiativa: Trampas

Nivel profundo (trampa)

producido por una variedad de defectos:  
impurezas: sustitucional, intersticial,  
vacantes, combinaciones de



La trampa puede capturar o emitir huecos o electrones

# Recombinación

## Trampa ópticamente activa

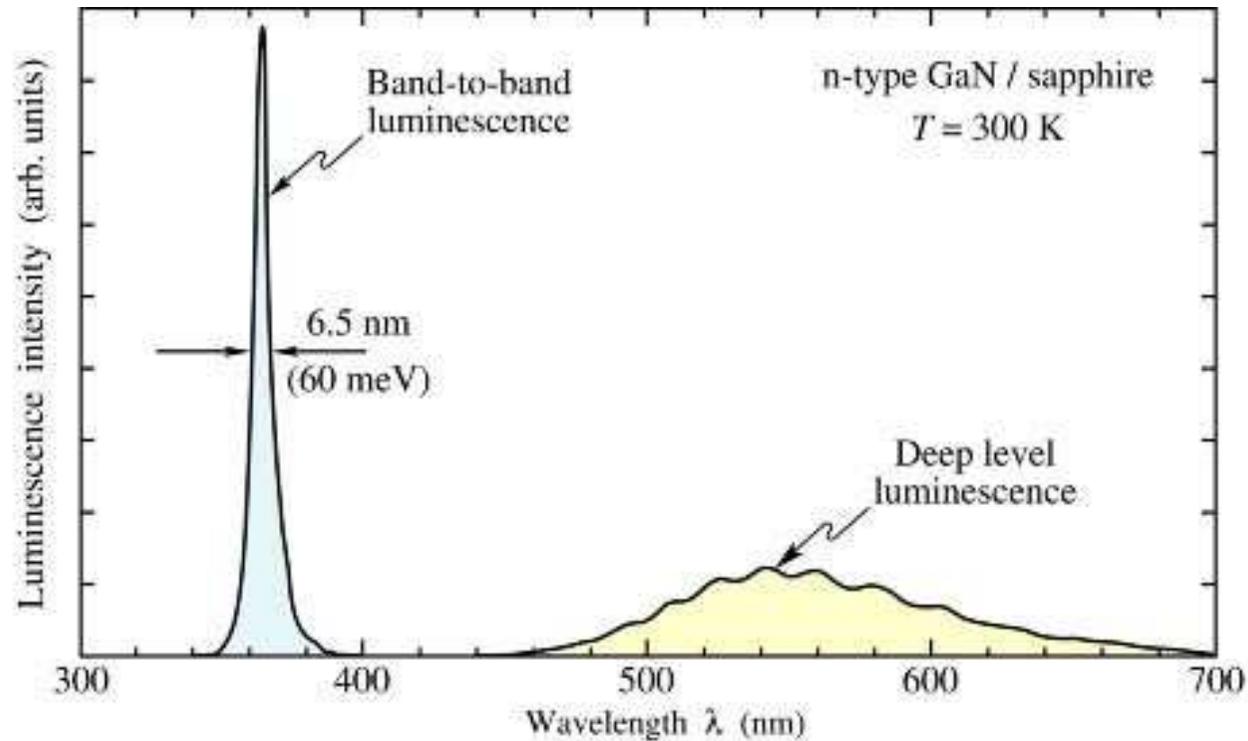


Fig. 1.8. Photoluminescence spectrum of GaN with a band-to-band transition at 365 nm and a second transition at 550 nm which was identified as an optically active deep-level transition (after Grieshaber *et al.* 1996).

# Recombinación no-radiativa: Trampas

Teoría de *Shockley-Read-Hall* de recombinación:

$$R_{nr} = s v_{th} N_T \frac{np - n_i^2}{n + p + 2n_i \cosh\left(\frac{E_T - E_{Fi}}{k_B T}\right)}$$

Ritmo de  
recombinación  
no-radiativa

$s$  = sección eficaz

$v_{th}$  = velocidad térmica de los portadores

$N_T$  = concentración de trampas

$E_{Fi}$  = nivel intrínseco

- $np - n_i^2$  desviación de equilibrio
- $E_T$  se aleja del centro del gap  $\Rightarrow R \downarrow$

# Recombinación no-radiativa: Trampas

- Semiconductor tipo **n**:  $n \gg p$
- $E_T$  en el centro del gap,
- inyección de bajo nivel ( $\Delta n \ll n_0$ )

$$R_{nr} = s \vartheta_{th} N_T [p - p_0]$$
$$= \frac{1}{\tau_h} [p - p_0]$$

$$\tau_h = \frac{1}{s \vartheta_{th} N_T}$$

Tiempo de vida no depende de la concentración de portadores mayoritarios  $n$

$R_{nr}$  determinado por concentración portadores minoritarios

## Recombinación no-radiativa: Superficie

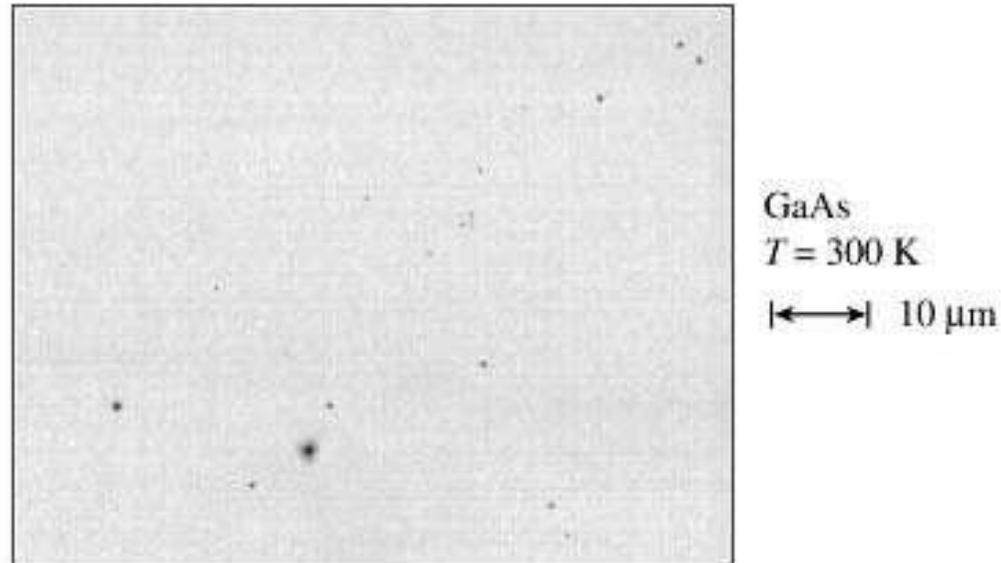
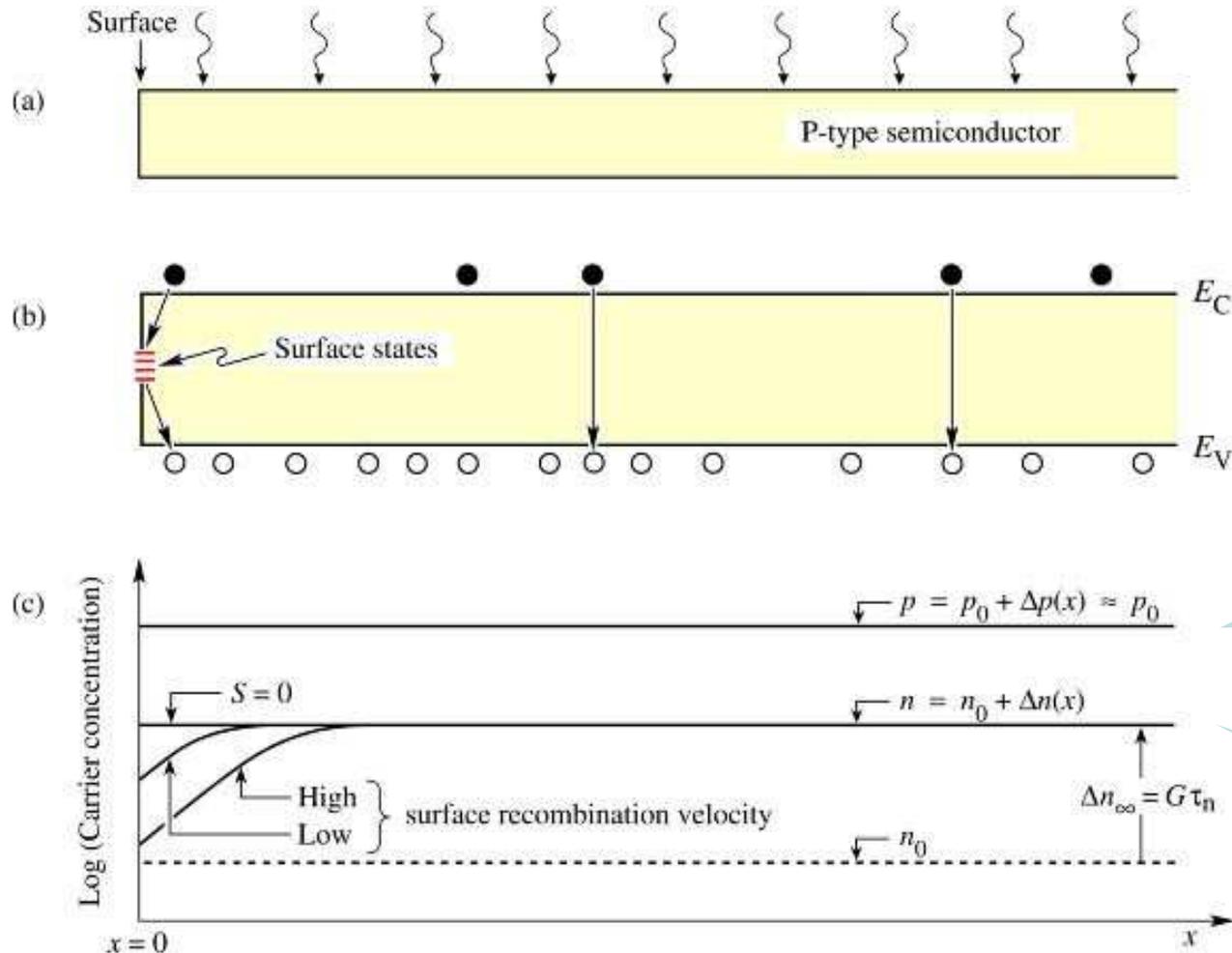


Fig. 1.7. Cathodoluminescence micrograph of a GaAs epitaxial layer. The dark spots are due to large clusters of non-radiative recombination centers (after Schubert, 1995).

# Recombinación no-radiativa: Superficie

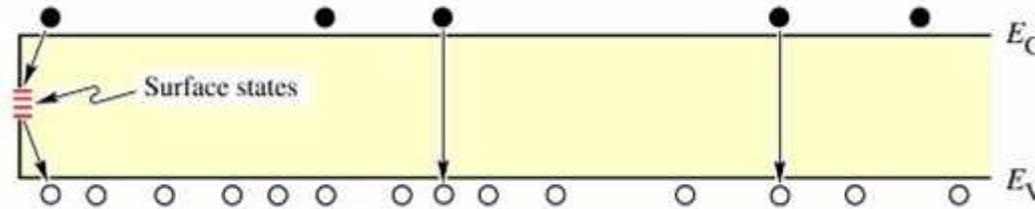


Portadores  
Mayoritarios

Portadores  
minoritarios

Fig. 1.9. (a) Illuminated p-type semiconductor, (b) band diagram, and (c) minority and majority carrier concentration near the surface assuming uniform carrier generation due to illumination. The excess carrier concentrations are  $\Delta n$  and  $\Delta p$ .

# Recombinación no-radiativa: Superficie



Estados de defectos a la superficie por 'lazos sueltos', o ligados a Oxígeno

minimizar:

- pasivar con un dielectrico ( $\text{SiO}_2$  o  $\text{SiN}$  por ejemplo)
- heterounión  
(materiales con gap más grande no hay absorción: ventana)

Inyección en tipo **n**:  $n \gg p$

$N_{ST}$  densidad de estados a la superficie.

Ritmo de recombinación a la superficie:

$$R_S = \text{flujo de portadores minoritarios (huecos)}$$

# Recombinación no-radiativa: Superficie

Inyección en tipo **n**:  $n \gg p$

$N_{ST}$  densidad de estados a la superficie, hasta una profundidad  $x_l$

Ritmo de recombinación a la superficie  $R_S$

= flujo de portadores minoritarios (huecos)

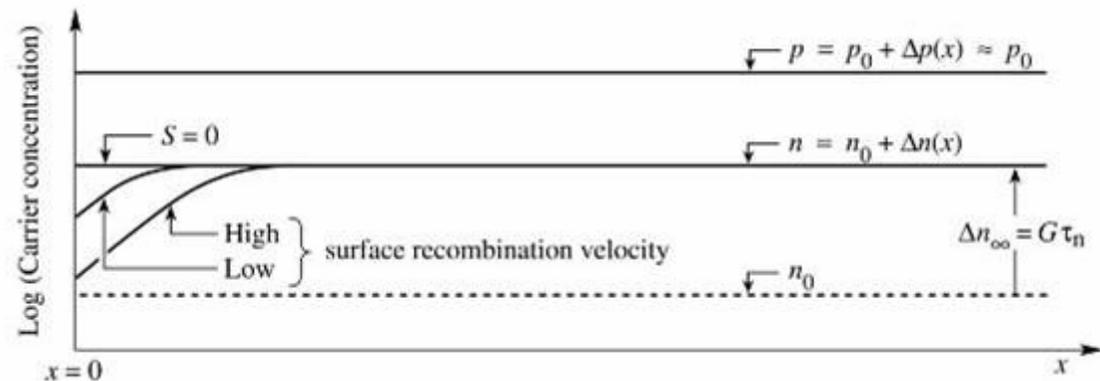
$$R_S = s \mathcal{V}_{th} N_{ST} x_l [p(0) - p_0] = D_h \left. \frac{\partial p}{\partial x} \right|_{x=0}$$

a la superficie

Velocidad de recombinación a la superficie:

$$S_R = s \mathcal{V}_{th} N_{ST}$$

GaAs	$S = 10^6$ cm/s
GaP	$S = 10^6$ cm/s
InP	$S = 10^3$ cm/s
Si	$S = 10^1$ cm/s



Recombinación a la superficie en semiconductor tipo **p**

# Recombinación no-radiativa: Superficie

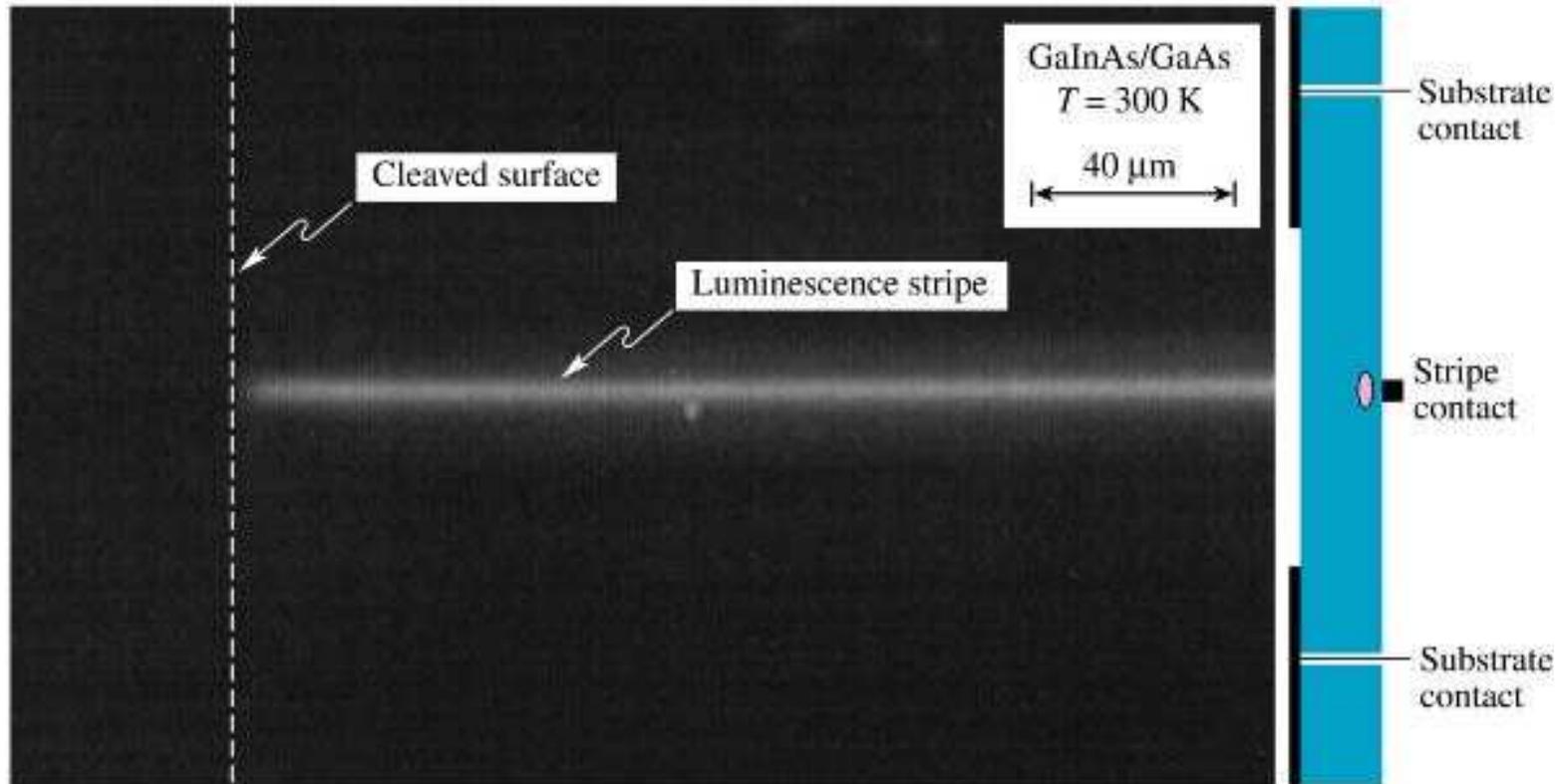
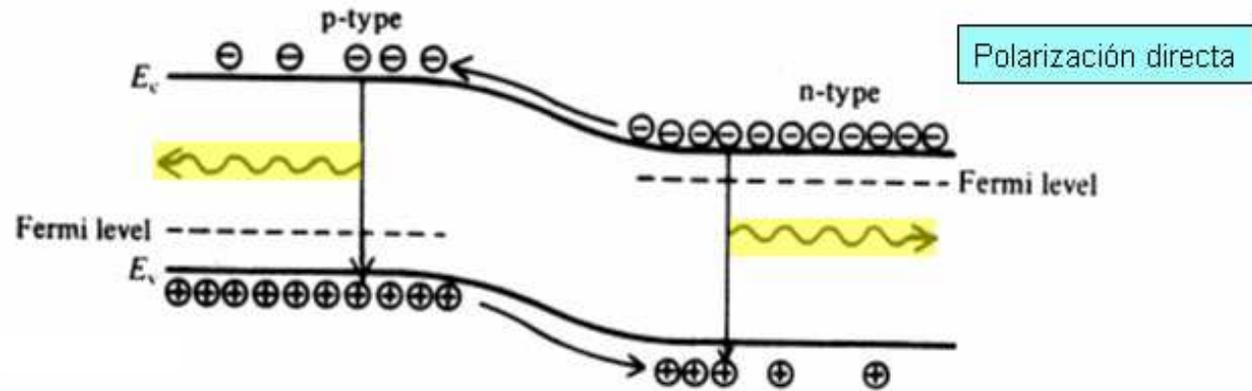
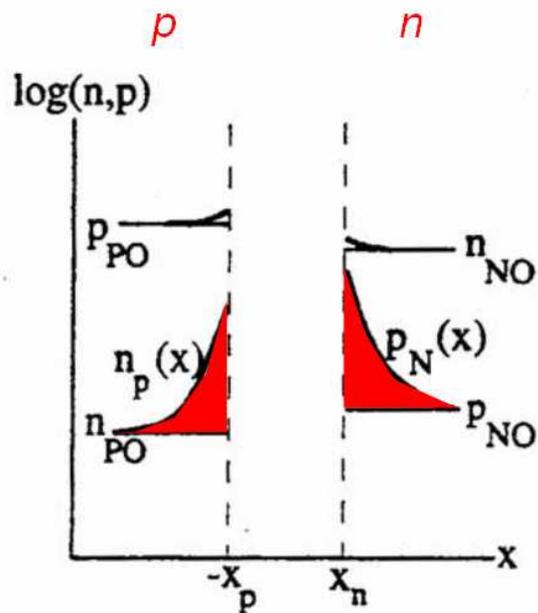


Fig. 1.10. Micrograph of a GaInAs/GaAs structure with a stripe-shaped contact on the top side and a contact widow at the substrate side of the device under current injection conditions. The luminescence emanating from the active region located below the stripe contact clearly decreases in the vicinity of the surface due to surface recombination.

# 7 El proceso de Recombinación



Polarización Directa



Portadores minoritarios en exceso se recombinan después de un tiempo de vida con portadores mayoritarios.

# Ritmo de Recombinación

En un semiconductor tipo **n** : generación y recombinación de huecos:

Ritmo de Recombinación (*Recombination rate*)

$$R = \frac{1}{\tau_h} (p - p_0)$$

$\tau_h$  tiempo de vida del hueco

Recombinación

- Radiativa

foton

- No-Radiativa

- Volumen: Defectos, Trampas, Auger, ...

- Superficie

fonon

# Procesos de recombinación

Tiempo de vida de los portadores:

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

*radiativa*

*no-radiativa*

Ritmo de recombinación total:

$$R_{total} = R_r + R_{nr} = R_{sp}$$

Eficiencia cuántica interna (eficiencia radiativa de recombinación):

$$\eta_r = \frac{R_r}{R_r + R_{nr}} = \frac{1}{1 + \tau_r / \tau_{nr}} \quad \text{cuando} \quad \tau_{r,nr} = \Delta n / R_{r,nr} \quad (\text{proceso exponencial})$$

$\Delta n$  Concentración de portadores en exceso

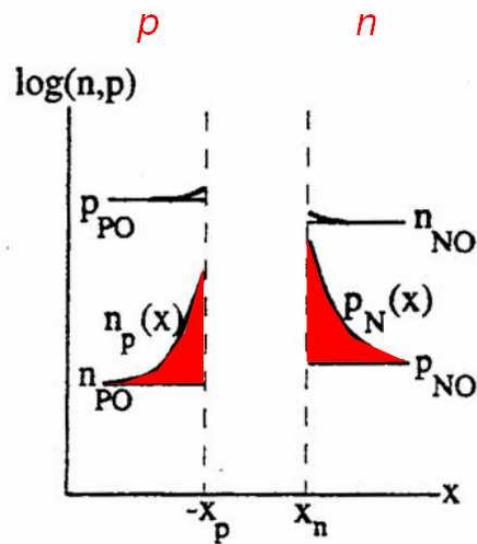
# Portadores

$$n_0 p_0 = n_i^2$$

'law of mass action'

$n_i$  concentración intrínseca

Polarización Directa



Inyección:

$$p = p_0 + \Delta p$$

$$n = n_0 + \Delta n$$

$$np - n_i^2$$



Desviación de equilibrio

## Recombinación radiativa: Interbanda

$$R_r = B_r np \quad \begin{array}{l} p = p_0 + \Delta p \\ n = n_0 + \Delta n \end{array} \quad \begin{array}{l} R_r = B_r (n_0 + \Delta n)(p_0 + \Delta p) \\ \Delta n = \Delta p \end{array}$$

Ritmo de recombinación de portadores en exceso (inyectados):

$$R_r^{ex} = \frac{\Delta n}{\tau_r}$$

Ritmo de recombinación de portadores en equilibrio:

$$R_r^0 = B_r n_0 p_0$$

Ritmo de recombinación

$$R_r^{ex} = -\frac{dn}{dt} = -\frac{d\Delta n}{dt} = B_r (n_0 + \Delta n)(p_0 + \Delta p) - B_r n_i^2$$

# Recombinación radiativa: Interbanda

Ritmo de recombinación de portadores en exceso (inyectados):

$$R_r^{ex} = -\frac{d\Delta n}{dt} = B_r \Delta n (n_0 + p_0 + \Delta n)$$

$$\tau_r = \frac{1}{B_r (n_0 + p_0 + \Delta n)}$$

Inyección baja

$$\Delta n, \Delta p \ll n_0, p_0$$

$$\tau_r = \frac{1}{B_r (n_0 + p_0)}$$

tipo n:  $n_0 \gg p_0$

$$-\frac{d\Delta p}{dt} = B_r n \Delta p \quad \Rightarrow \quad \Delta p = \Delta p(0) \exp(-B_r n t) = \Delta p(0) \exp(-t / \tau_h)$$

# Recombinación radiativa: Interbanda

Inyección baja →  $\Delta n \ll n_0, p_0$

$$\tau_{h,r} = (Bn)^{-1}$$

Tiempo de vida de recombinación de portadores minoritarios  
(de huecos en material tipo n)

*determinado por concentración de portadores mayoritarios*

Inyección alta →  $\Delta n \gg n_0, p_0$

$$R_r^{ex} = -\frac{d\Delta n}{dt} = B_r \Delta n (n_0 + p_0 + \Delta n)$$

$$\tau_r \cong (B \Delta n)^{-1}$$

Caso de LED con inyección alta y láser

*determinado por concentración de portadores  
inyectados (minoritarios)*