

## B.5. El diodo de emisión de luz (LED)

### B.5.1. Introducción

- necesitamos generadores de luz para las señales ópticas

=> LED: muy sencillo y económico

pero... baja señal óptica, espectro ancho, luz no coherente y respuesta lenta

### B.5.2. Materiales para los LEDs

- LED permite trabajar hasta frecuencias de modulación de 1GHz

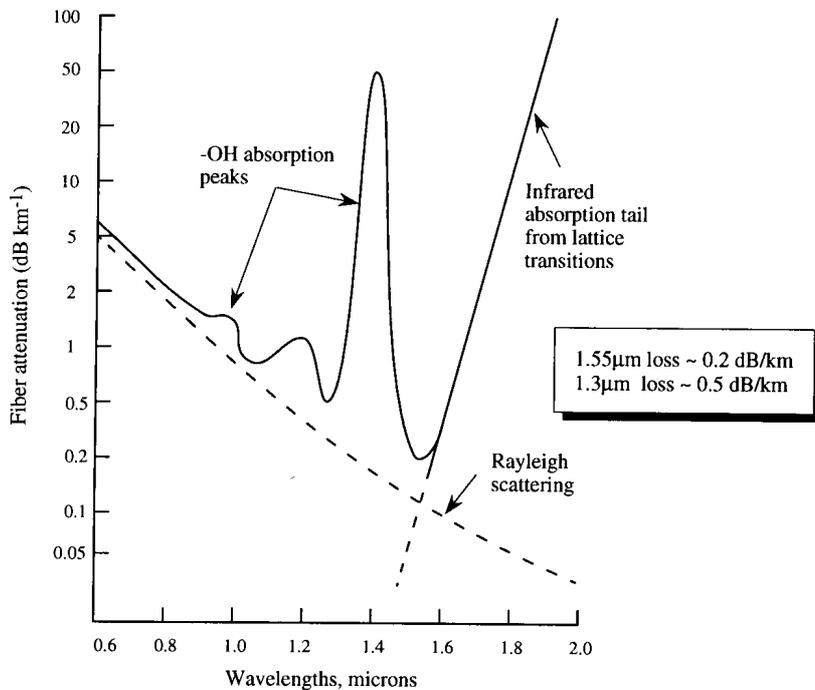
- anchura espectral del orden de  $k_B T$ , es decir, un margen de longitudes de onda entre 200Å a 300Å (*para el ojo humano un solo color*)

#### **Funcionamiento:**

- unión p-n directamente polarizada. Los portadores minoritarios inyectados se recombinan con los mayoritarios emitiendo un fotón en semiconductores de gap directo (recombinación radiante).

En semiconductores de gap indirecto se libera más bien calor que luz.

Energía de emisión: depende del gap de energía  
=> cada gap se corresponde con un color



$\lambda$  de 1,55 $\mu\text{m}$  o  
1,3 $\mu\text{m}$  pues en dichas  
 $\lambda$  las pérdidas en la  
fibra óptica son  
menores

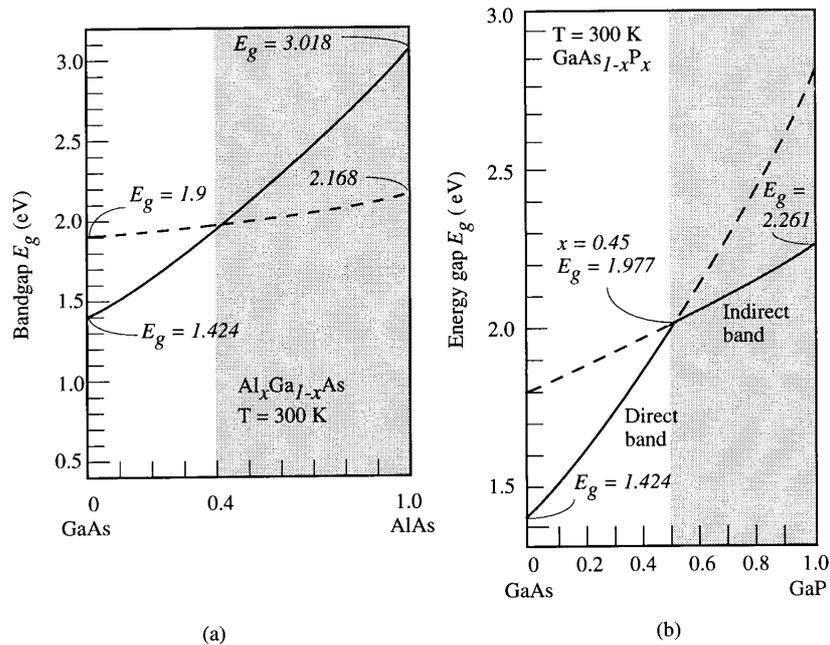
Disponibilidad de substrato: se necesita un substrato apropiado para cada material para reducir defectos.

Substratos más importantes: GaAs y el InP

Aleaciones: permiten experimentar en su composición para su correcta adaptación a los substratos.

Hay que tener en cuenta que según la proporción cambia de directo a indirecto

Algunos materiales de gap indirecto pueden tener también una eficiencia radiante razonable si se dopan con unas impurezas adecuadas, aunque mucho menor que en semiconductores directos.



### B.5.3. Funcionamiento del LED

Hay recombinación radiante y no radiante. La vida media de los portadores dependerá de ambas:

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

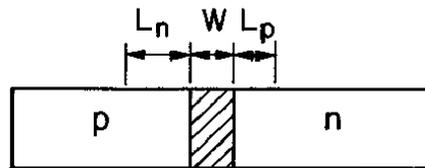
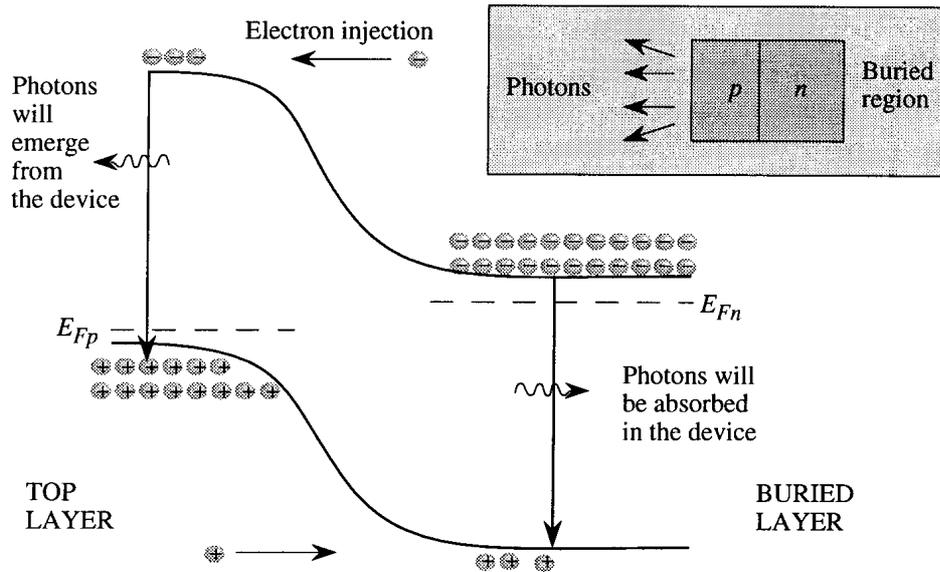
Eficiencia cuántica interna:

$$\eta_{Qi} = \frac{\frac{1}{\tau_r}}{\frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{nr}}} = \frac{1}{1 + \frac{\tau_r}{\tau_{nr}}}$$

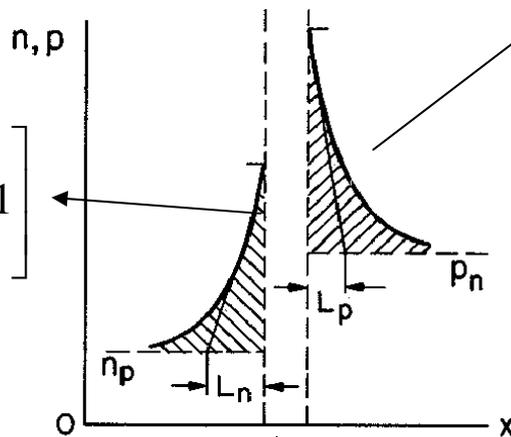
### B.5.3.1 Inyección de portadores y emisión espontánea

EL LED emitirá desde la parte superior ya que los fotones emitidos desde la parte inferior serán reabsorbidos.

Parte superior p => corriente dominante de electrones



$$J_n = \frac{eD_n n_p}{L_n} \left[ e^{\left(\frac{eV}{k_B T}\right)} - 1 \right]$$



$$J_p = \frac{eD_p p_n}{L_p} \left[ e^{\left(\frac{eV}{k_B T}\right)} - 1 \right]$$

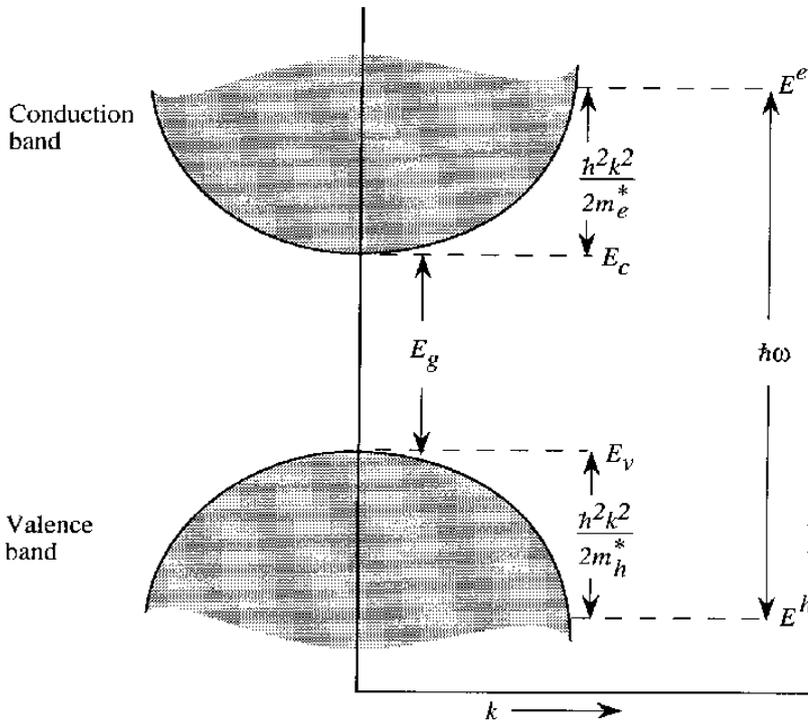
Unión pn<sup>+</sup> (n<sub>p</sub> >> p<sub>n</sub>)

$$\implies J_n \gg J_p$$

$$J_{GR} = \frac{en_i W}{2\tau} \left[ e^{\left(\frac{eV}{2k_B T}\right)} - 1 \right]$$

Eficiencia de la inyección:

$$\gamma_{iny} = \frac{J_n}{J_n + J_p + J_{GR}}$$



Relaciones importantes:

$$\hbar\omega - E_g = \frac{\hbar^2 k^2}{2} \left[ \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \right] = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_r^*}$$

$$E^e = E_c + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e^*} = E_c + \frac{m_r^*}{m_e^*} (\hbar\omega - E_g)$$

$$E^h = E_v - \frac{\hbar^2 k^2}{2m_h^*} = E_v - \frac{m_r^*}{m_h^*} (\hbar\omega - E_g)$$

Hay dos clases de procesos de emisión.

- Emisión espontánea: un electrón se recombina con un hueco (aunque no haya fotones presentes) y emite un fotón.

La velocidad del proceso de recombinación radiante:

$$W_{em} = \frac{e^2 n_r \hbar\omega}{3\pi\epsilon_0 m_0^2 c^3 \hbar^2} |p_{cv}|^2 \sim 1,14 \cdot 10^9 \hbar\omega \text{ (eV)} \text{ s}^{-1}$$

- Emisión estimulada: la presencia de fotones en una cavidad con el semiconductor, provoca un incremento en la velocidad de recombinación.

$$W_{em}^{st} = \frac{e^2 n_r \hbar\omega}{3\pi\epsilon_0 m_0^2 c^3 \hbar^2} |p_{cv}|^2 \cdot n_{ph}(\hbar\omega) \quad 5$$

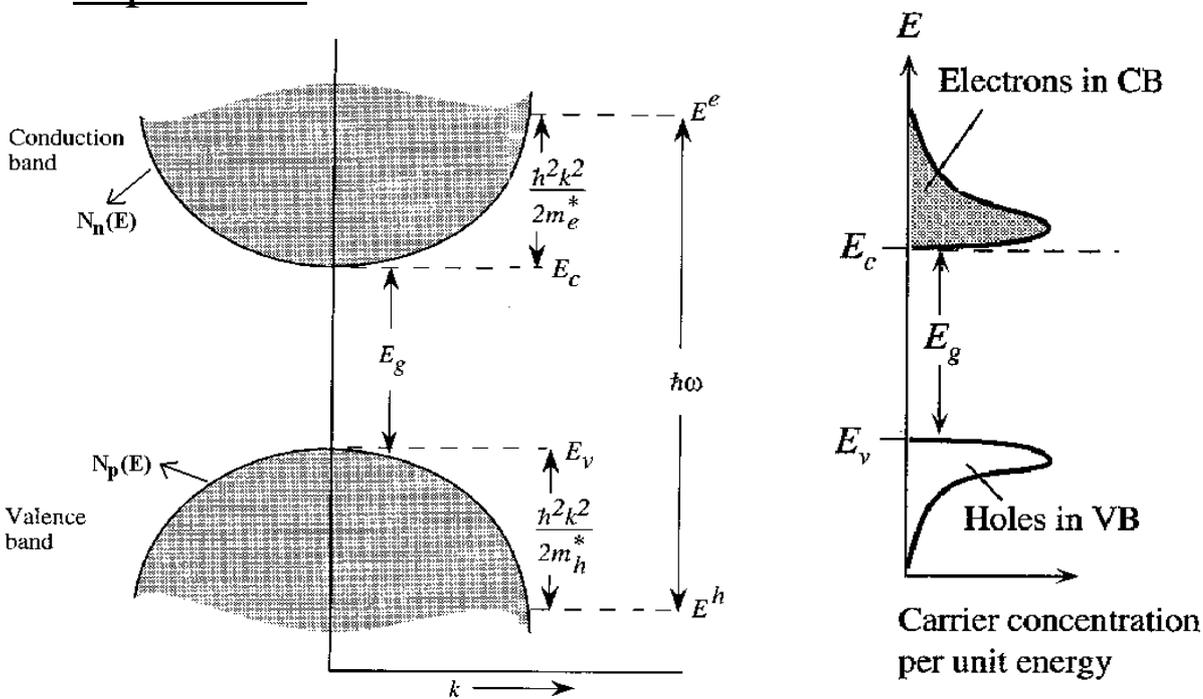
Para emisión espontánea, el menor tiempo posible de recombinación radiante vale:

$$\tau_0 = \frac{1}{W_{em}} = \frac{0,88}{\hbar\omega(eV)} [ns]$$

En emisión estimulada, el tiempo de recombinación e-h puede llegar a ser bastante menor de  $\tau_0$ .

La **frecuencia de emisión de fotones** (por unidad de volumen)  $R_{spon}$  se obtiene integrando la velocidad de recombinación radiante,  $W_{em}$  sobre todas las energías considerando todos los posibles pares electrón-hueco:

Determinación de los pares electrón-hueco involucrados en el proceso:



$$n(E^e) = N_n(E^e) \cdot f^e(E^e) \begin{cases} \rightarrow N_n(E^e) = \frac{1}{2 \cdot \pi^2} \cdot \left( \frac{2 \cdot m_e^*}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot (E^e - E_C)^{1/2} \\ \rightarrow f^e(E^e) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E^e - E_F}{k_B \cdot T}}} \end{cases}$$

$$p(E^h) = N_p(E^h) \cdot f^h(E^h) \begin{cases} \rightarrow N_p(E^h) = \frac{1}{2 \cdot \pi^2} \cdot \left( \frac{2 \cdot m_h^*}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot (E_v - E^h)^{1/2} \\ \rightarrow f^h(E^h) = 1 - f^e(E^h) \end{cases}$$

Frecuencia de emisión de fotones (por unidad de volumen):

$$R_{\text{spon}} = \int W_{\text{em}} \cdot N_{\text{cv}}(\hbar\omega) \cdot f^e(E^e) \cdot f^h(E^h) \cdot d(\hbar\omega) = \frac{1}{\tau_0} \cdot \int N_{\text{cv}}(\hbar\omega) \cdot f^e(E^e) \cdot f^h(E^h) \cdot d(\hbar\omega)$$

con:

$$N_{\text{cv}}(\hbar\omega) = \frac{1}{2 \cdot \pi^2} \cdot \left( \frac{2 \cdot m_r^*}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot (\hbar\omega - E_g)^{1/2}$$

Caso i: bajo nivel de inyección en zonas poco dopadas

$$R_{\text{spon}} = \frac{1}{2\tau_0} \left( \frac{2\pi\hbar^2 m_r^*}{k_B T m_e^* m_h^*} \right)^{3/2} \text{ np}$$

Vida media de un electrón ( $\tau_r$ ):

$$\frac{R_{\text{spon}}}{n} = \frac{1}{\tau_r} = \frac{1}{2\tau_0} \left( \frac{2\pi\hbar^2 m_r^*}{k_B T m_e^* m_h^*} \right)^{3/2} \text{ p}$$

Caso ii: a) Inyección de electrones en una zona p altamente dopada.

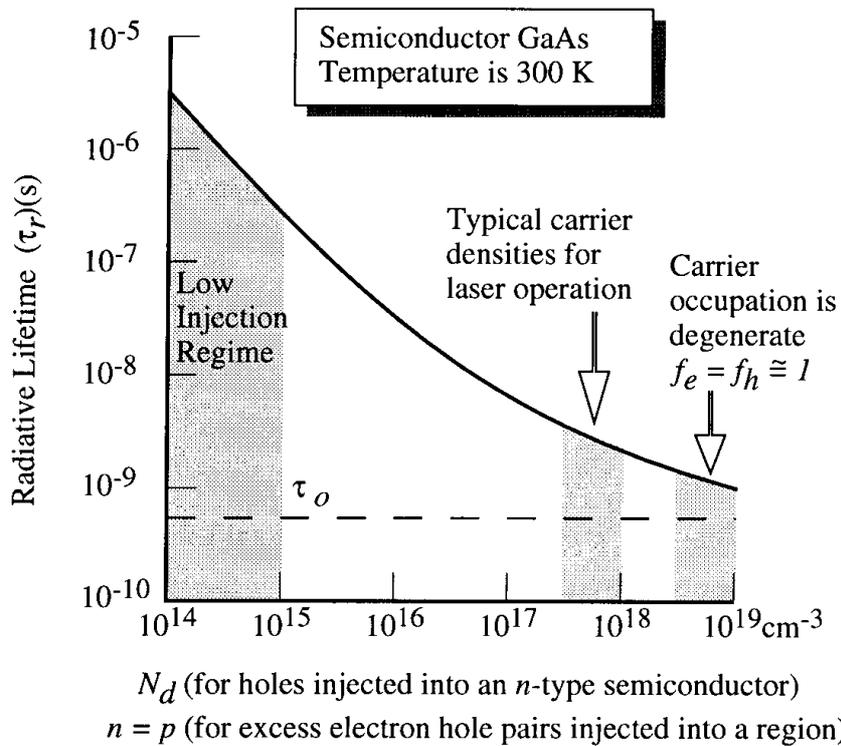
$$R_{spon} \approx \frac{1}{\tau_0} \left( \frac{m_r^*}{m_h^*} \right)^{3/2} n$$

b) Inyección de huecos en una zona n altamente dopada

$$R_{spon} \approx \frac{1}{\tau_0} \left( \frac{m_r^*}{m_e^*} \right)^{3/2} p$$

Caso iii: Alta inyección.

$$R_{spon} \approx \frac{n}{\tau_0} \approx \frac{p}{\tau_0}$$



Caso iv: Inversión.

En el caso del diodo láser los pares e-h que se recombinan emiten fotones que son absorbidos posteriormente por lo que podemos definir una ganancia que dependerá de la diferencia entre los procesos de emisión y absorción.

$$g(\hbar\omega) = \alpha(\hbar\omega) \cdot [f^e(E^e) \cdot f^h(E^h) - (1 - f^e(E^e)) \cdot (1 - f^h(E^h))] = \\ = \alpha(\hbar\omega) \cdot [f^e(E^e) - (1 - f^h(E^h))]$$

$$\text{Si } f^e(E^e) + f^h(E^h) > 1 \quad \implies \quad g(\hbar\omega) > 0$$

$$\text{Condición de inversión: } f^e(E^e) + f^h(E^h) = 1$$

$$\text{Suponiendo } f^e(E^e) \approx f^h(E^h) \approx 1/2 :$$

$$R_{\text{spont}} \cong \frac{n}{4\tau_0} \cong \frac{p}{4\tau_0}$$

$$\tau_r \approx 4\tau_0$$

Para mejorar el rendimiento en la emisión de fotones se ha de disminuir el tiempo de recombinación radiante  $\tau_r = n/R_{\text{spon}}$  y aumentar el tiempo de recombinación no radiante  $\tau_{\text{nr}}$

- Para disminuir  $\tau_r$  se aumenta el dopado tipo p en la región donde se inyectan electrones. Aunque esto disminuye la eficiencia de la inyección  $\gamma_{\text{iny}}$ .

- Para aumentar  $\tau_{\text{nr}} \implies$  reducir la densidad de defectos mejorando la superficie e interfase

**Eficiencia cuántica interna total:**  $\eta_{\text{Qit}} = \gamma_{\text{iny}} \eta_{\text{Qi}}$

para maximizar  $\eta_{\text{Qit}}$ , se necesita optimizar el dopado en la zona p, de forma que no sea tan bajo como para que  $\eta_{\text{Qi}}$  sea baja, ni tan alto como para que  $\gamma_{\text{iny}}$  sea baja.

#### B.5.4. Eficiencia cuántica externa

Una vez generados los fotones hay que evitar su pérdida:

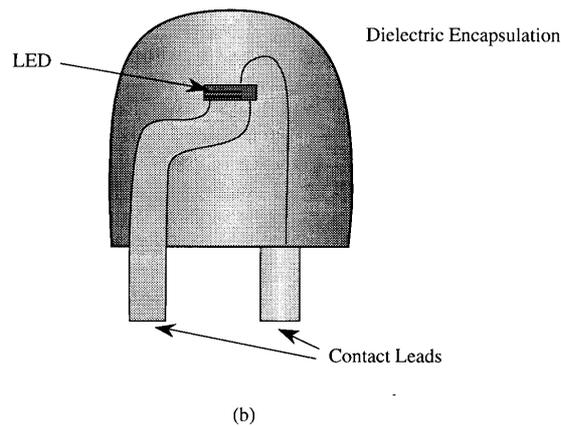
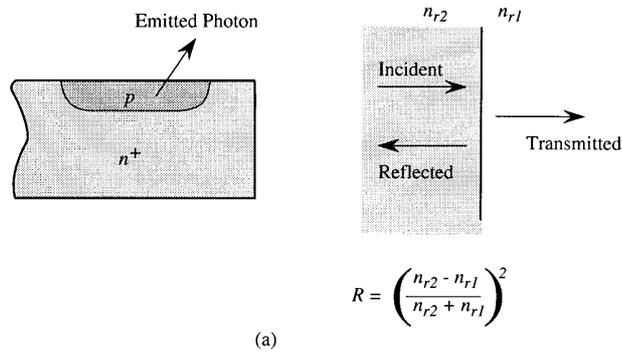
- por reflexión en la interfase semiconductor-aire
- por reabsorción
- pérdida de fotones incidentes con ángulos superiores al crítico y que sufren reflexión interna total.

Por reabsorción: se deben emitir cerca de la superficie aunque no demasiado cerca para evitar los defectos superficiales.

Por reflexión: evitar la pérdidas de Fresnel (33%)

Coeficiente de reflexión:  $R = |r^2| = \left( \frac{n_{r2} - n_{r1}}{n_{r2} + n_{r1}} \right)^2$

Solución: cúpula dieléctrica



La cúpula dieléctrica también reduce la pérdidas por reflexión total.

Para acoplar la luz a una fibra, si la fuente es Lambertiana ( $I_{ph}(\theta) = I_0 \cos\theta$ ), el rendimiento es ( $\sim 10\%$ )

$$\eta_{fibra} = \frac{\int_0^{\theta_A} I_{ph}(\theta) \sin\theta d\theta}{\int_0^{\frac{\pi}{2}} I_{ph}(\theta) \sin\theta d\theta} = \sin^2\theta_A$$

## B.5.5. Estructuras avanzadas de LEDs

Aspectos más importantes:

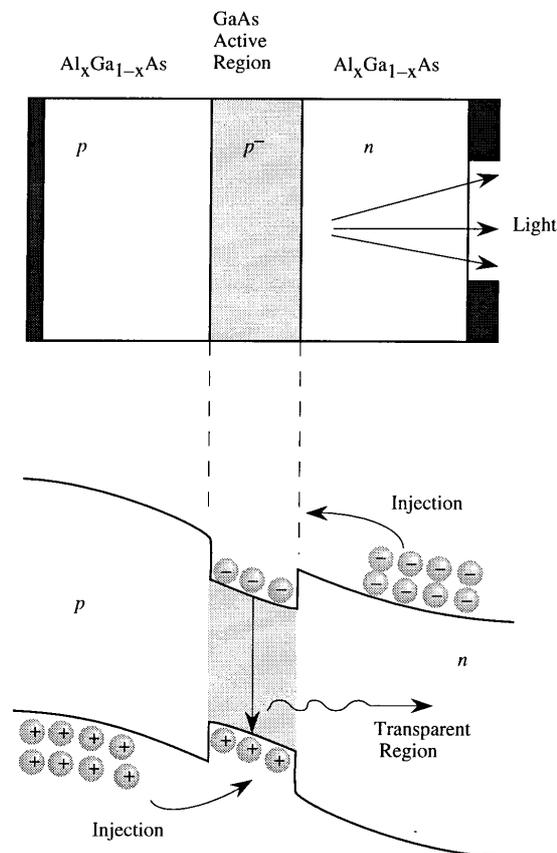
- eficiencia cuántica interna y externa
- pureza espectral
- tiempo de respuesta

### B.5.5.1. LED a partir de una heterounión

Problema: los fotones se deben generar cerca de la superficie  
=> pero la interfase tiene defectos a evitar por los portadores

Solución: heterounión => inyección de zonas de mayor gap a la zona activa de menor gap => recombinación.

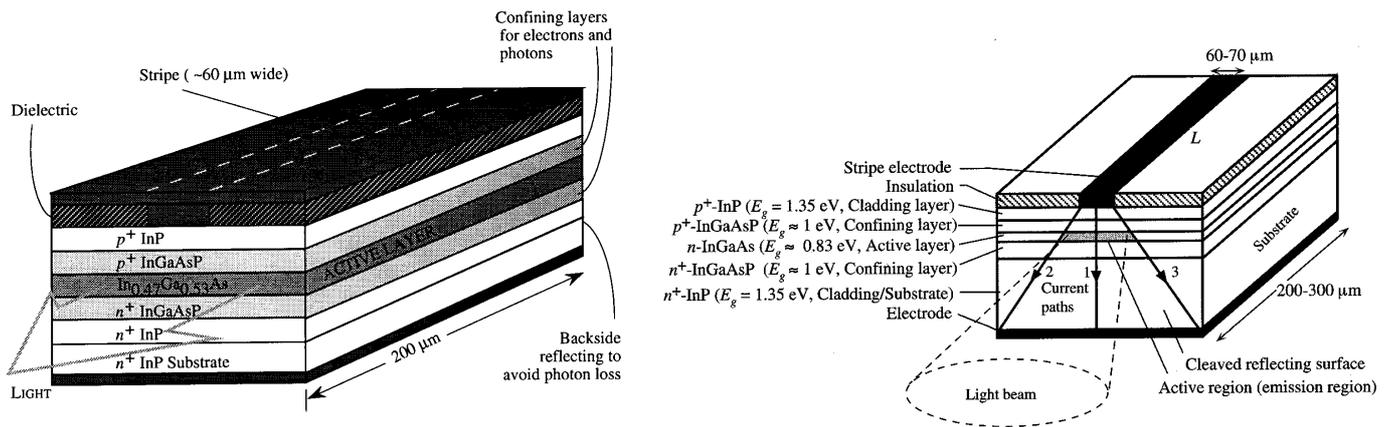
Como las otras zonas tienen un gap mayor no se produce reabsorción.



### B.5.5.2. LED de emisión lateral

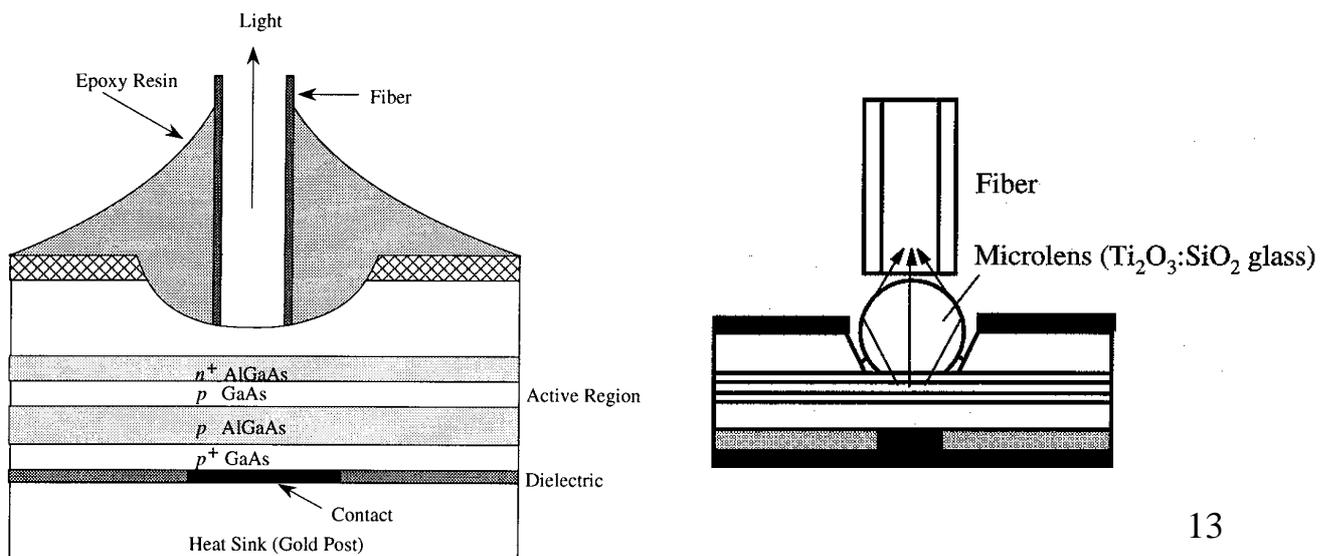
Se obtienen haces muy colimados => mejora el acoplamiento con fibras ópticas

Se recubre la zona activa con zonas de gran gap energético



### B.5.5.3. LED de emisión superficial

Al final del LED hay un orificio donde se acopla una fibra óptica. También se incluyen lentes para mejorar el acoplamiento con la fibra.



## B.5.6. Características de los LEDs

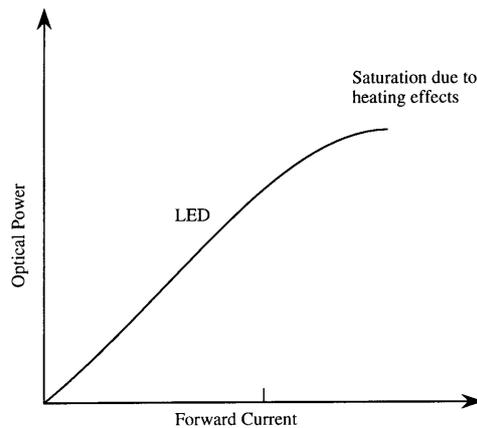
Hay que conocer las características luz-corriente, pureza espectral de la luz de salida, tiempo de respuesta y dependencia con la temperatura del LED.

### B.5.6.1. Característica luz - corriente

Eficiencia de la conversión de corriente a luz:  $\eta_{tot}$

$$I_{ph} = \text{número de fotones por segundo} = \eta_{tot} \frac{I}{e}$$

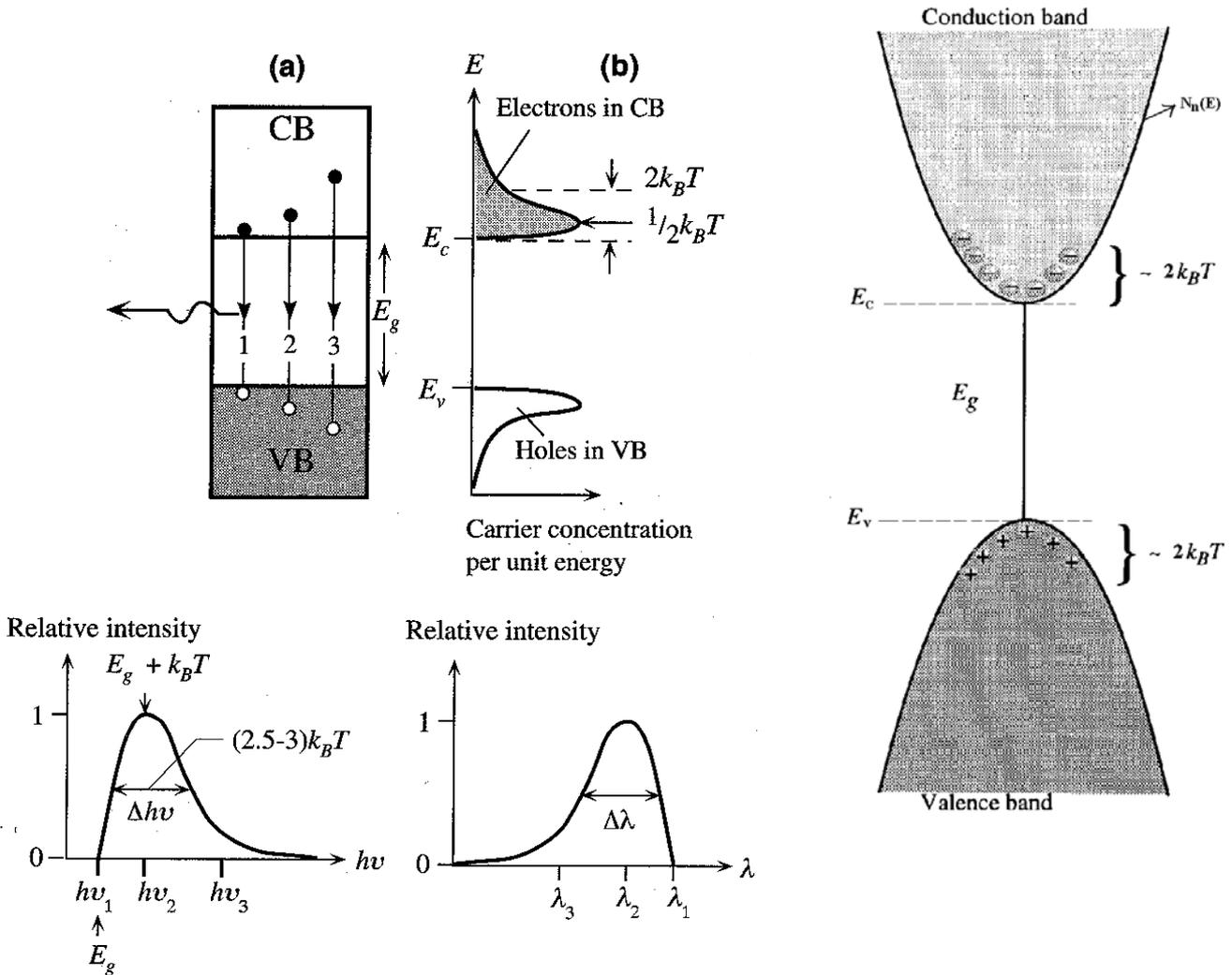
- relación  $I_{ph}$ -I es casi lineal
- a altos niveles de inyección el componente se calienta y la eficiencia de la recombinación radiante disminuye (saturación)



En LEDs de emisión superficial se produce una caída de la salida a altas corrientes debido a que la alta densidad de fotones produce emisión estimulada, pero en un plano diferente al de emisión.

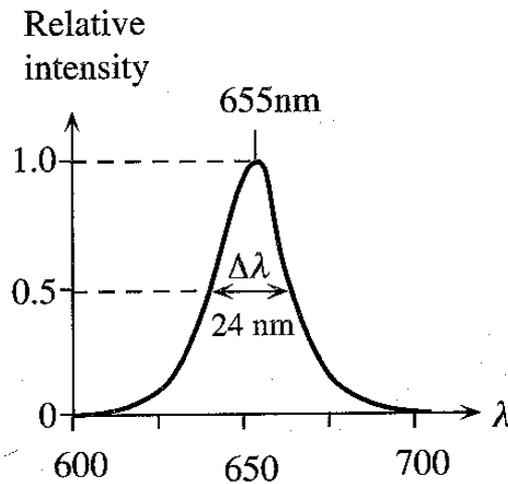
## B.5.6.2. Pureza espectral de los LEDs

Pureza espectral: muy importante en comunicaciones ópticas => para reducir la dispersión cromática.



- La energía del fotón para el pico de emisión es próxima a  $E_g + k_B \cdot T$  (transiciones de máximo a máximo en las distribuciones de energía de electrones y huecos).
- La anchura varía de forma típica entre  $2,5 \cdot k_B \cdot T$  y  $3 \cdot k_B \cdot T$ .

Si se consideran los efectos de alto dopado de las bandas energéticas y de alto nivel de inyección ==> menor asimetría.



### B.5.6.3. Respuesta temporal del LED

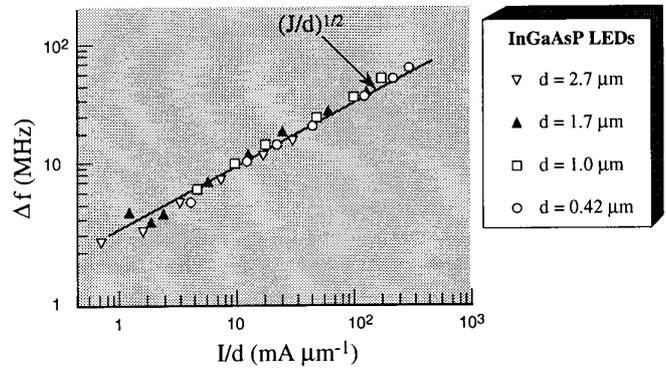
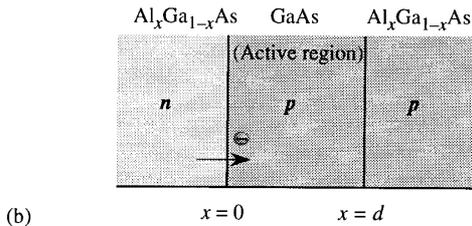
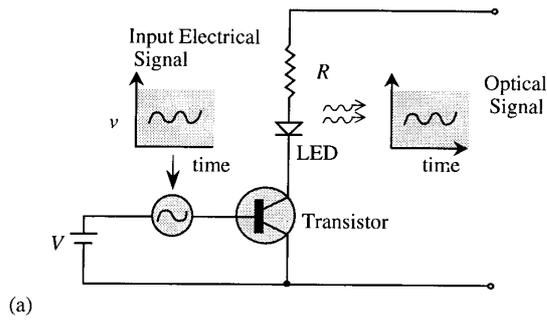
Para modular la señal luminosa ==> modular los portadores inyectados.

La respuesta temporal del LED se define como la relación entre la componente ac de la corriente fotónica y la componente ac de la corriente electrónica:

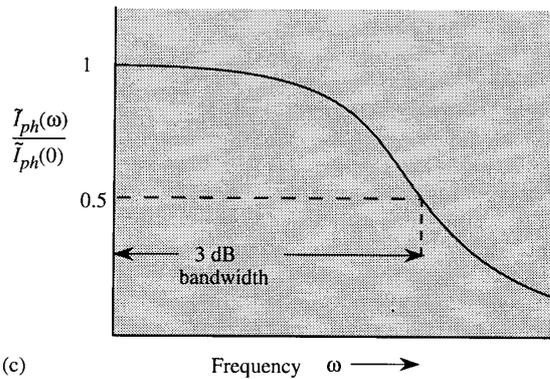
$$r(\omega) = \frac{e \cdot \tilde{I}_{ph}(\omega)}{\tilde{I}(\omega)} = \frac{1}{(1 + \omega^2 \cdot \tau^2)^{1/2}}$$

El ancho de banda  $f_c$  se define como la frecuencia a la que la potencia óptica vale la mitad de la potencia óptica a frecuencia cero:

$$f_c = \frac{\omega_c}{2 \cdot \pi} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \tau} \quad \text{con} \quad \frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{nr}}$$



Dependencia del ancho de banda con la corriente



Mejoras: aumentando el dopado de la región activa (zona p).

Tiempo de recombinación más corto en LEDs (régimen de alta inyección): 0,5ns

#### B.5.6.4. Dependencia con la temperatura de la emisión del LED

- i) corrientes de pérdidas muy altas
- ii) recombinación de Auger

Corriente de pérdidas llega al 30%

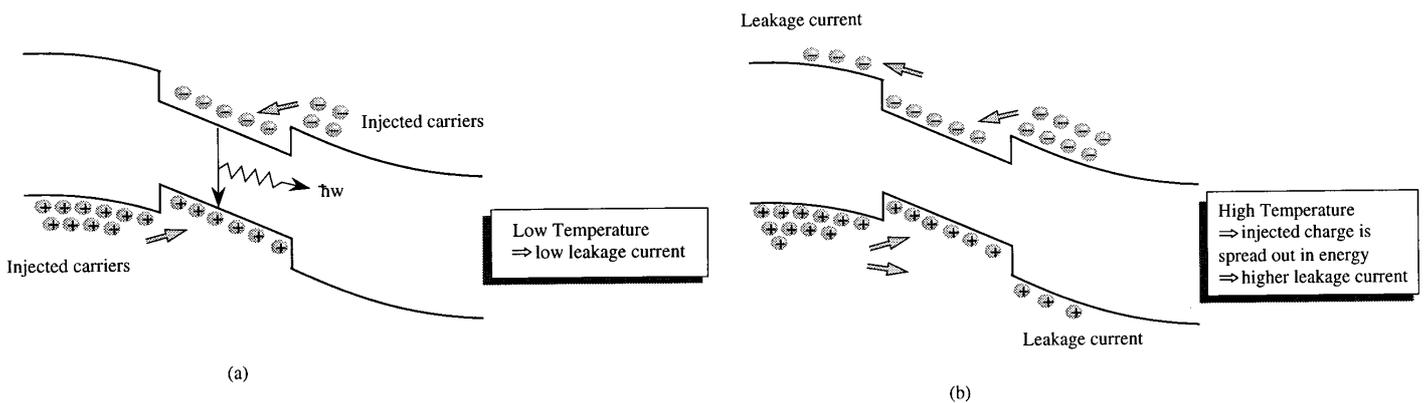
Solución: utilizar corrientes pulsantes => menor corriente eficaz

En materiales de gap estrecho ( $E_g < 1,0\text{eV}$ ) la recombinación de Auger es un proceso no radiante muy importante que además depende de la temperatura.

Corriente de pérdidas total:  $I_{ph} = I_{ph}(0)e^{-\frac{T}{T_1}}$

InAsGaP,  $T_1$  vale de 180K a 200K

GaAs,  $T_1$  vale de 300K a 350K



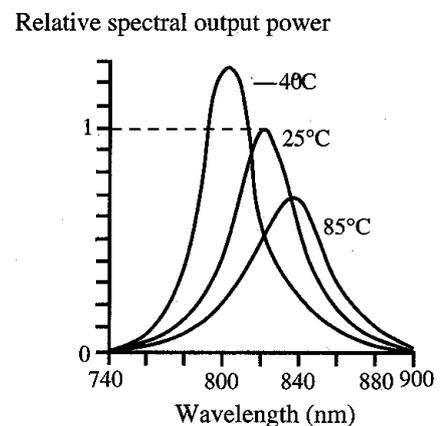
Desplazamiento del pico del espectro con T:

Mayor temperatura => menor  $E_g$

corrimiento de  $\lambda$

GaAs 3,5Å/K

InGaAsP 6Å/K

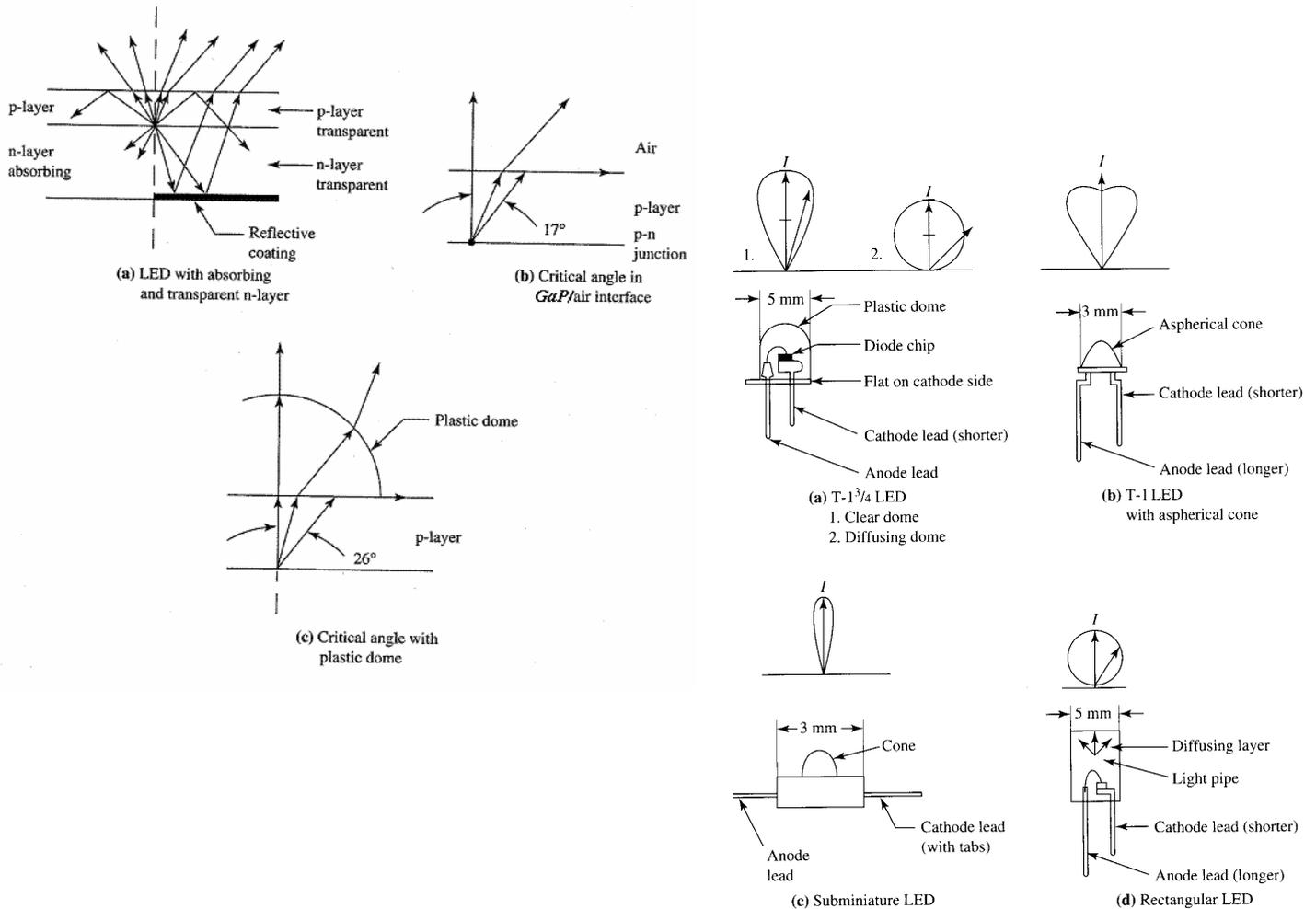


## B.5.6.5. Construcción del LED

=> se le añade encapsulado plástico: mayor robustez y ángulo de salida mejorado (de  $17^\circ$  a  $26^\circ$ )

Nomenclatura: T-1 3/4 o T-1

- primer término: encapsulado
- segundo término: diámetro



### B.5.6.6. Características ópticas y eléctricas

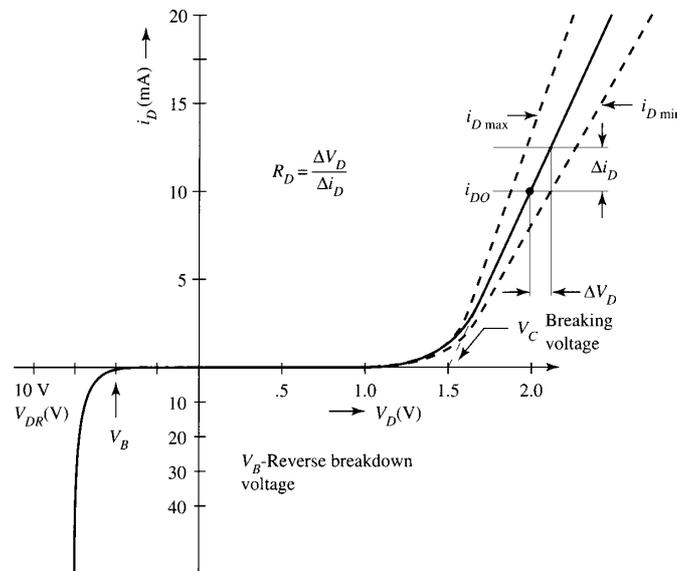
LED: diodo p-n, con tensión de codo entre 1,2V y 2V y tensión de ruptura de 5V

=> limitación más importante = la potencia disipable

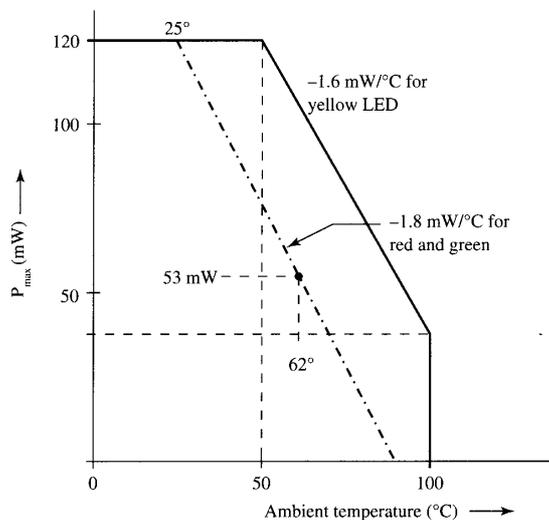
$$P_D = i_D V_D$$

Mayor rendimiento con corriente pulsante:

$$P_{avg} = i_{avg} [V_{DO} + R_D(i_p - i_{DO})]$$

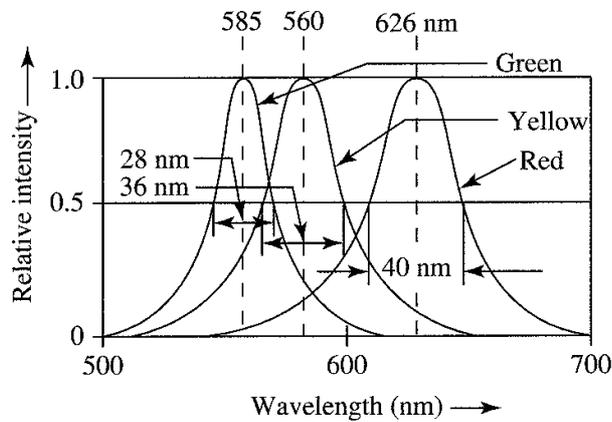
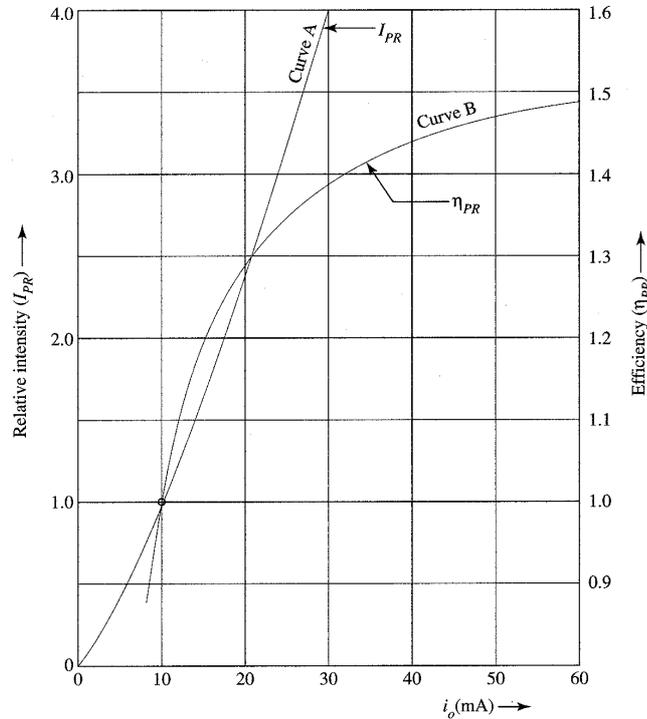


(a)  $V_D/i_D$  characteristic of LED



(b) Maximum permissible power dissipation

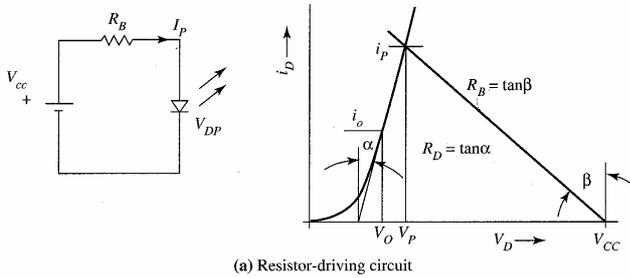
Intensidad luminosa promedio: 
$$I_{PRavg} = I_{PRO} \cdot \frac{i_P \cdot d_c \cdot \eta_{PR}}{i_0 \cdot \eta_{PRO}}$$



El coeficiente de temperatura de la intensidad luminosa ( $I_{PR}$ ) es de  $-1\%/K$  (un aumento de  $25^\circ C$  disminuye la intensidad un  $25\%$ )

LED: mucho más rápido que las fuentes de luz incandescentes

### B.5.6.7. Circuitos de excitación para los LEDs



(a) Resistor-driving circuit

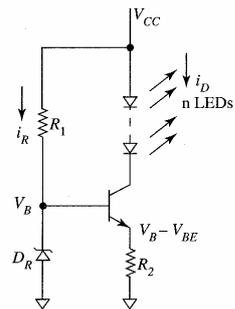
Diseño con recta de carga

$$R_B = \frac{V_{cc} - V_0}{i_P} - R_D \frac{i_P - i_0}{i_P}$$

Diseño:

$$R_1 = (V_{CC} - V_B) / i_R$$

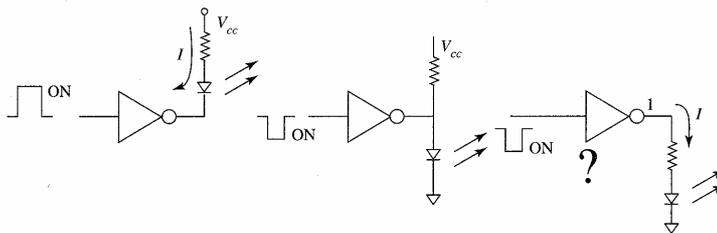
$$R_2 = (V_B - V_{BE}) / i_D$$



(b) Transistor constant current drive

LEDs serie: ¡SI!

LEDs paralelo: ¡NO!



(c) Digital drive circuits

Problema: las familias lógicas presentan una corriente limitada para salida en estado alto.

### B.5.7. Aplicaciones de los LEDs

- a) visualizador
- b) comunicaciones ópticas
- c) optoacoplador

- a) visualizador

- son elementos activos => mayor brillo

- se deben poder generar todos colores

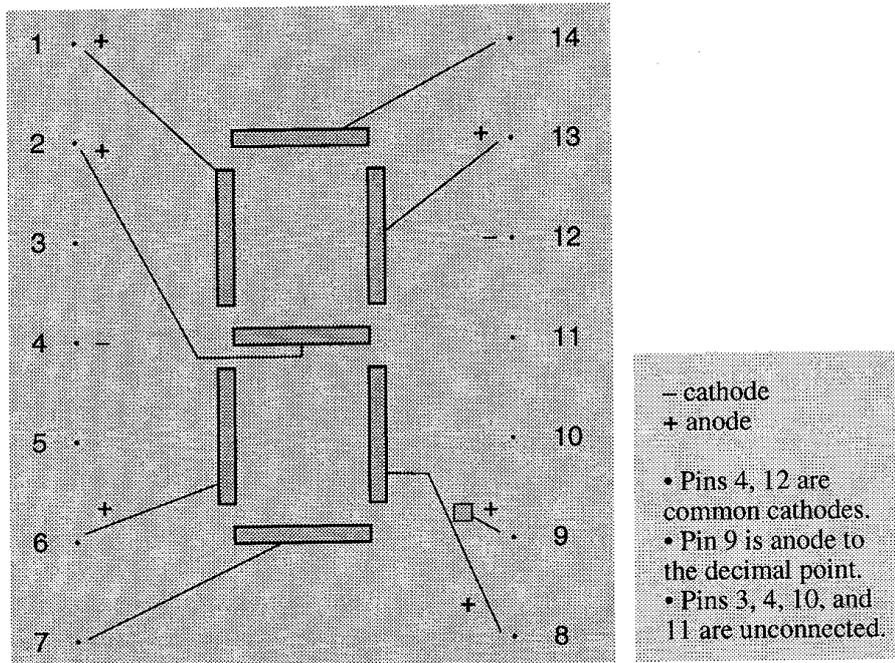
rojo => aleaciones de AlGaAs

verde => GaP

azul => muy difícil, GaN y ZnSe

- El LED se puede utilizar como indicador o en matrices

En ambos casos obtenemos mucho brillo, bajo coste y bajo consumo frente a bombillas (no frente a cristales líquidos)

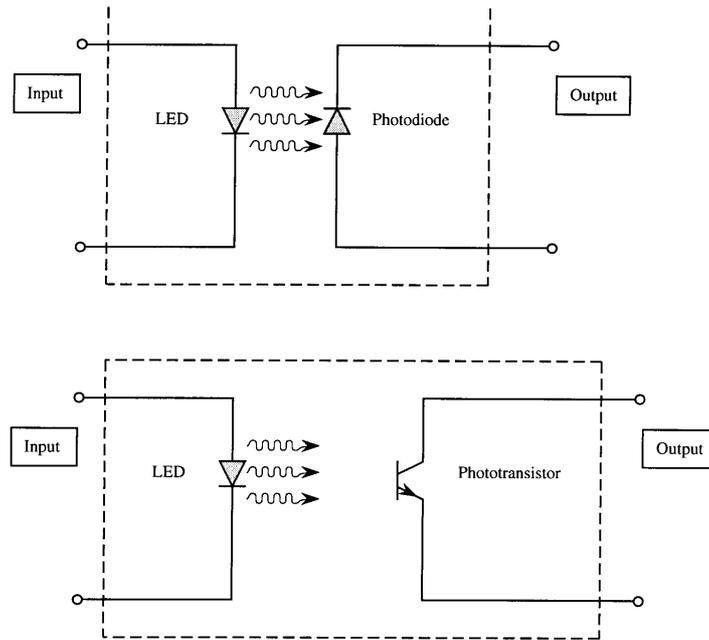


### b) comunicaciones ópticas

- comunicaciones a corta distancia (debido a la dispersión cromática)
- baja velocidad de transmisión (hasta 1GHz)

### c) optoacoplador

- provee aislamiento galvánico (fuentes de alimentación, aplicaciones médicas, etc.)
- sustituye a trafos, condensadores de bloqueo y relés.



## Fiabilidad de los LEDs

3 tipos de fallos

1) “fallo infantil”: el LED se destruye durante el quemado inicial (“burn in”) debido a fallos en el proceso de fabricación

2) “fallo por malformación” = “freak failure”: el LED se destruye después del (“burn in”) debido a fallos no manifestados hasta ese momento

3) “fallo por envejecimiento”: el LED se degrada y envejece con el tiempo

- para comunicaciones interesa conocer la pérdida de potencia con el tiempo

- la degradación con el tiempo se debe a un aumento de la recombinación no radiante (en los LDs este fallo es catastrófico)