



| <i>BLOQUE</i> | <i>TÍTULO</i> |
|-----------------|--|
| <i>Tema 0</i> | Introducción a las Comunicaciones ópticas |
| <i>BLOQUE I</i> | La transmisión de información por enlaces básicos de comunicación por fibra óptica |
| <i>I.1.-</i> | Generación de la portadora: fuentes de luz |
| <i>I.2.-</i> | Modulación de la portadora óptica con la información |
| <i>I.3.-</i> | Multiplexación de varias fuentes de información |
| <i>I.4.-</i> | Transmisión de información por la fibra óptica |
| <i>I.5.-</i> | La detección de la información: receptores ópticos |
| <i>I.6.-</i> | Componentes activos y pasivos |

| <i>BLOQUE</i> | <i>I.1. Generación de la portadora: fuentes de luz</i> |
|------------------|--|
| <i>Objetivos</i> | <p>Se pretende que el alumno sea capaz de:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Justificar el empleo de semiconductores en la construcción de emisores y detectores de luz. • Describir de manera muy sencilla los fenómenos de interacción radiación-materia relevantes en la generación y detección de fotones. • Identificar el principio de funcionamiento de LED y LD. • Explicar las condiciones necesarias para la oscilación láser. • Comprender el efecto sobre la transmisión de señal en fibra óptica de las características de las fuentes de semiconductor. • Elegir la fuente adecuada para cada tipo de aplicación. • Advertir la necesidad de circuitos electrónicos asociados a la fuente de luz y describir brevemente cuáles serían sus funciones. |
| <i>Duración</i> | 3 horas |
| <i>Programa</i> | <p>Fundamentos de la emisión óptica Diodos emisores de luz, LED Diodos láser, LD Comparación de las características de emisores LED y LD Circuitos electrónicos en el emisor (drivers). Otras cuestiones prácticas. Resumen y conclusiones</p> |

- 
- Fundamentos de la emisión óptica
 - Diodos emisores de luz, LED
 - Diodos láser, LD
 - Comparación de las características de LED y LD
 - Circuitos electrónicos en el emisor (drivers). Otras cuestiones prácticas.
 - Resumen y conclusiones
- 



■ Fundamentos de la emisión óptica

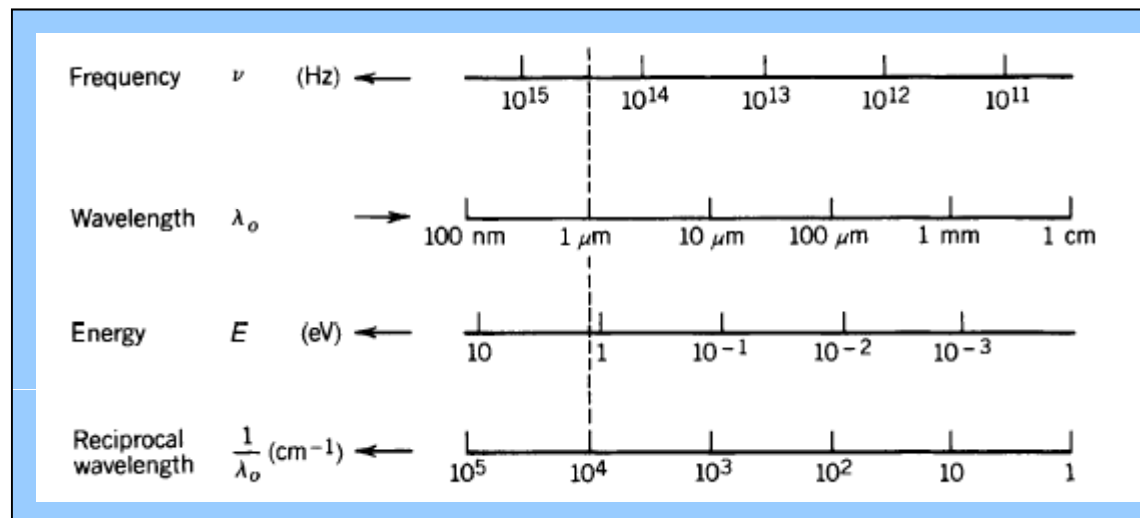
- Diodos emisores de luz, LED
- Diodos láser, LD
- Comparación de las características de LED y LD
- Circuitos electrónicos en el emisor (drivers). Otras cuestiones prácticas.
- Resumen y conclusiones



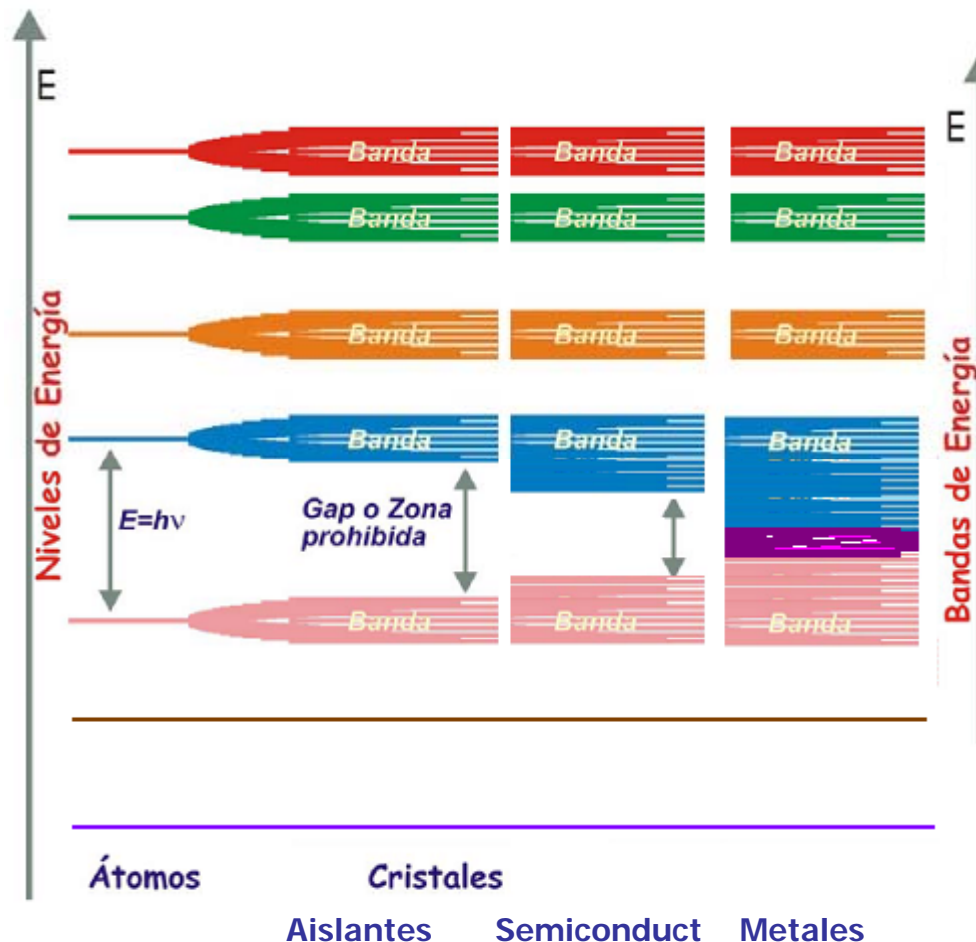
Los fenómenos que explican el funcionamiento de los emisores de luz se explican adecuadamente mediante el estudio de las **interacciones entre luz-materia**, considerando la luz compuesta por una serie de partículas, llamadas **fotones**

- Los fotones son de masa cero y transportan energía electromagnética. Tienen asociados un momento y un momento angular (spin).
- La energía asociada a un fotón es $E = h\nu = \hbar\omega$ con $h = 6.63 \cdot 10^{-34}$ J·s, la constante de Planck y ν la frecuencia de la onda asociada al fotón

La **energía de la luz está cuantizada** en niveles separados por E

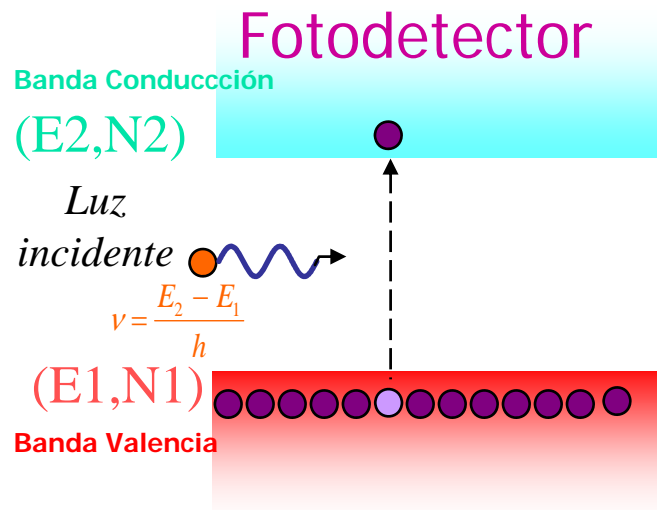


También los **átomos y moléculas** presentan niveles de energía discretos. Pero al unirse para formar estructuras más complejas interactúan y los niveles de energía más altos pasan a formar **bandas de energía** separadas por bandas de energía *prohibidos*.



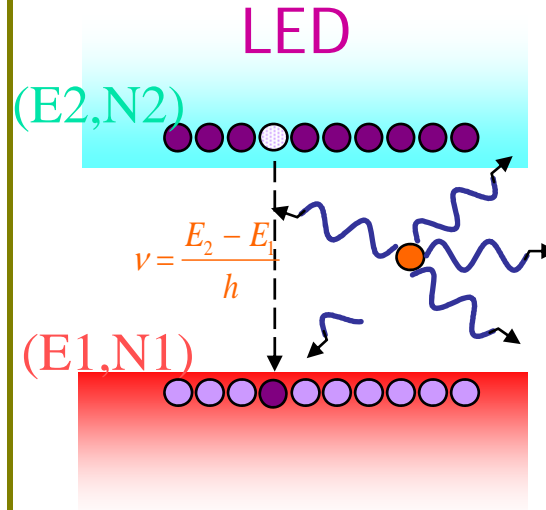
La separación energética entre la última banda llena de electrones (banda de valencia) y la banda superior que estará o no ocupada (banda de conducción) determina las propiedades eléctricas del material, definiéndolo como **metal, semiconductor o aislante**. Esta separación se llama **gap** y tiene una energía E_g

La interacción entre fotones y materia (semiconductores) se explica con tres mecanismos básicos



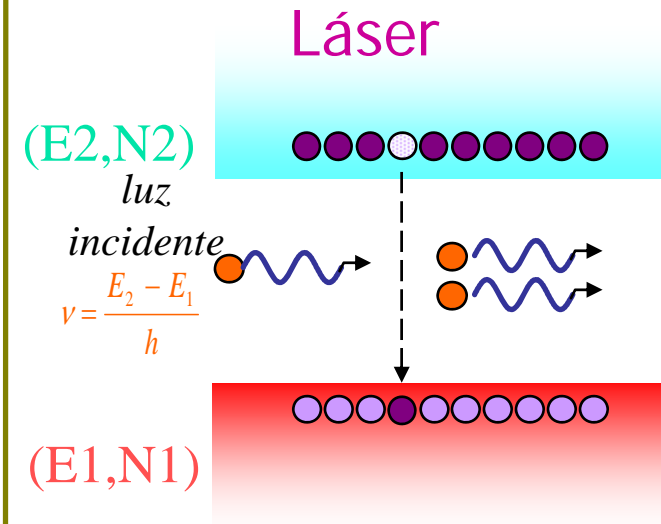
Absorción

- Un fotón incide en el material
- La energía del fotón es absorbida por el material, que queda en un estado de mayor energía
- Un electrón pasa de la banda de valencia a la de conducción



Emisión Espontánea

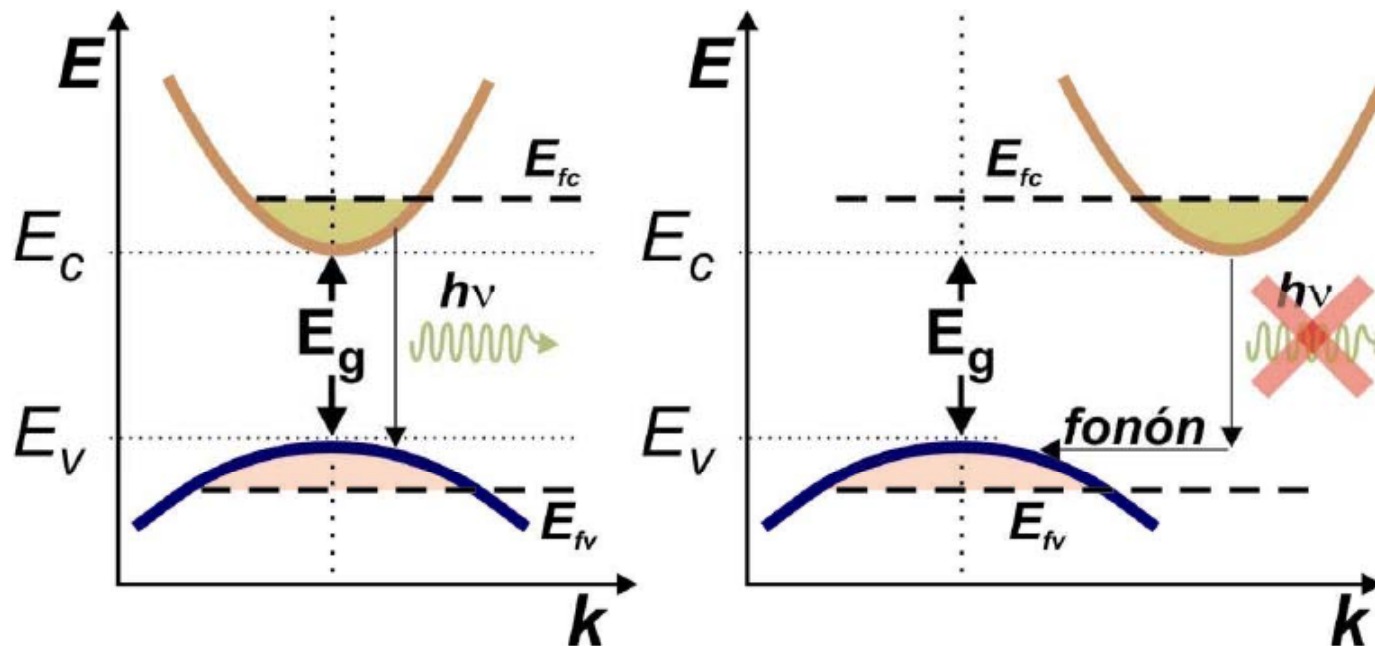
- Un electrón pasa de la BC a la BV, donde se recombina con un hueco
- El sistema pasa a un estado de menor energía
- Se genera un fotón (de fase y direcc. propagación arbitrarias)



Emisión Estimulada

- Un fotón incide en el material
- Un electrón pasa de la BC a la BV, donde se recombina con un hueco
- Se genera un fotón (de fase y direcc. propagación idénticas al incidente)

Las bandas de energía dependen de k (vector de onda), es decir, de la dirección. Se emplean por ello los **diagramas E-k**. Se distinguen entre semiconductores de gap directo y de gap indirecto



Semiconductor directo: el mínimo de la BC coincide con el máximo de la BV. Electrones y huecos pueden recombinarse con facilidad.

Ej: GaAs, InP, AlGaAs, InGaAsP

Semiconductor indirecto: el mínimo de la BC no coincide con el máximo de la BV. La recombinación de electrones y huecos implica un fonón

Ej: Si, Ge, GaP (con N puede emitir fotones)

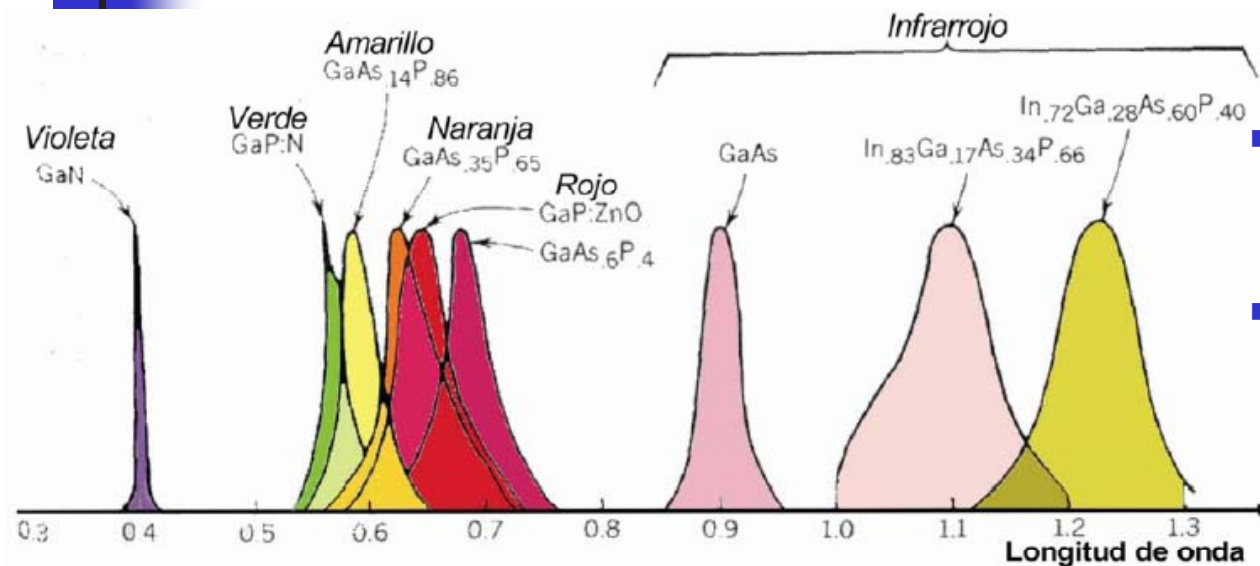


Figura 3. Espectros de emisión de algunos materiales III-V empleados en dispositivos optoelectrónicos

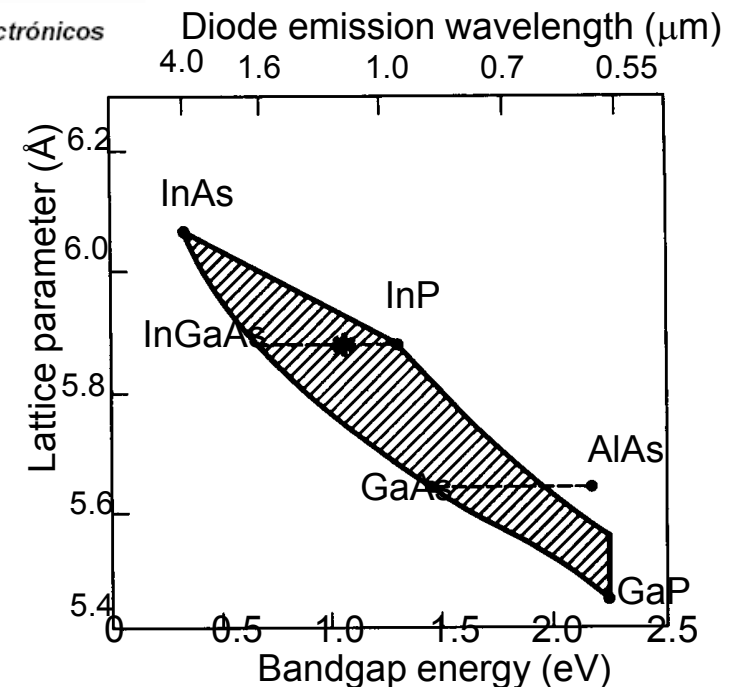
■ Fuentes basadas en GaAs

$\lambda = 700 - 900 \text{ nm}$

■ Fuentes basadas en InP

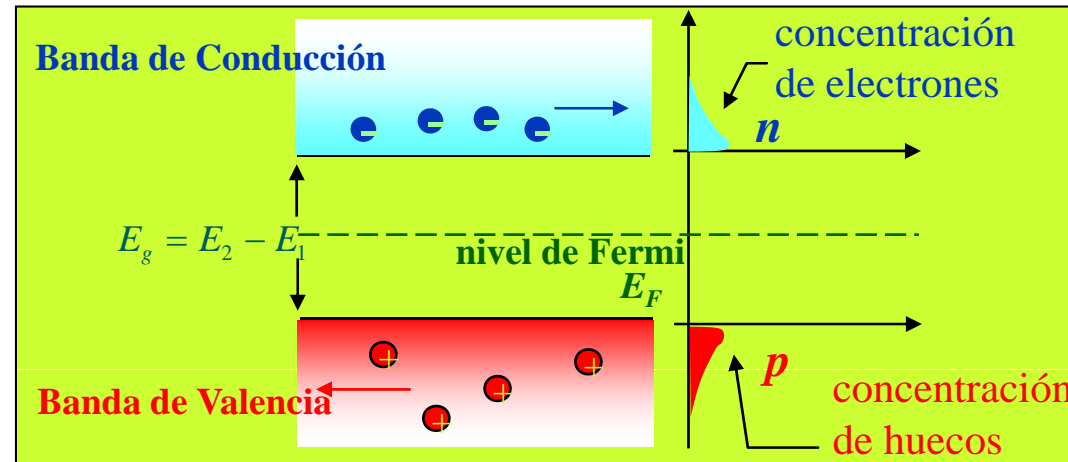
$\lambda = 900 - 1650 \text{ nm}$

- Se usan siempre semiconductores compuestos III-V
- Se ajusta frecuencia y tamaño de celda empleando compuestos ternarios y cuaternarios
- Materiales para fuentes en 1ª ventana:
 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$
- Materiales para fuentes en 2ª y 3ª ventana:
 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$

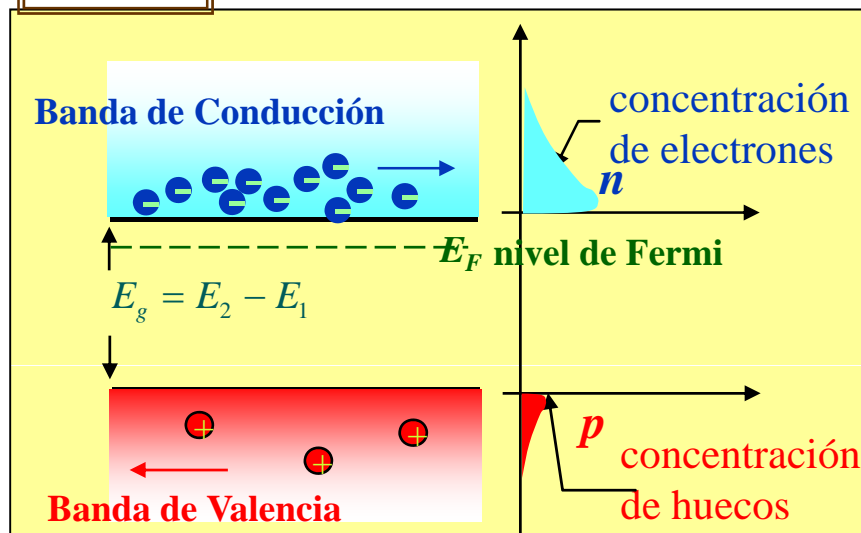


La posición del nivel de Fermi puede moverse dentro del gap introduciendo impurezas es decir, depende de si el semiconductor es intrínseco, dopado N o dopado P. Con mucho dopado, puede incluso llevarse al interior de la banda de conducción (N) o valencia (P), es el caso de los semiconductores degenerados

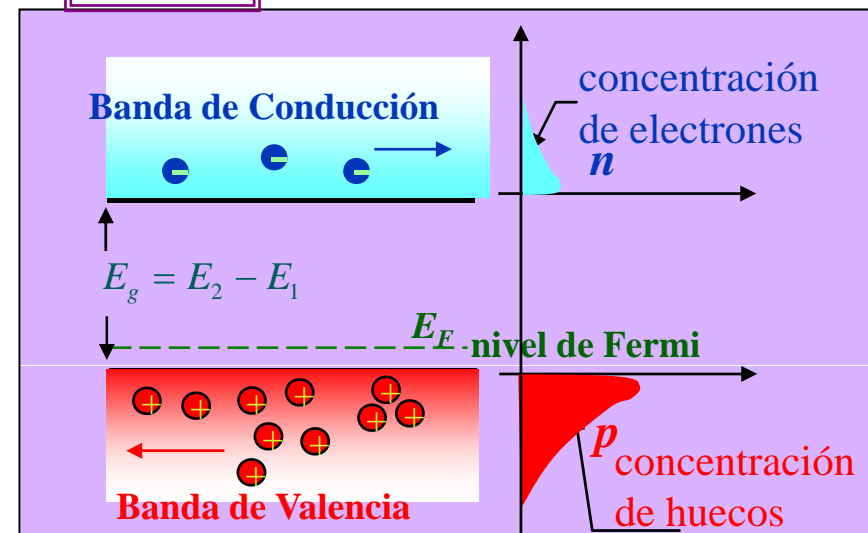
Intrínseco



Tipo N

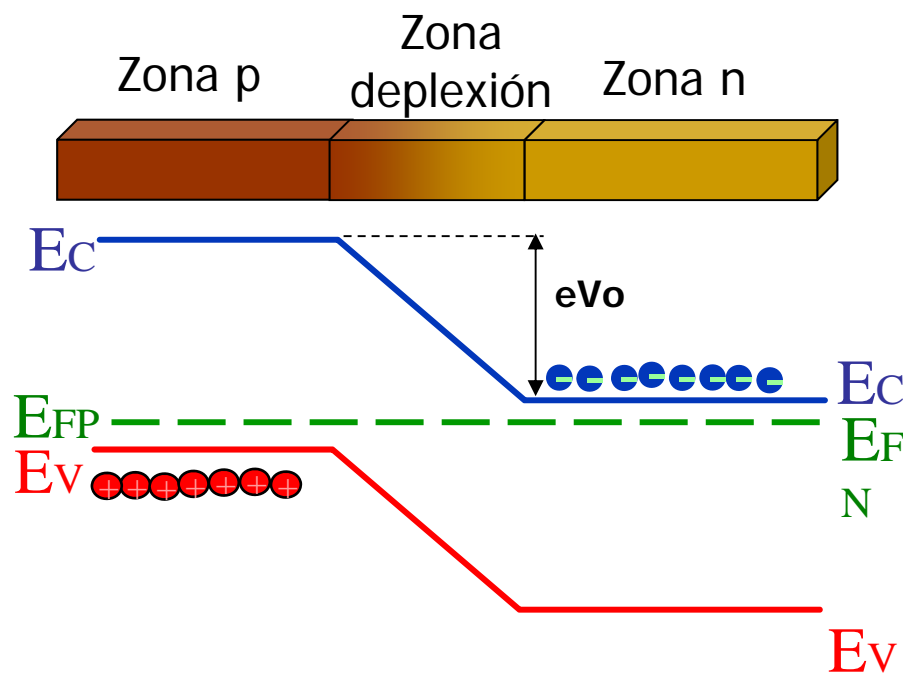


Tipo P

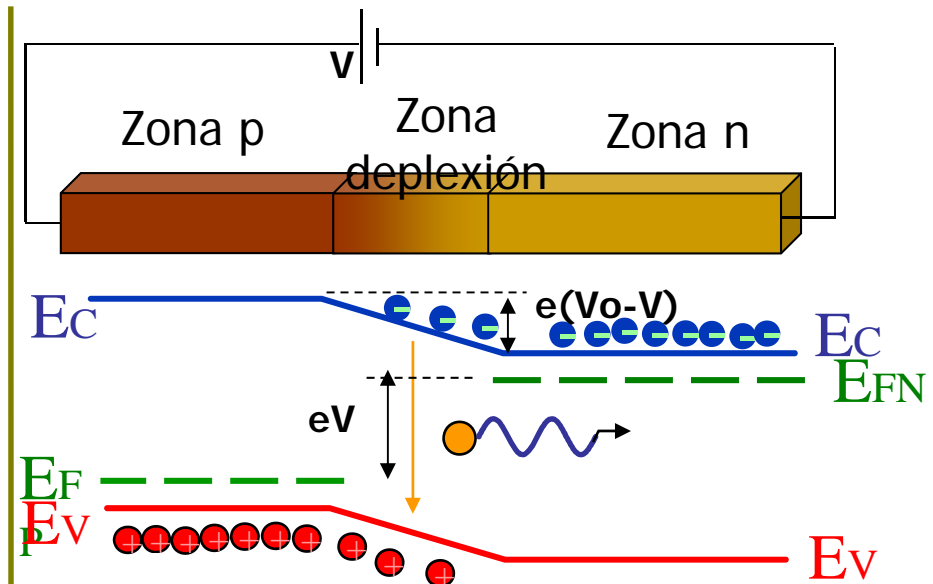


En cualquier semiconductor se puede producir absorción, emisión estimulada y emisión espontánea. Para que domine la emisión espontánea se necesitan altos niveles de e^- y h^+ simultáneamente en un mismo sitio, como en una **unión pn polarizada en directo**

También puede explicarse como la necesidad de que $E_{fc} - E_{fv} > E_2 - E_1 > E_g$
En equilibrio termodinámico $E_{fc} = E_{fv}$, por lo que hay que romper dicha condición aportando energía externa. Por ejemplo, mediante una **unión pn polarizada en directo**

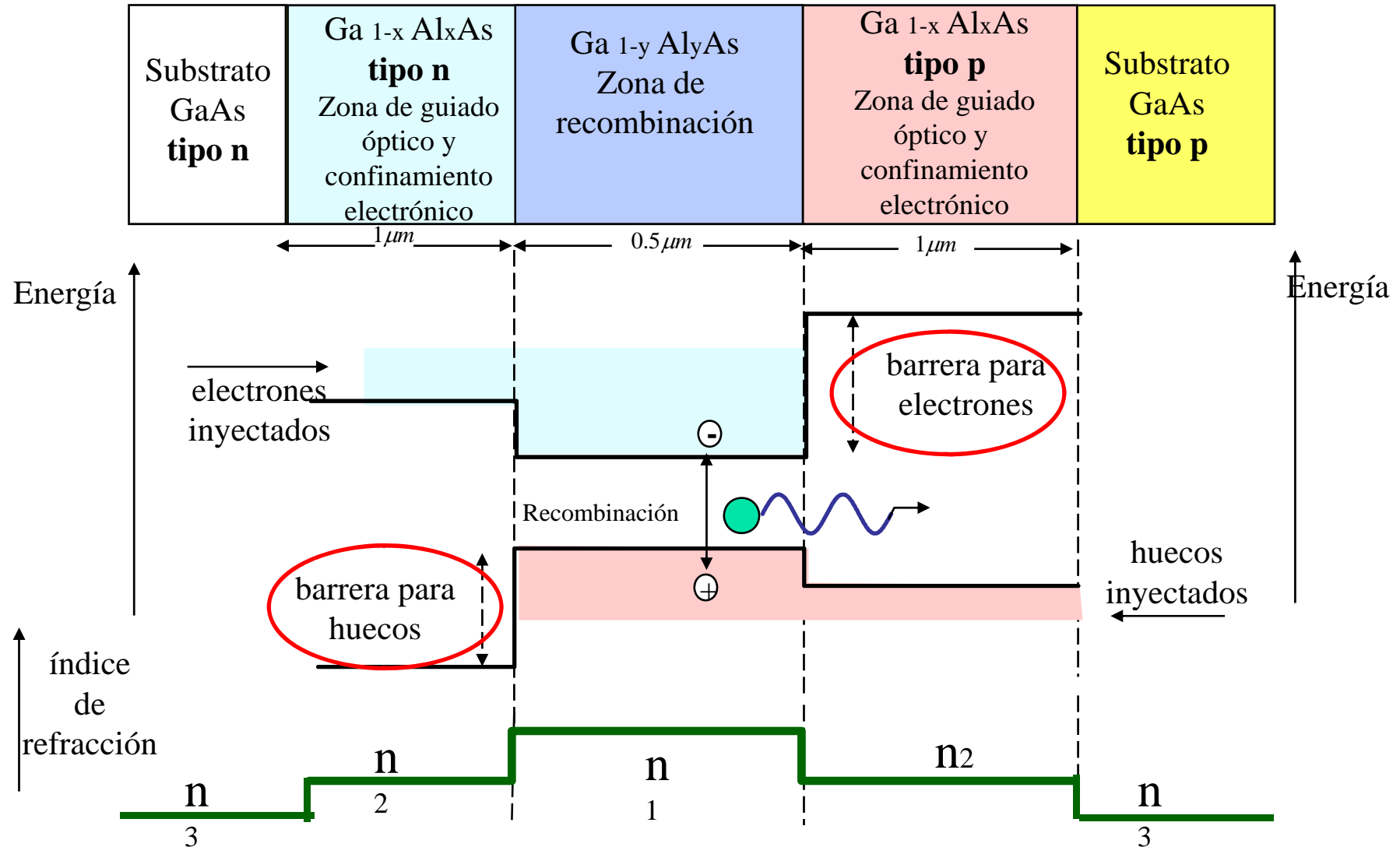



Unión P-N no polarizada: no produce emisión de luz



Unión P-N directo: se producen recombinaciones e-h en la zona de depleción que pueden ser radiantes

Formando las llamadas **heteroestructuras** se consigue confinar los portadores eléctricos, así como el confinamiento o guiado de la luz producida



- 
- Fundamentos de la emisión óptica
 - Diodos emisores de luz, LED
 - Diodos láser, LD
 - Comparación de las características de LED y LD
 - Circuitos electrónicos en el emisor (drivers). Otras cuestiones prácticas.
 - Resumen y conclusiones

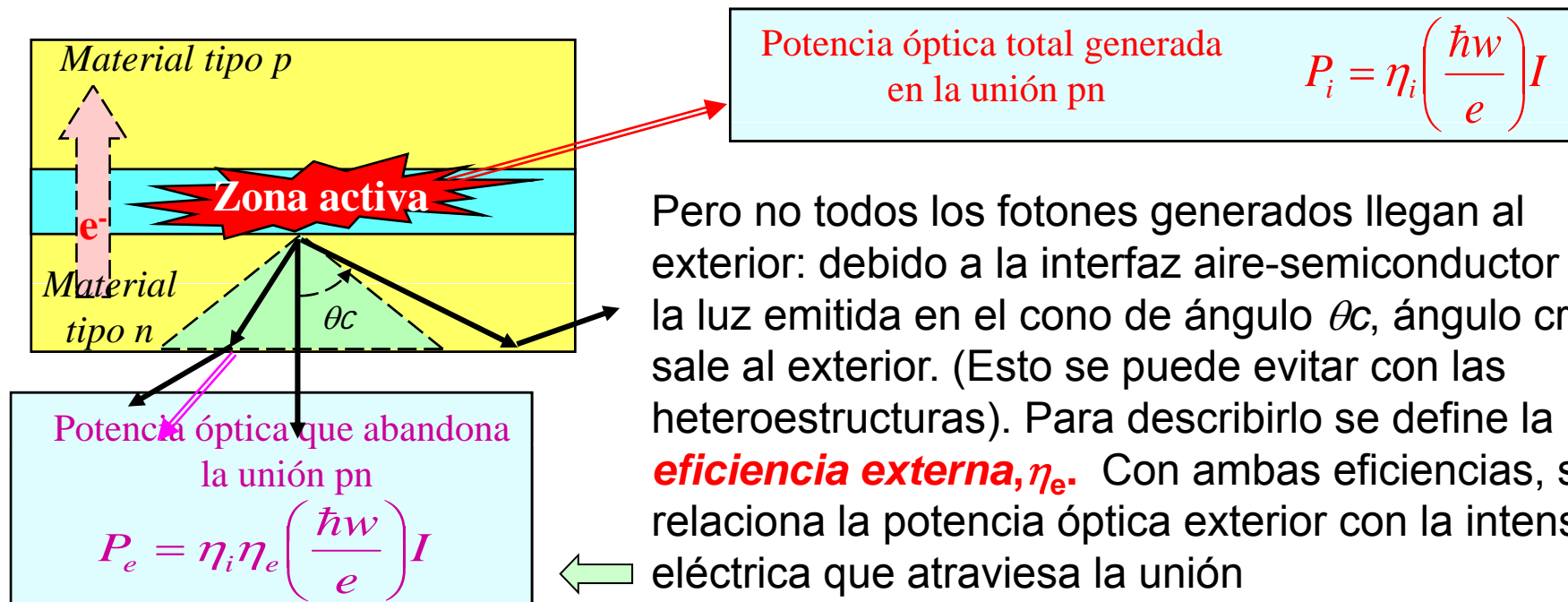


Fundamentos y eficiencia en un Diodo Emisor de Luz (LED: *Light-Emitting Diode*)

Un LED es una unión *p-n* que, polarizada en directa, emite luz por **emisión espontánea**, es decir, se generan fotones que son emitidos en direcciones aleatorias sin relación de fase entre ellos y, por tanto, la luz emitida es **incoherente**.

Los fotones son generados por la **recombinación radiativa** de electrones y huecos cuya tasa es R_r . No todas las recombinaciones e-h producen fotones, las que no lo hacen se llaman *no radiativas* y su tasa es R_{nr} . Ambas compiten entre sí en un semiconductor.

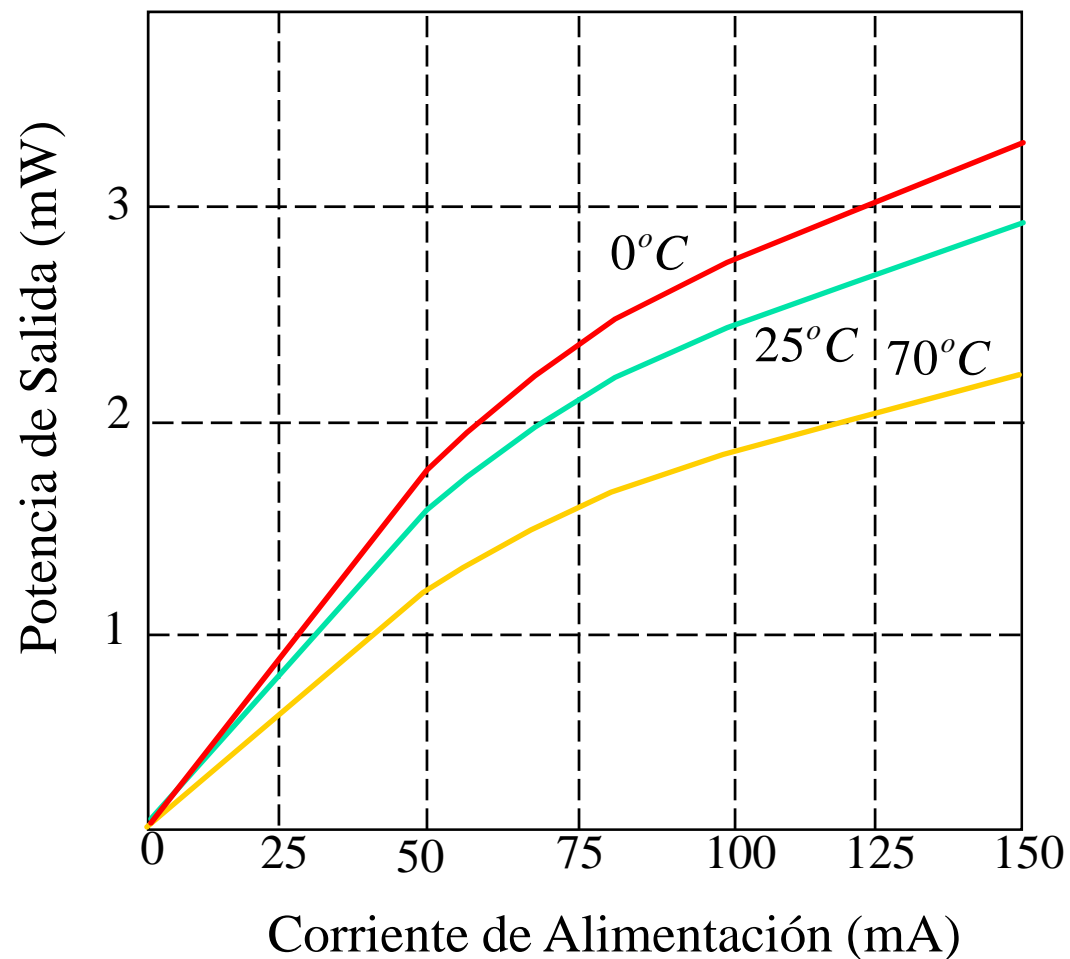
Para obtener una fuente óptica han de dominar las primeras. Esto se mide con la llamada **Eficiencia Cuántica Interna** $\eta_i = R_{rr} / (R_{rr} + R_{nr})$, relacionada con la potencia óptica generada en el interior del LED



Pero no todos los fotones generados llegan al exterior: debido a la interfaz aire-semiconductor sólo la luz emitida en el cono de ángulo θ_c , ángulo crítico, sale al exterior. (Esto se puede evitar con las heteroestructuras). Para describirlo se define la **eficiencia externa, η_e** . Con ambas eficiencias, se relaciona la potencia óptica exterior con la intensidad eléctrica que atraviesa la unión

Relación I-P
en un LED

$$P_e = \eta_i \eta_e \left(\frac{\hbar \omega}{e} \right) I$$



Relación aprox. **lineal**, aunque a altos valores de intensidad o temperatura tiende a **saturarse**, debido al aumento de la recombinación no-radiactiva

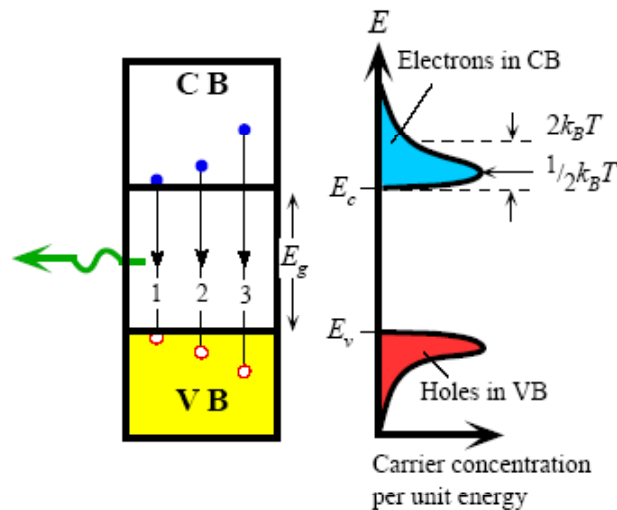
Eficiencia Cuántica Total

$$\eta_{tot} = \frac{P_e}{VI} = \eta_e \eta_i \left(\frac{\hbar \omega}{eV} \right)$$

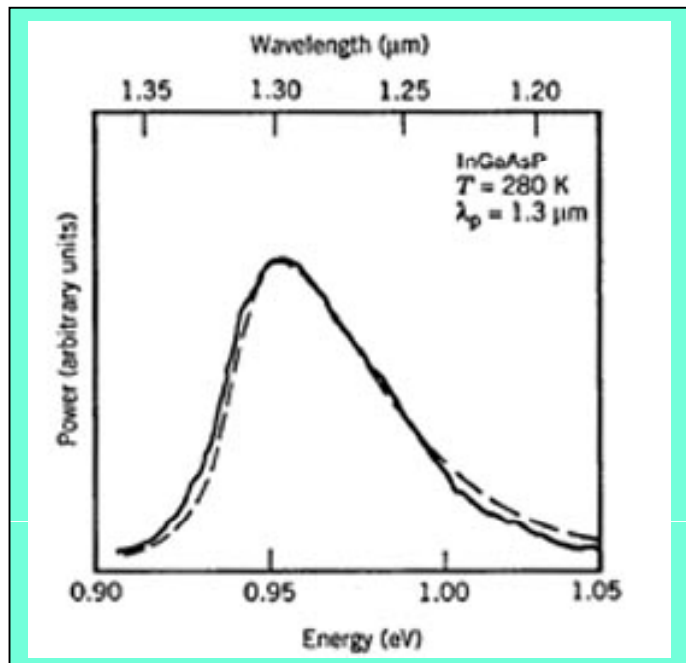
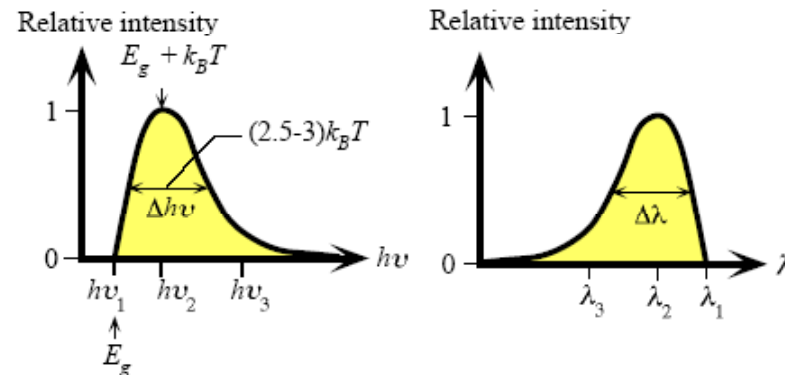
Responsividad

$$R = \frac{P_e}{I} = \eta_e \eta_i \left(\frac{\hbar \omega}{e} \right) = V \eta_{tot}$$

Espectro de emisión de LED



$$R_{\text{spon}}(\omega) = A_o \sqrt{\hbar\omega - E_g} e^{-\frac{\hbar\omega - E_g}{k_B T}}$$



Ancho espectral (FWHM):

$$\Delta\lambda = 1.8k_B T \left(\frac{\lambda^2}{ch} \right)$$

Ejemplo: $T = 25^\circ\text{C}$

$$\lambda = 850 \text{ nm} \quad \Delta\lambda = 27 \text{ nm}$$

$$\lambda = 1300 \text{ nm} \quad \Delta\lambda = 63 \text{ nm}$$

La anchura aumenta al aumentar la longitud de onda central.

También depende de la temperatura

Por lo general, se consiguen anchos espectrales de 20-60 nm, limitando el bit rate a 10-100 Mb/s

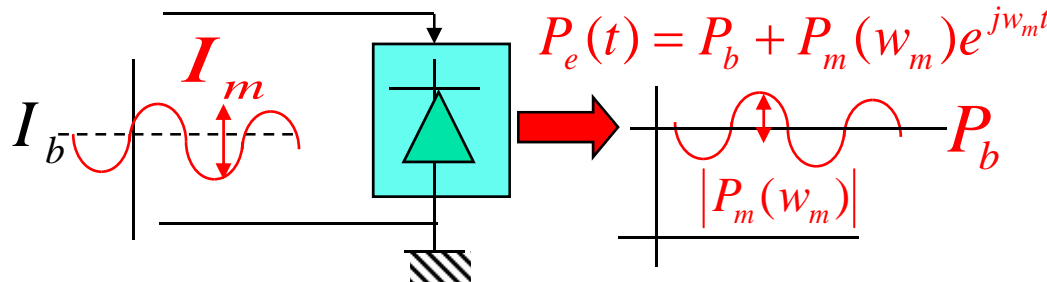
Modulación en LED

Intensidad aplicada a la fuente

$$I(t) = I_b + I_m e^{j\omega_m t}$$

Modulación en
pequeña señal

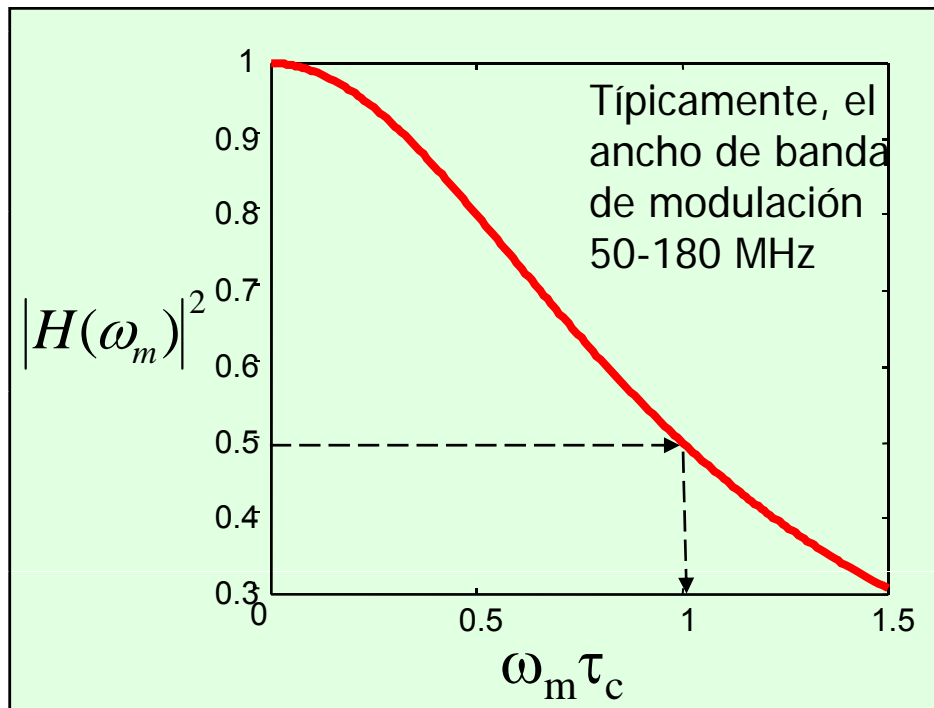
$$I_m \ll I_b$$



La ecuación de emisión del LED relaciona la densidad de portadores, $n(t)$, y la potencia emitida con la intensidad eléctrica y el tiempo de vida medio de dichos portadores

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{I(t)}{eV_{act}} - \frac{n(t)}{\tau_c}$$

$$P_e = \eta_i (h\nu) \frac{n(t)V_{act}}{\tau_c}$$



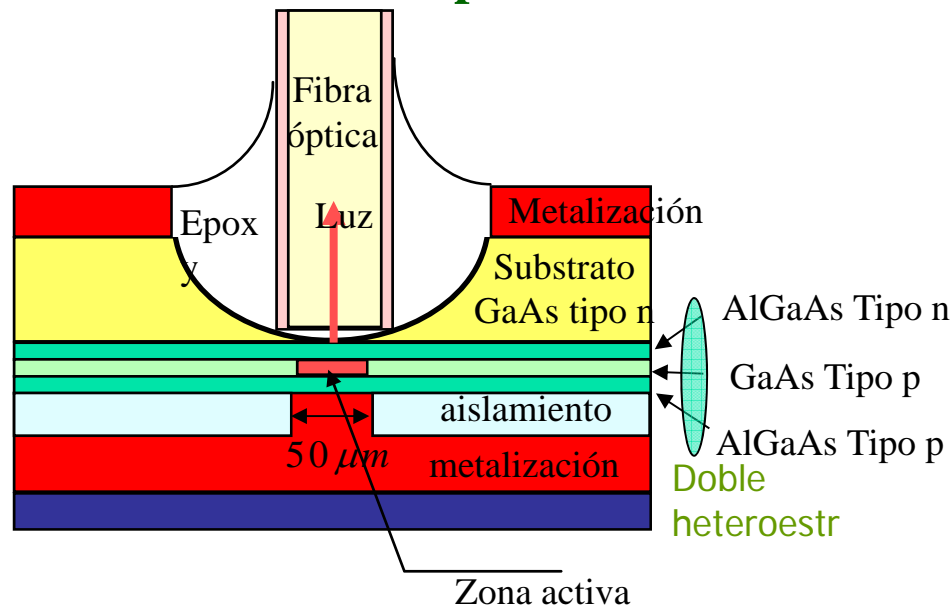
Con su solución se encuentra la respuesta en frecuencia a la modulación y el correspondiente ancho de banda de modulación

$$H(\omega_m) = \frac{P_m(\omega_m)}{P_m(0)} = \frac{1}{1 + j\omega_m \tau_c}$$

$$\Delta f_{3dB} = \frac{1}{2\pi\tau_c}$$

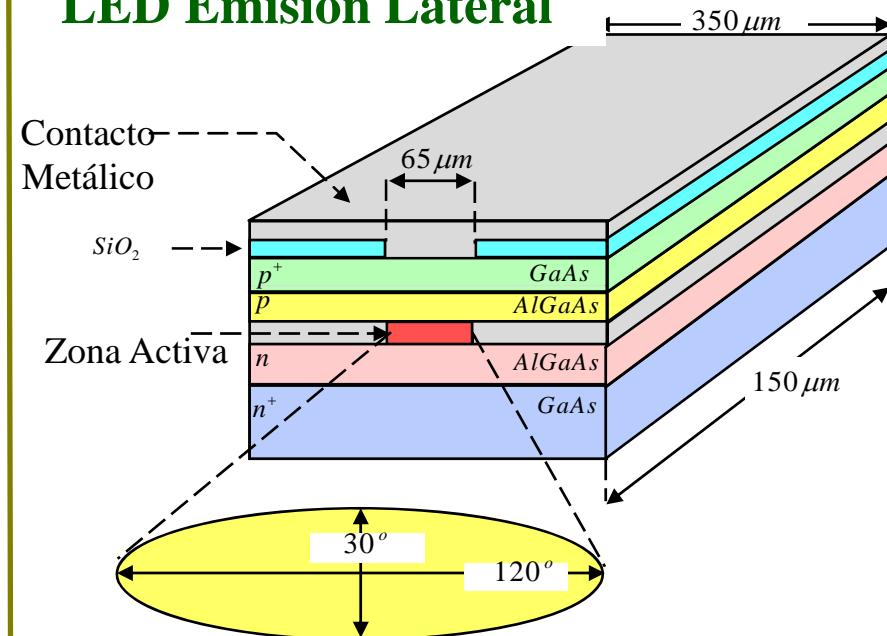
Tipos básicos de LED

LED Emisión Superficial



- También llamado LED tipo **Burris**
- El área de emisión es pequeña, tamaño comparable con el área del núcleo de la fibra.
- Divergencia de 120°, en ambas direcciones. Fuente lambertiana
- Simples, robustos
- No incorporan guiado



LED Emisión Lateral



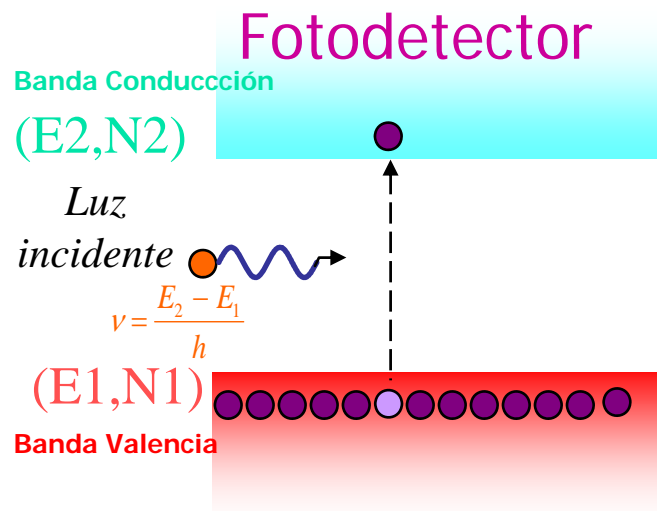
- El ancho de banda de modulación es ~200 MHz, mayor que los de emisión superficial
- Divergencia asimétrica, de 30° en la dirección perpendicular a la unión. Mejor acoplo a fibra de baja AN
- Suelen ser de menor potencia
- Sí incorporan guiado

Características del LED.

- Basados en emisión espontánea (luz no coherente) en unión P-N polarizada en directa
- Altos valores de eficiencia cuántica interna (50-80%), aunque la eficiencia externa es mucho menor (1-5%). Bajas potencias ópticas de salida (típ. 0.1-1 mW)
- Relación $P_{\text{opt}}-I_{\text{elec}}$ lineal (saturación a altas I_{elec}), sin umbral
- Espectro de emisión ancho (30-100 nm)
- Pueden ser modulados sin dificultad hasta velocidades de 100-200 Mb/s y en algunos casos hasta velocidades de 1 Gb/s.
- Su geometría y patrón de radiación es de alta divergencia, el acoplo de luz a la fibra óptica monomodo es difícil, especialmente en los LED de emisión superficial.
- Son de fácil fabricación y por lo tanto su coste es bajo en comparación con los láseres de semiconductor.
- Son dispositivos fiables, ya que no sufren la degradación de tipo catastrófico y son menos sensibles que los láseres de semiconductor a la degradación por envejecimiento.
- Su circuitería de alimentación y control es muy sencilla, debido a los bajos niveles de corriente que son necesarios para que funcione el dispositivo y a su relativa inmunidad frente a variaciones de la temperatura.

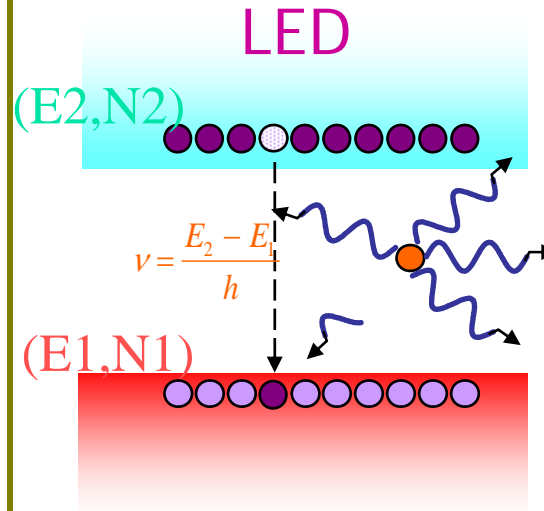
- 
- Fundamentos de la emisión óptica
 - Diodos emisores de luz, LED
 - **Diodos láser, LD**
 - Comparación de las características de LED y LD
 - Circuitos electrónicos en el emisor (drivers). Otras cuestiones prácticas.
 - Resumen y conclusiones
- 

La interacción entre fotones y materia (semiconductores) se explica con tres mecanismos básicos



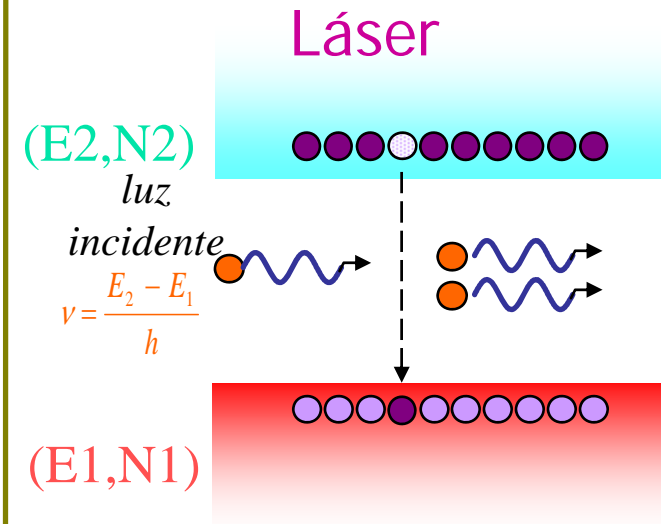
Absorción

- Un fotón incide en el material
- La energía del fotón es absorbida por el material, que queda en un estado de mayor energía
- Un electrón pasa de la banda de valencia a la de conducción



Emisión Espontánea

- Un electrón pasa de la BC a la BV, donde se recombina con un hueco
- El sistema pasa a un estado de menor energía
- Se genera un fotón (de fase y direcc. propagación arbitrarias)



Emisión Estimulada

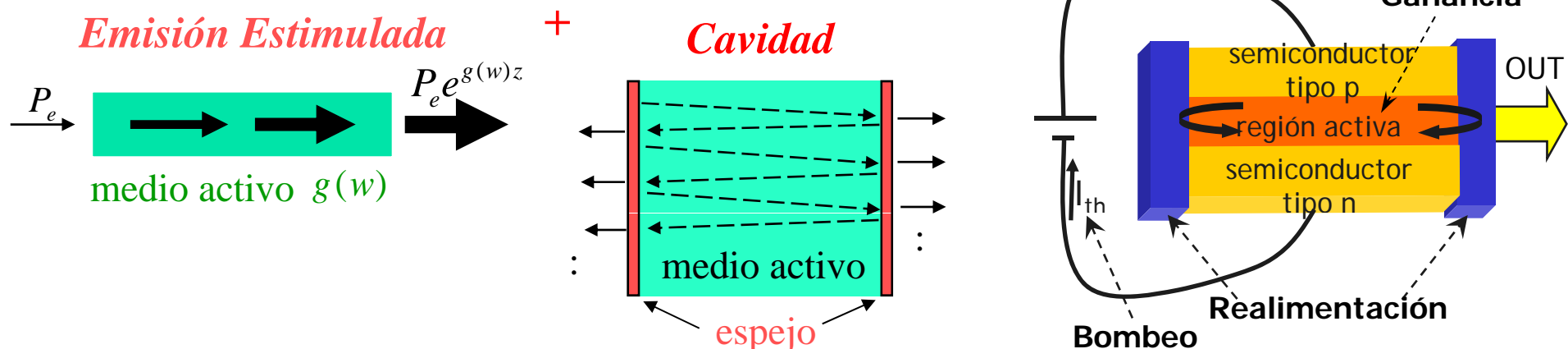
- Un fotón incide en el material
- Un electrón pasa de la BC a la BV, donde se recombina con un hueco
- Se genera un fotón (de fase y direcc. propagación idénticas al incidente)

Amplificación por emisión estimulada de los fotones generados en la emisión espontánea
LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

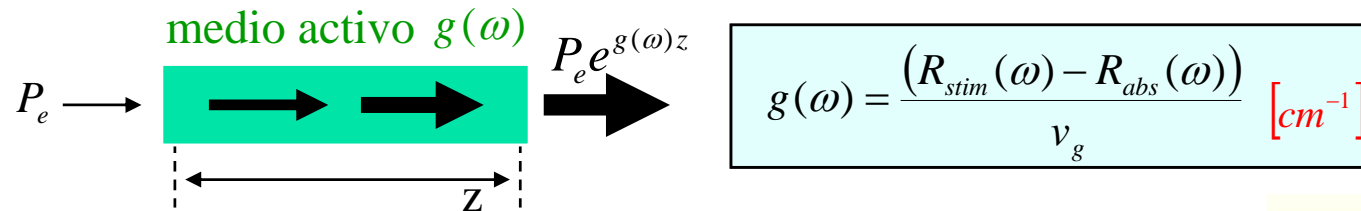
Se necesita por tanto que:

- domine la emisión estimulada para tener **ganancia** (por dominar la estimulada será emisión de luz coherente al ser emitidos todos los fotones con idéntica frecuencia, fase y dirección de propagación)
- haya un mecanismo de **realimentación** positiva (se necesitarán *espejos* que reflejen la luz y puedan formar cavidades)

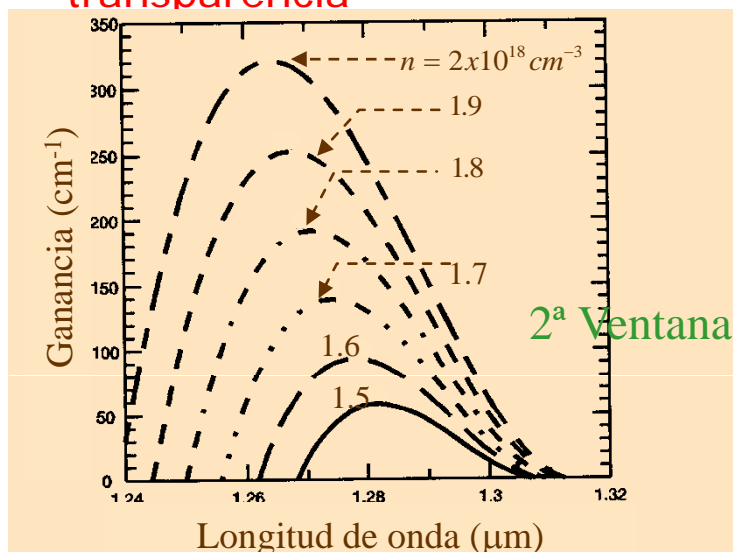
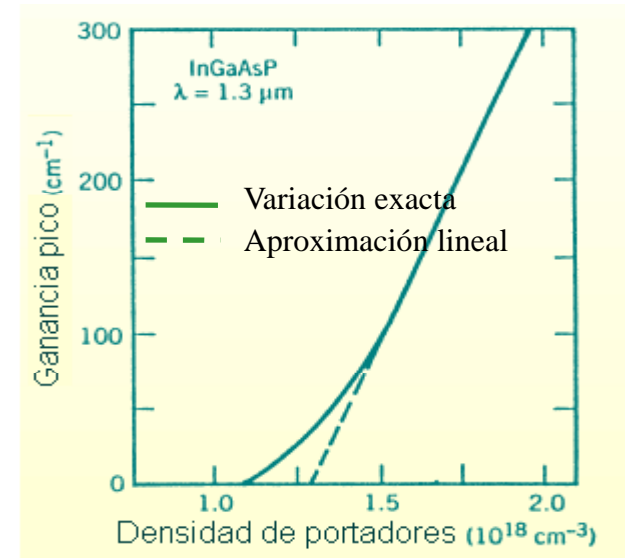
Cuando se producen ambas condiciones puede darse la **oscilación láser**



Para conseguir **GANANCIA** en un semiconductor (que domine emisión estimulada) se debe cumplir $E_{fc} - E_{fv} > E_2 - E_1 > E_g$ Para ello, unión p-n en directa



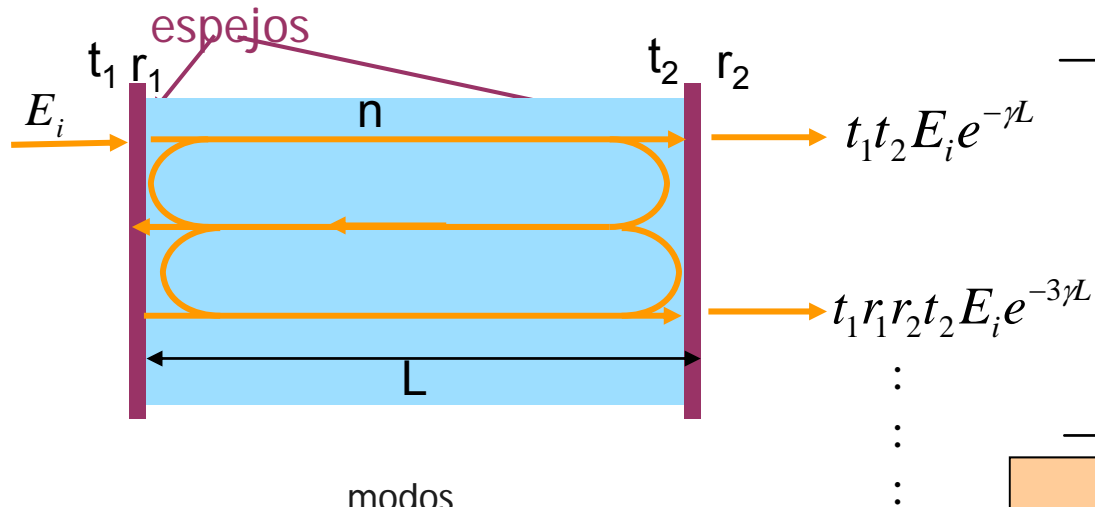
Pero además, la ganancia depende de la densidad de portadores electrónicos. Para que realmente haya ganancia, $g > 0$, debe producirse la **inversión de población** ($n_2 > n_1$) que ocurrirá sólo si la densidad de portadores inyectados supera un valor umbral llamado **densidad de transparencia**



La ganancia depende también de la longitud de onda, pero se produce en rangos espectrales amplios (30-50 nm)

De no introducir una realimentación selectiva en longitud de onda, el ancho espectral de las fuentes láser sería elevado

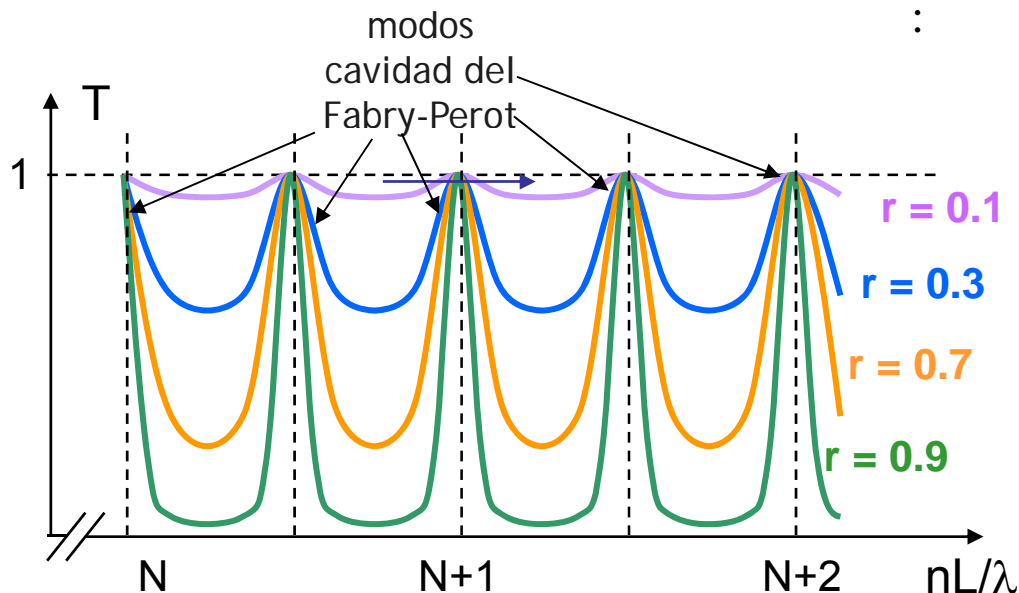
La **REALIMENTACIÓN** positiva se consigue formando cavidades con espejos.
Históricamente, la primera en usarse fue la cavidad **FABRY-PEROT**



suma = Campo Transmitido

$$E_s = t_1 t_2 E_i e^{-\gamma L} \sum_{i=0}^{\infty} [(r_1 r_2)^i e^{-2i\gamma L}]$$

$$E_s = E_i \frac{t_1 t_2 e^{-\gamma L}}{1 - r_1 r_2 e^{-2\gamma L}}$$



Respuesta periódica
Banda paso con forma
lorentziana

Anchura de banda de las resonancias

$$FWHM = \frac{c}{2\pi n L} \arcsen\left(\frac{1-R}{2\sqrt{R}}\right)$$

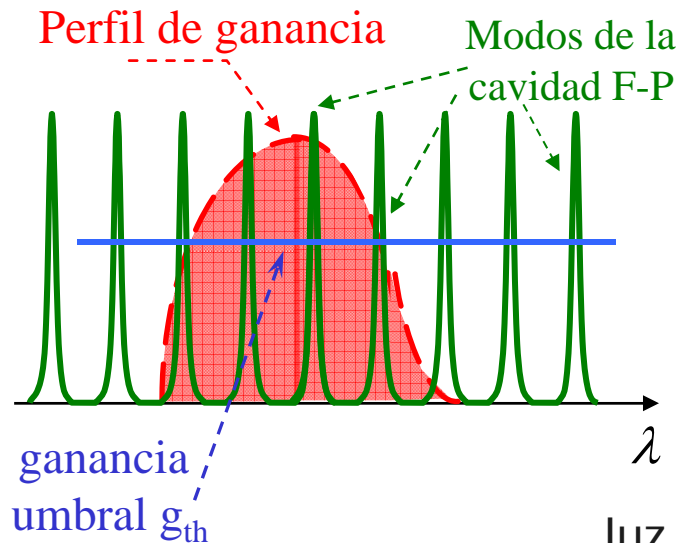
Rango espectral libre $FSR = \frac{c}{2nL}$

Finura $F = \frac{FSR}{FWHM} \approx \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} \Big|_{si R \approx 1}$

La **oscilación del láser Fabry-Perot** se consigue al forzar el que haya salida en ausencia de entrada, esto es, forzando a que se anule el denominador de la expresión del campo:

$$E_s = E_i \frac{t_1 t_2 e^{-\gamma L}}{1 - r_1 r_2 e^{-2\gamma L}}$$

$$\sqrt{R_1 R_2} e^{(-2j\beta L + (g - \alpha_c)L)} = 1$$



Condición de Ganancia

$$R^2 e^{2(g_{th} - \alpha)L} = 1$$

$$\Rightarrow 2 \ln R + 2(g_{th} - \alpha)L = 0$$

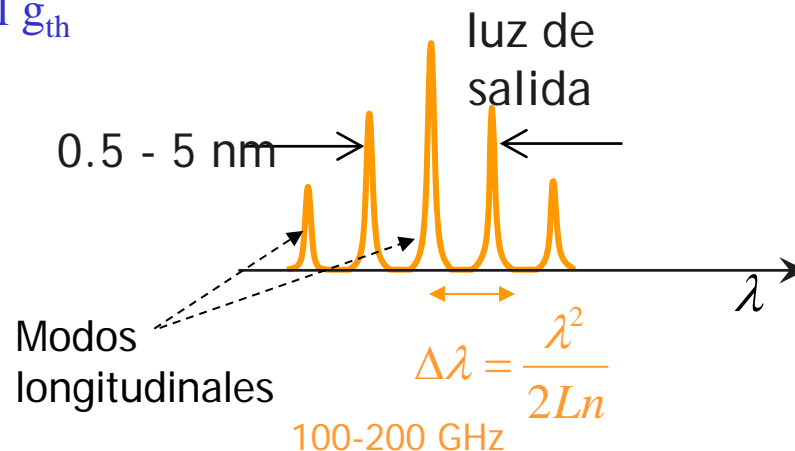
$$\Rightarrow g_{th} = \alpha + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R}$$

Condición de Fase

$$2\beta L = 2\pi m$$

$$\Rightarrow \Delta \nu = \frac{c}{2Ln}$$

$$\Delta \lambda = \frac{\lambda^2}{2Ln}$$



Espectro emitido
**ESPECTRO
MULTIMODO**

Láser multimodo o FP para sistemas de velocidad media/baja o media/corta distancia

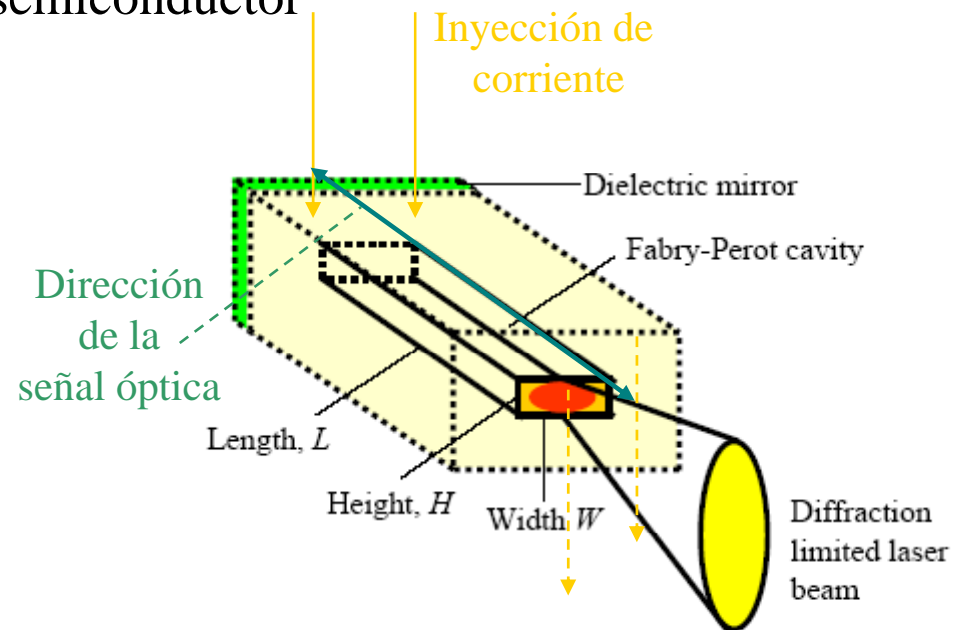
La cavidad Fabry-Perot se forma al embutir la estructura de tipo sandwich o heteroestructura de la unión p-n entre dos espejos formados al cortar de forma recta y limpia el material semiconductor

Formula de Fresnel

$$R_1 = R_2 = \left(\frac{\bar{n} - \bar{n}_{ext}}{\bar{n} + \bar{n}_{ext}} \right)^2$$

$$r_2 = \sqrt{R_2} \quad r_1 = \sqrt{R_1}$$

$$\begin{array}{l} \bar{n}_{ext} \approx 1 \\ \bar{n} \approx 3.5 \end{array} \longrightarrow R \approx 0.3$$



Valores típicos de L , W y H :

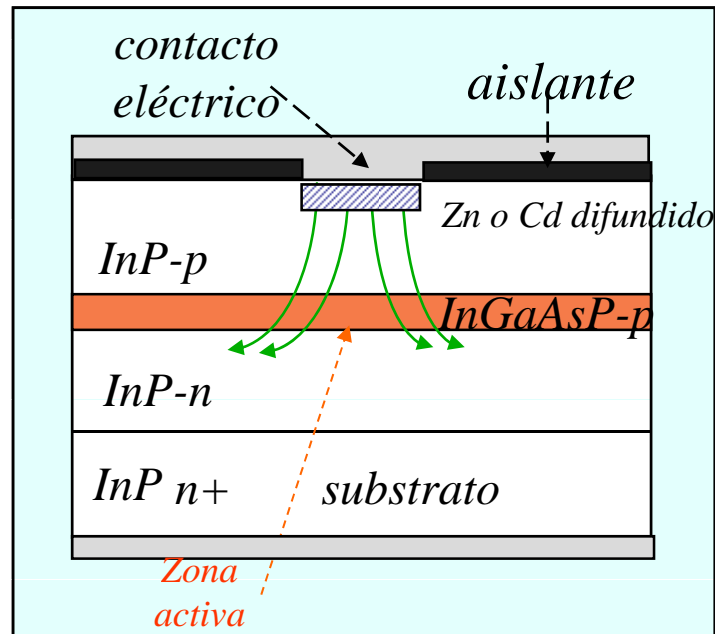
$$L = 100 \text{ a } 500 \mu\text{m}$$

$$W = 5 \text{ a } 15 \mu\text{m}$$

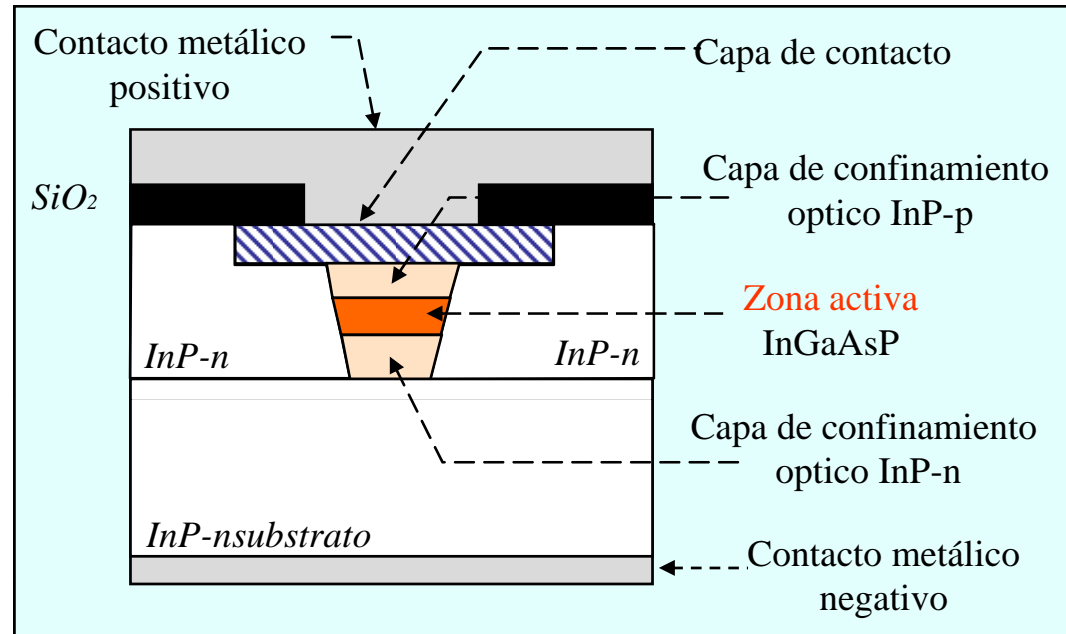
$$H = 0.1 \text{ a } 0.5 \mu\text{m}$$

En un diodo láser la luz está confinada en la dirección transversal por la heteroestructura y en la dirección longitudinal por las propias caras reflexivas del dispositivo. Para guiar la luz en la dirección lateral se emplean dos técnicas:

LÁSERES DE GUIADO POR GANANCIA

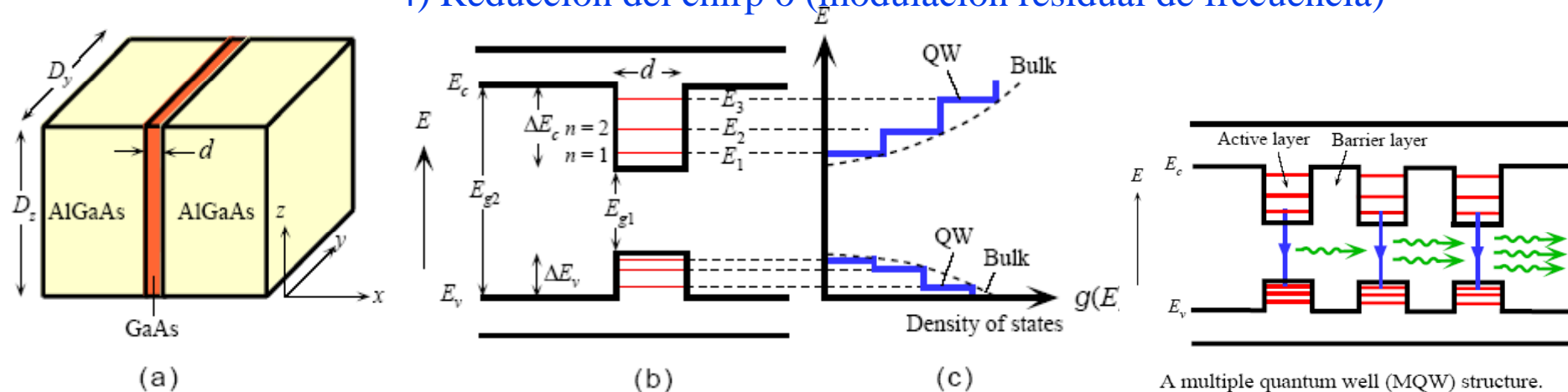


LÁSERES DE GUIADO POR ÍNDICE DE REFRACCIÓN (buried structures)



Cuando la longitud de la zona activa pasa de $0.1\mu\text{m}$ - $0.3\mu\text{m}$ en heteroestructuras normales a valores por debajo de los 10 nm, aparecen efectos cuánticos en los niveles de energía de los electrones y huecos en el semiconductor. A tal confinamiento de la zona activa se denomina **Pozo Cuántico**. Características frente a heteroestructuras normales:

- 1) Anchura espectral mucho menor.
- 2) Corriente umbral menor (2.5mA) .
- 3) Anchos de banda de modulación mucho mayor.
- 4) Reducción del chirp o (modulación residual de frecuencia)



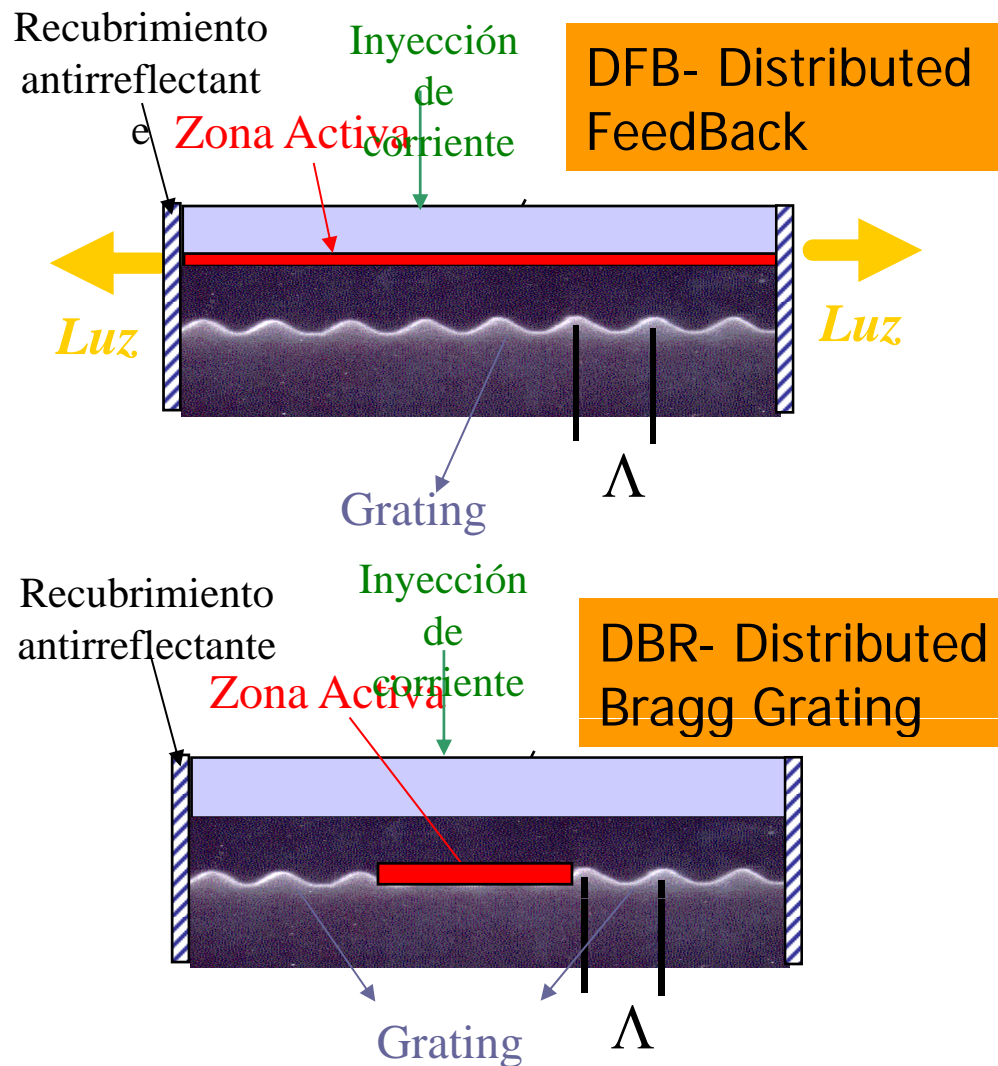
A quantum well (QW) device. (a) Schematic illustration of a quantum well (QW) structure in which a thin layer of GaAs is sandwiched between two wider bandgap semiconductors (AlGaAs). (b) The conduction electrons in the GaAs layer are confined (by ΔE_c) in the x -direction to a small length d so that their energy is quantized. (c) The density of states of a two-dimensional QW. The density of states is constant at each quantized energy level.

A multiple quantum well (MQW) structure. Electrons are injected by the forward current into active layers which are quantum wells.

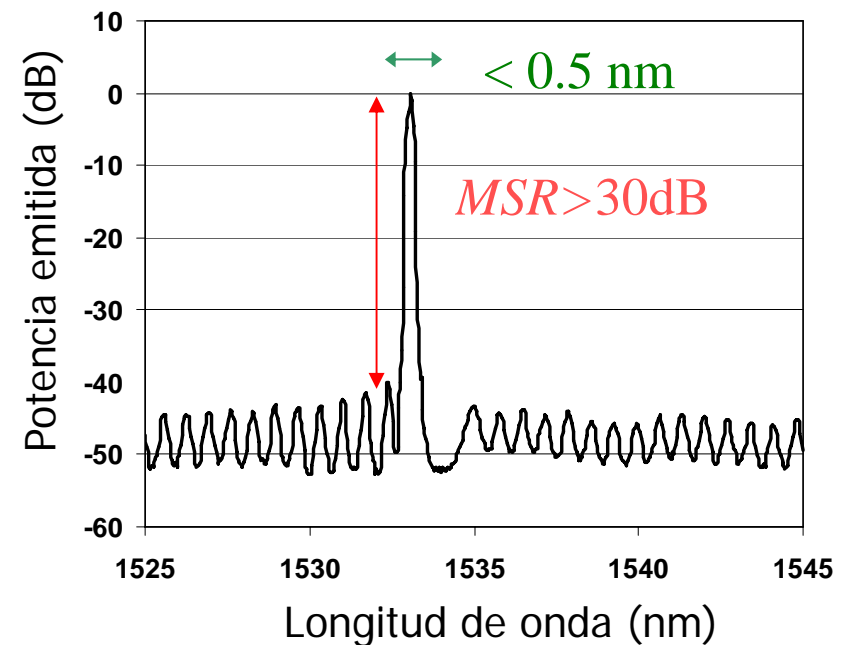
© 1999 S.O. Kasap, *Optoelectronics* (Prentice Hall)

Figure 4.32

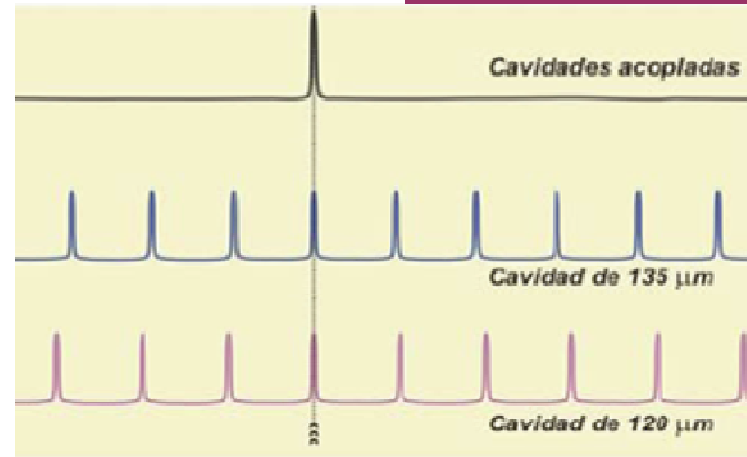
Para conseguir **operación monomodo** se buscan espejos que sean selectivos en longitud de onda -**DBR**- o realimentación distribuida por toda la zona activa (que también resulta ser selectiva en longitud de onda) -**DFB**-



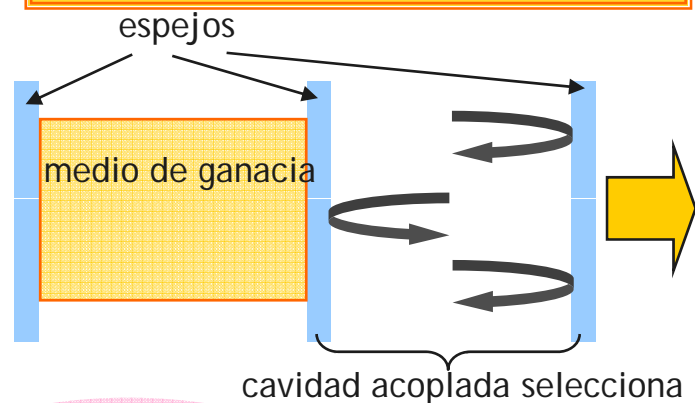
La realimentación sólo se produce a la longitud de onda Bragg, $\lambda_B = 2\bar{n}\Lambda$



Combinando dos cavidades de diferente, aunque similar, tamaño se puede seleccionar un único modo para la emisión de luz → **láseres de cavidades acopladas**



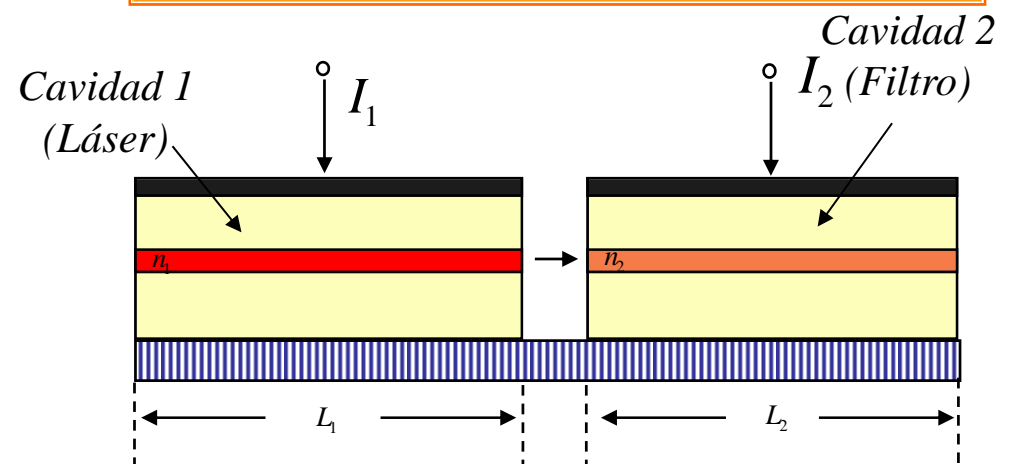
Láseres de cavidad externa



longitudes totales ↑
velocidades de
modulación directa ↓

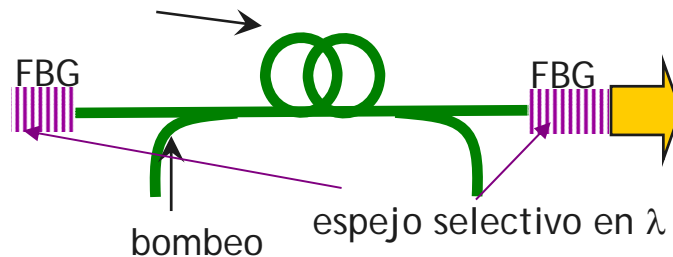
cavidad acoplada selecciona
el modo longitudinal

Láseres C3 (cleaved coupled cavity)



Láseres de fibra

medio activo: fibra dopada



No admiten aún modulación directa, necesitan modulaciones externas

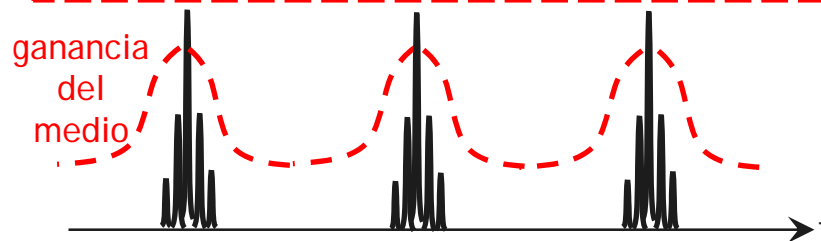
Utilizan láseres de semiconductor como bombeo

Láseres enganchados en modos (*mode-locked lasers*)

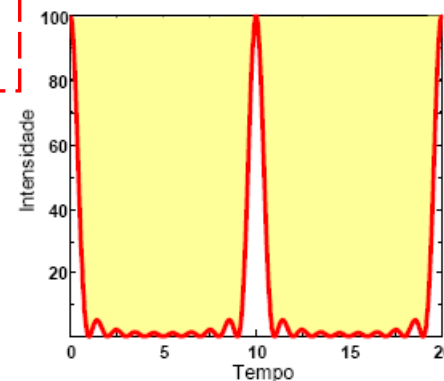
Láser normal: varios modos longitudinales campo resultante: $E(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} E_n(t) \exp[i(2\pi\nu_n t + \phi_n(t))]$

la ganancia del medio es insuficiente para que cualquier modo longitudinal oscile por separado, pero sí hay amplificación de todos los modos simultáneamente si están en fase
⇒ pulsos ultracortos

Para el enganche en fase, variación de la ganancia (mod. AOTF, sat. ganancia,...) o de la fase (SPM, del medio)

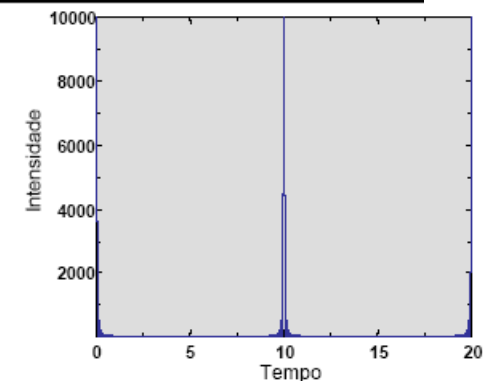


Interesa alto n° de modos



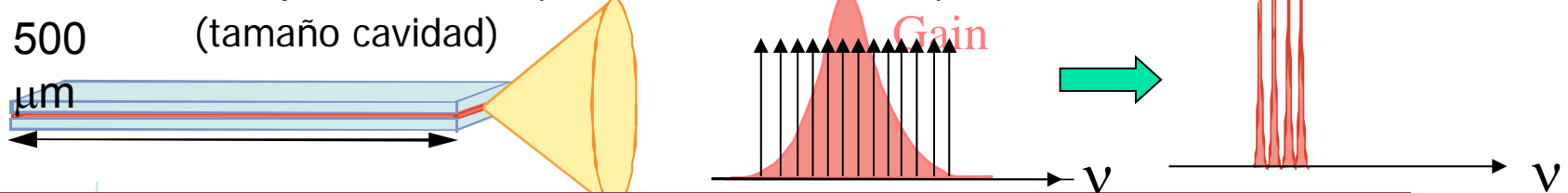
N=10 modos

$$T_p = \frac{2\pi}{N\omega_c} = \frac{T_c}{N}$$

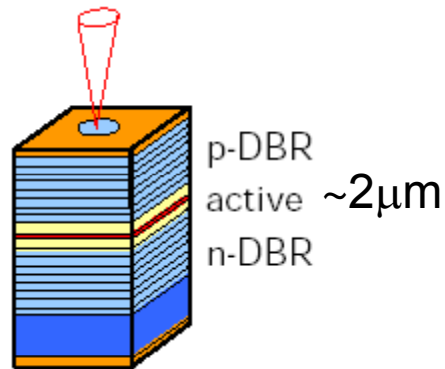


N=100 modos

Láseres emisión por extremo (todos los anteriores)

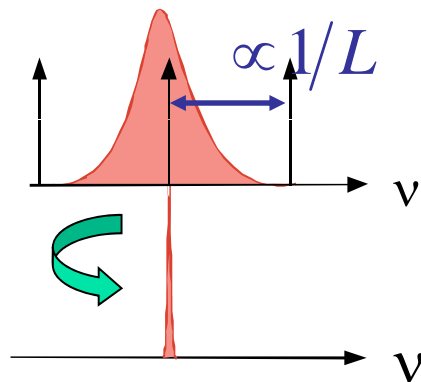


Láseres emisión vertical – VCSEL (vertical cavity surface-emitting laser)

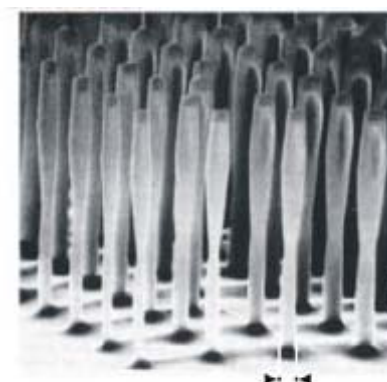


Se basan en 2 espejos DBR hechos alternando capas (40-60) de $\lambda/4$, colocados perpendicularmente: esto permite cavidad estrecha y por tanto **un solo modo** y supone **emisión vertical**

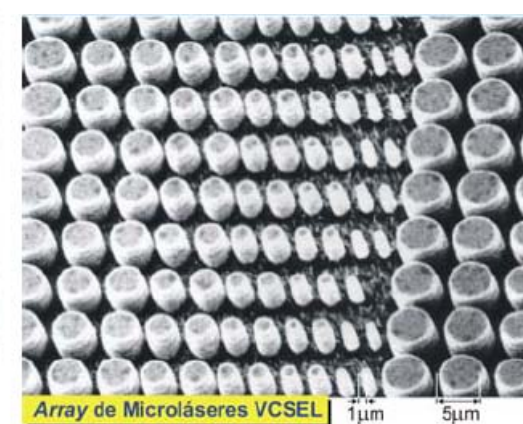
- Alta resistencia de entrada \Rightarrow problemas en la disipación de calor
- Acoplo de luz de fibra es más fácil.
- VCSEL comerciales en 1ª ventana, empiezan en 2ª ventana
- Posibilidad de arrays 2-D: láseres de λ distin. para láseres sintonizables



Detalle de los espejos.
Uno de los materiales ha
sido atacado selectivamente

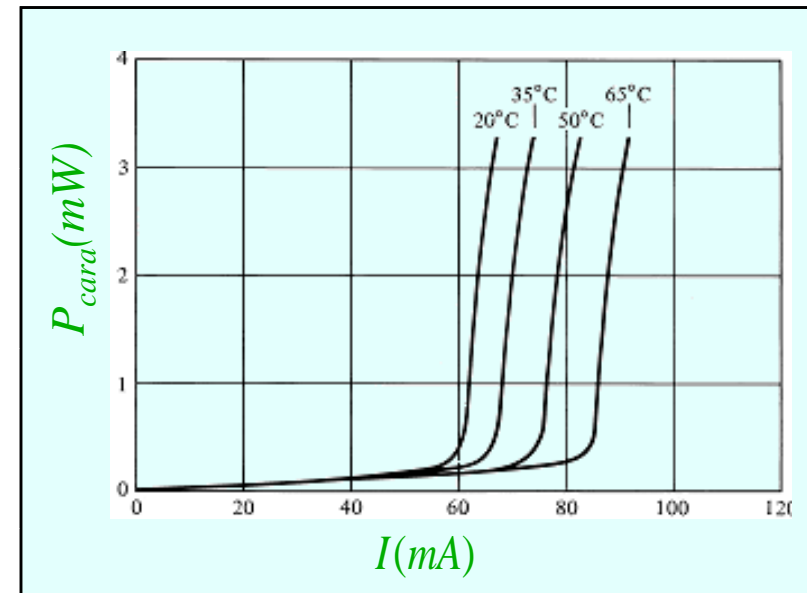
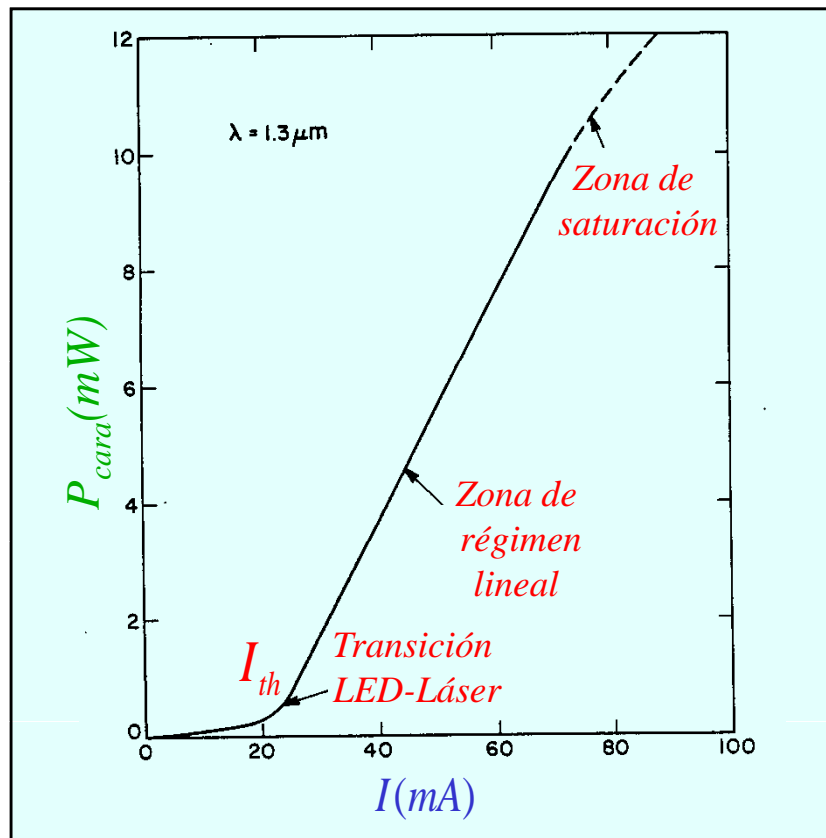


Array de microláseres



Relación I-P en un Láser (en CW)

$$P_{cara} = \eta_d \left(\frac{\hbar \omega}{e} \right) (I - I_{th})$$



La intensidad umbral aumenta con la temperatura (también algo cambia la pendiente y la zona de saturación)

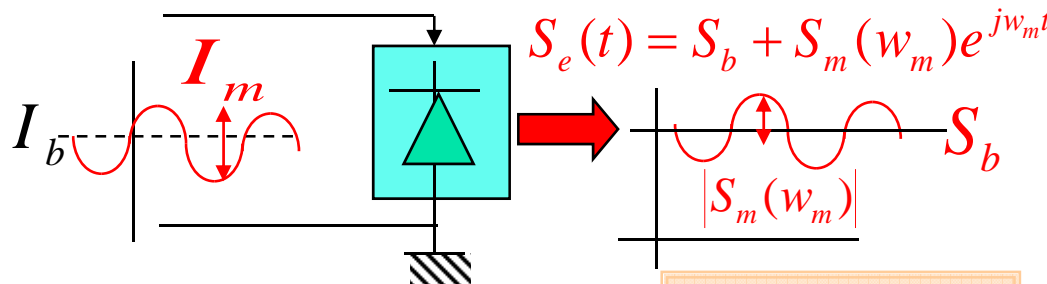
$$I_{th}(T) = I_z e^{T/T_0}$$

Valores típicos I_{th} : 10 mA, $P_{emitida}$: hasta 200 mW

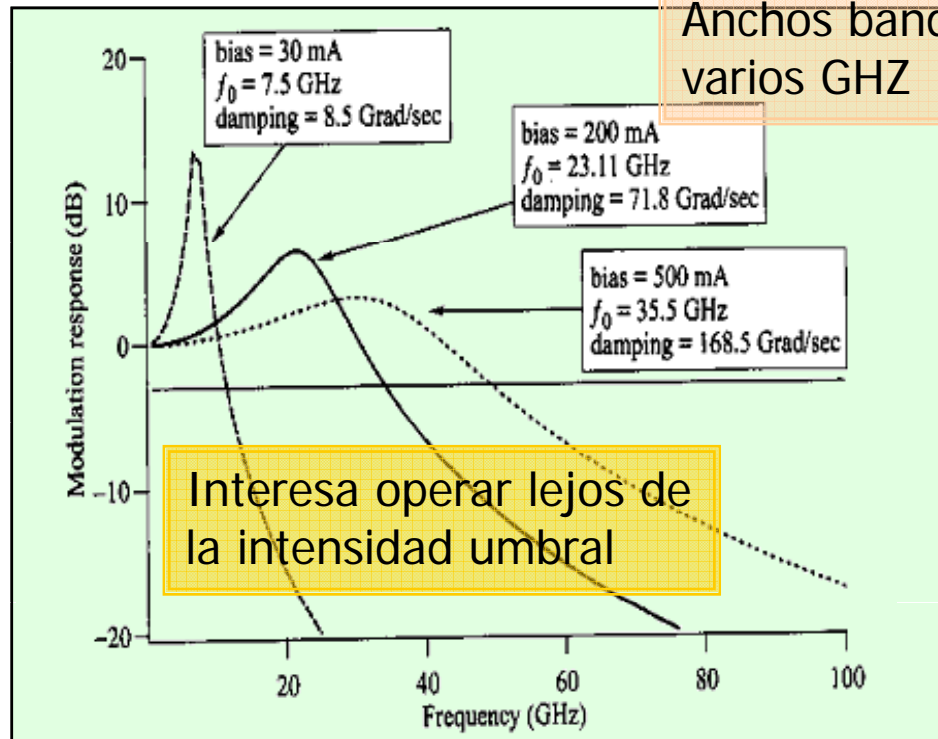
Modulación LD, pequeña señal

Intensidad aplicada a la fuente

$$I(t) = I_b + I_m e^{j\omega_m t} \longrightarrow I_m \ll I_b$$



Anchos banda
varios GHz



Las ecuaciones de emisión del láser relacionan la densidad de portadores, $n(t)$ eléctricos y fotones, $S(t)$, (proporcional a la potencia emitida) con la intensidad eléctrica y el tiempo de vida medio de dichos portadores

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{I(t)}{eV_{act}} - \frac{n(t)}{\tau_c} - GS(t)$$

$$\frac{dS(t)}{dt} = GS(t) - \frac{S(t)}{\tau_{ph}} + R_{sp}$$

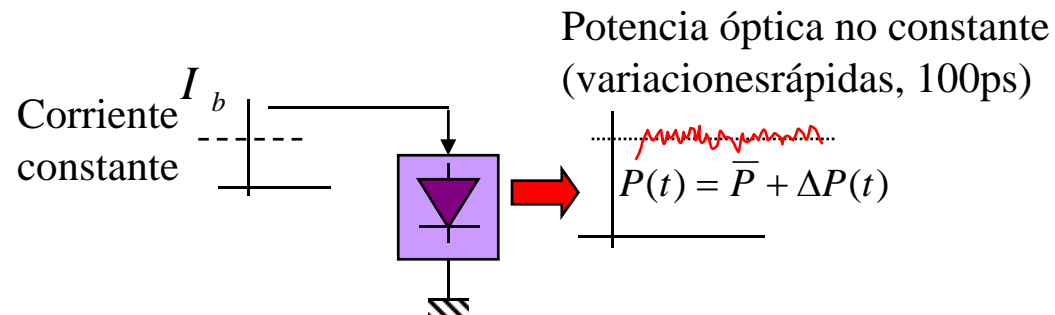
Con su solución se encuentra la respuesta en frecuencia a la modulación y el correspondiente ancho de banda de modulación

$$H(\omega) = \frac{\Omega_R^2 + \Gamma_R^2}{(\Omega_R + \omega - j\Gamma_R)(\Omega_R - \omega + j\Gamma_R)}$$

$$f_{3dB} \approx \frac{\sqrt{3}\Omega_R}{2\pi} \approx \left[\frac{3\eta_i v_g \Gamma \sigma_g}{4\pi^2 e V_{act}} (I_b - I_{th}) \right]^{1/2}$$

La presencia de la emisión espontánea introduce ruido tanto en amplitud como en fase

En amplitud: Ruido Relativo de Intensidad (RIN)



Función de autocorrelación en intensidad)

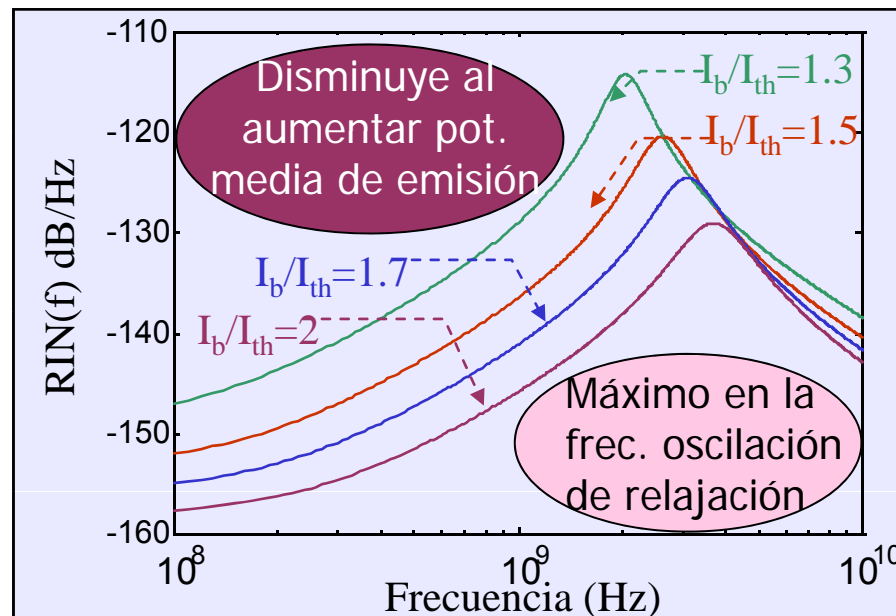
$$C_{pp}(\tau) = \frac{\langle \Delta P(t)^2 \rangle}{\bar{P}^2}$$

Su transformada de Fourier

$$RIN(\omega) = \int C_{pp}(\tau) \cdot e^{-j\omega\tau} d\tau$$

$$SNR(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\int RIN(\omega) \cdot \frac{d\omega}{2\pi}}}$$

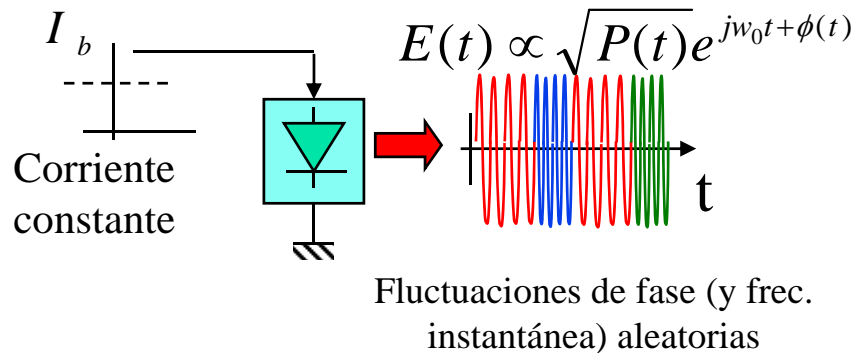
Espectro de ruido relativo de intensidad RIN



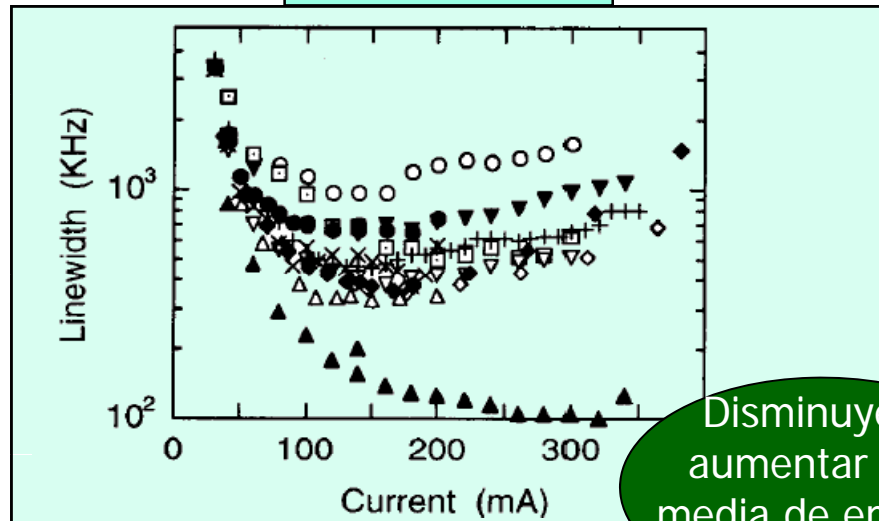
Valores típicos:
130-160 dB/Hz; SNR 30dB

La presencia de la emisión espontánea introduce ruido tanto en amplitud como en fase

Ruido de Fase



Valores típicos:
100kHz a 1 GHz



Disminuye al aumentar pot. media de emisión (saturación)

Espectro de emisión de anchura no nula

Función de autocorrelación de la fase del campo de salida

$$\Gamma_{EE}(t) = \langle \exp(i\Delta\phi(t)) \rangle$$

Su transformada de Fourier

$$S_E(\omega) = \int \Gamma_{EE}(t) \cdot e^{-j(\omega - \omega_0)t} dt$$

Puede calcularse y ver que resulta un espectro lorentziano de una cierta anchura en frecuencia

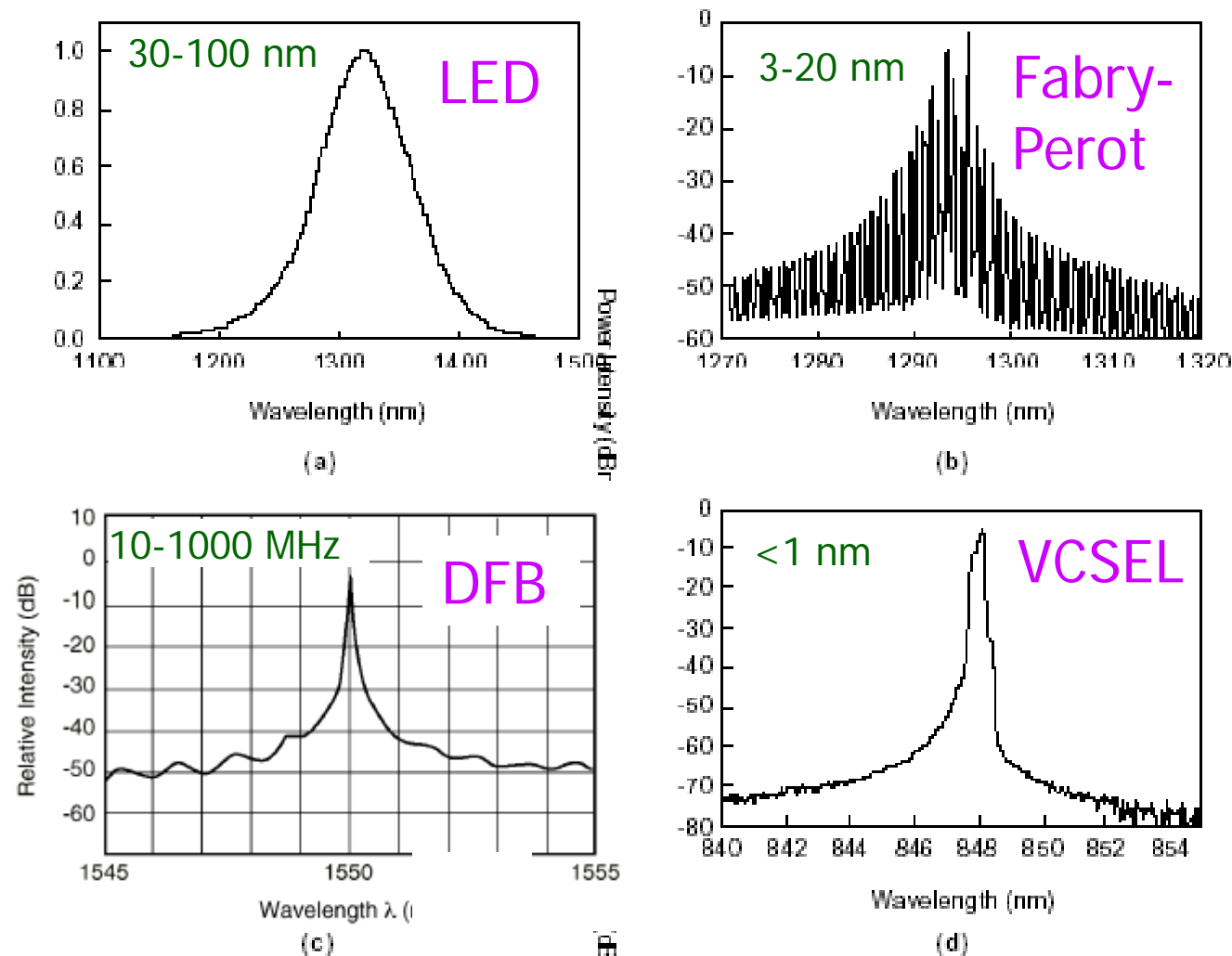
$$S_E(\omega) = \frac{2\bar{S}t_c}{1 + [(\omega - \omega_0)t_c]^2} \quad \text{Función Lorentziana}$$

$$\text{Anchura espectral del láser} \quad \Delta\nu = \frac{1}{\pi t_c} = \frac{R_{sp}(1 + \alpha^2)}{4\pi\bar{S}}$$

t_c : tiempo de coherencia



$$t_c = 4\bar{S} / R_{sp}(1 + \alpha^2)$$

Espectro de emisión según tipo de fuente



Características del Láser.



- Basados en emisión estimulada (luz coherente) en unión P-N polarizada en directa
- Valores de eficiencia cuántica interna cercanos a la unidad. Eficiencia externa también alta. Relativamente altas potencias ópticas de salida (3-200 mW)
- Relación $P_{\text{opt}}-I_{\text{elec}}$ lineal (saturación a altas I_{elec}), superada la intensidad umbral
- Espectro de emisión más estrecho que LEDs: en LD multimodo, 3-5 nm; en LD monomodo 100 kHz-100 MHz
- Pueden ser modulados directamente sin dificultad hasta velocidades de varios Gb/s.
- También pueden ser modulados en frecuencia
- Su geometría y patrón de radiación es de relativamente baja divergencia, el acoplo de luz a la fibra óptica monomodo es bastante eficiente
- Son más difíciles de fabricar por incluir espejos y son por ello de mayor coste.
- Son sensibles a cambios en la temperatura y a las reflexiones que provoquen potencia óptica incidente en su salida. Por ello necesitan un bloque transmisor complejo.

- 
- Fundamentos de la emisión óptica
 - Diodos emisores de luz, LED
 - Diodos láser, LD
 - Comparación de las características de LED y LD
 - Circuitos electrónicos en el emisor (drivers). Otras cuestiones prácticas.
 - Resumen y conclusiones
- 

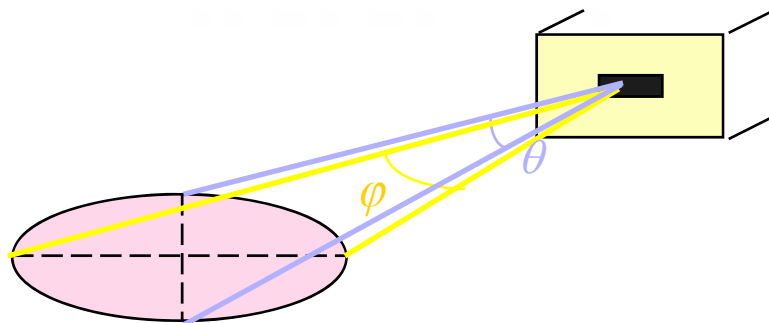
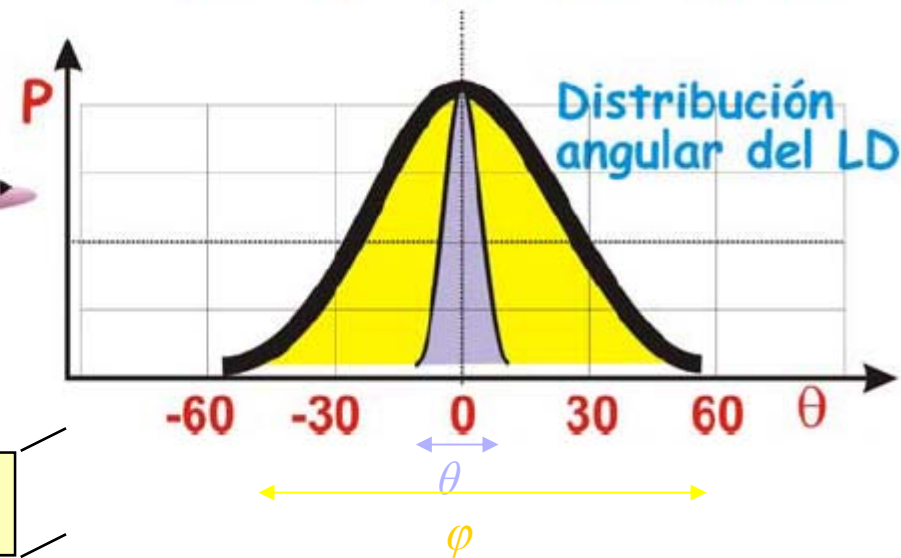
Ing. Telecom., CC.OO.: Fuentes de luz

Comparación de las características de las distintas ftes

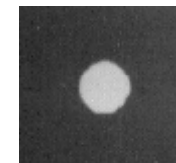
| | LED | LD F-P | LD_DFB | VCSEL |
|---|---|---|---|---|
| Espectro emisión | Ancho | Medio | Estrecho | Estrecho |
| Directividad | Muy divergente | Directivo | Directivo | Directivo |
| Potencia | Baja | Alta | Alta | Alta |
| Veloc./ancho banda modulación | Varios cientos de MHz | Varias decenas de GHz | Varias decenas de GHz | Varias decenas de GHz |
| Acoplo a fibra | MMF | SMF | SMF | MMF |
| Curva I-P | Sin I_{umbral} Baja pendiente | Con I_{umbral} Alta pendiente | Con I_{umbral} Alta pendiente | Con I_{umbral} Alta pendiente |
| Dependencia con temperatura | Baja | Alta | Alta | Alta |
| Circuitos electrónicos asociados | Sencillos | Complejos | Complejos | Complejos |
| Seguridad para la vista | No peligroso | Potencialm dañino | Potencialm dañino | Potencialm dañino |
| Tiempo vida útil | Alto | Medio (suficiente) | Medio (suficiente) | Medio (suficiente) |
| Coste | Bajo | Medio | Alto | Bajo |
| Ventana operación | 1ª, 2ª | 2ª, 3ª | 2ª, 3ª | 1ª, 2ª |

- 
- Fundamentos de la emisión óptica
 - Diodos emisores de luz, LED
 - Diodos láser, LD
 - Comparación de las características de LED y LD
 - Circuitos electrónicos en el emisor (drivers). Otras cuestiones prácticas.
 - Resumen y conclusiones
- 

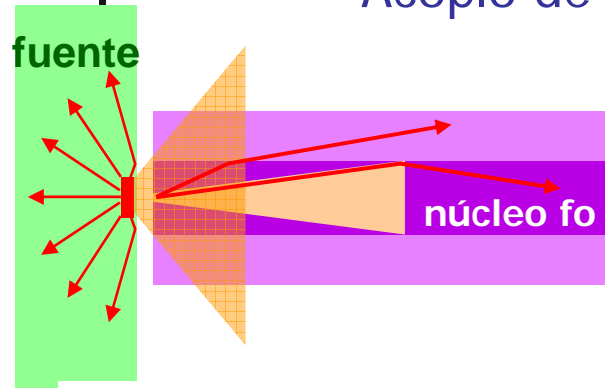
Diagramas de radiación



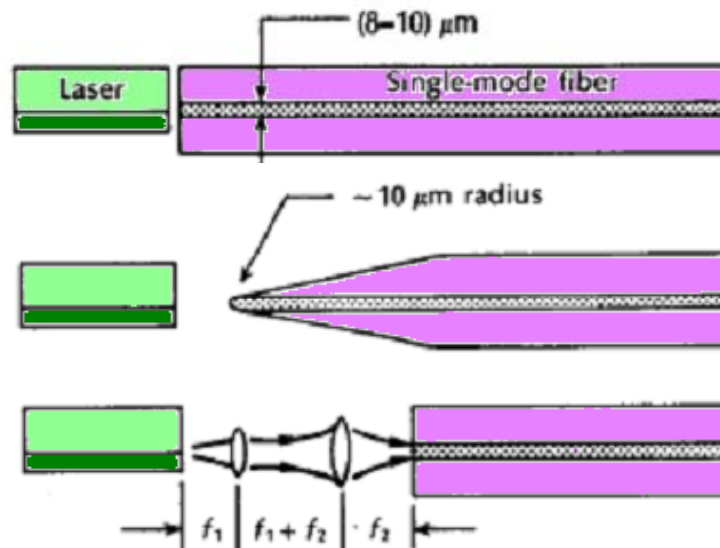
VCSEL
perfil circular
el mejor acoplo a fibra



Acoplo de la luz emitida a la fo

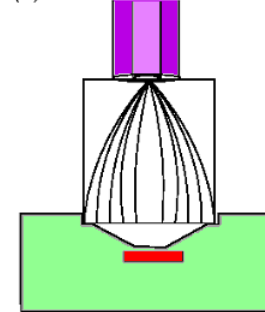


La diferencia entre el diagrama de radiación de las fuentes de semiconductor y el cono de aceptación de la f.o. hace que disminuya la potencia óptica inyectada en la fo. para ser guiada. Por eso, hay diferentes técnicas para acoplar la luz de forma eficiente

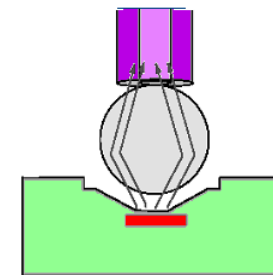


En el láser es muy perjudicial la reflexión, que aumenta RIN, mode-hopping ➡ necesidad de **aisladores** (bloque 5)

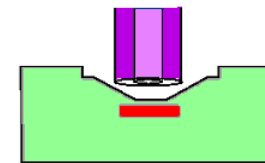
(a) Grin Lens



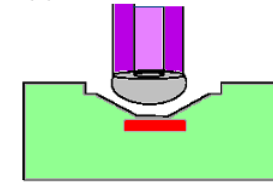
(b) Ball Lens



(c) Direct coupling



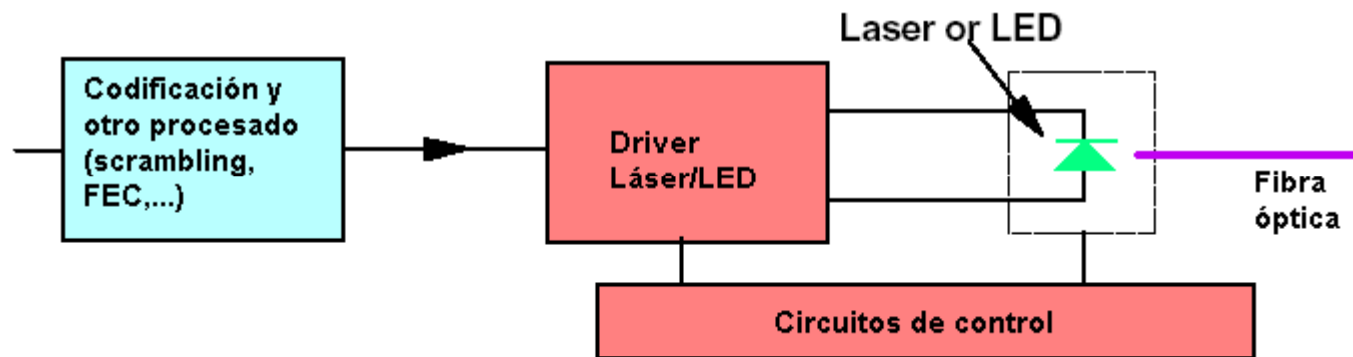
(d) Lensed fibre end



Eficiencia de acoplamiento

- LED < 1% (en f.o. monomodo)
- Láser < 40-50% (típica)

Objetivo de los circuitos electrónicos del tx (*drivers*): Polarizar al láser/LED adecuadamente (suministrando I_{bias}) y realizar la conversión tensión/corriente para la modulación directa



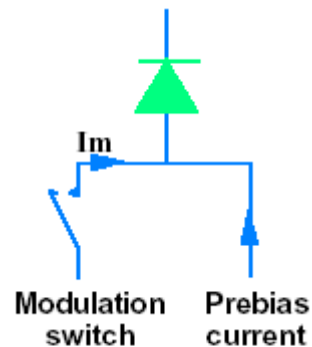
Existen gran número de “drivers” comerciales integrados monolíticamente para diferentes velocidades de modulación.

Corriente constante



Sin modulación

Serie



Independencia pol y mod.
Veloc. limitada

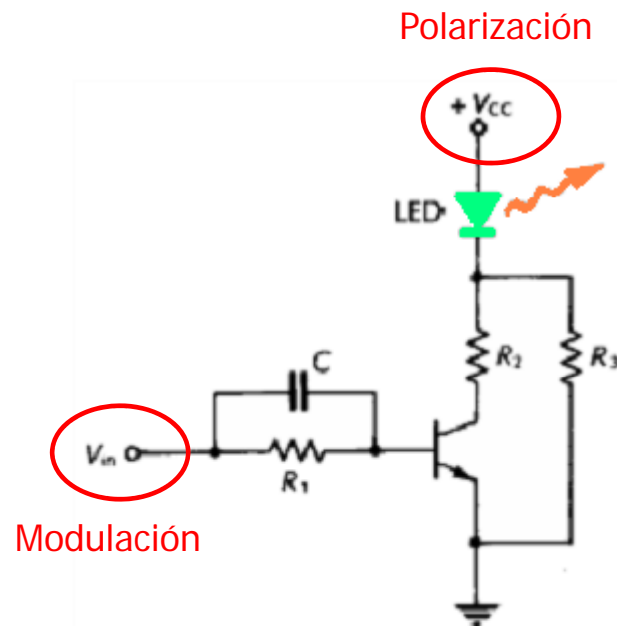
Paralelo



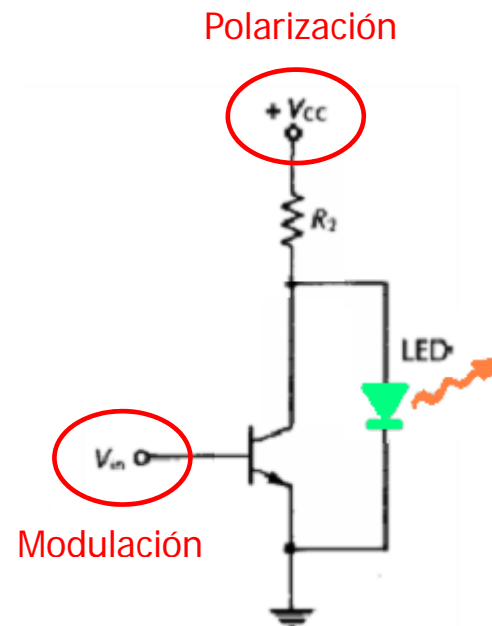
Independencia pol y mod.
Mayores velocidades

Objetivo de los circuitos electrónicos del tx (*drivers*): Polarizar al láser/LED adecuadamente (suministrand I_{bias}) y realizar la conversión tensión/corriente para la modulación directa

Circuitos para LED



Serie



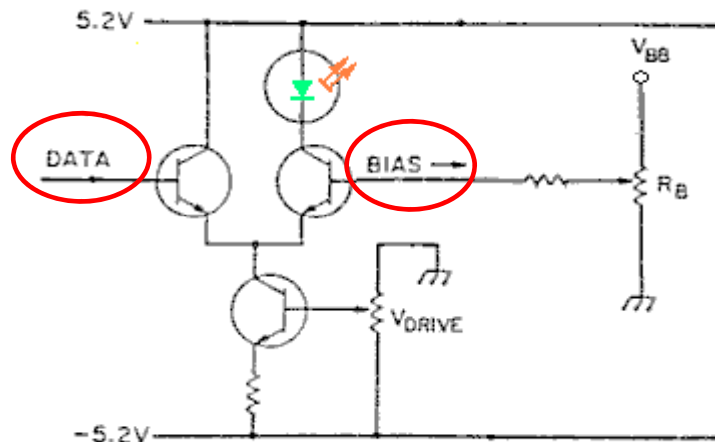
Paralelo

Sencillos

- Velocidad baja
- Sin control de temperatura

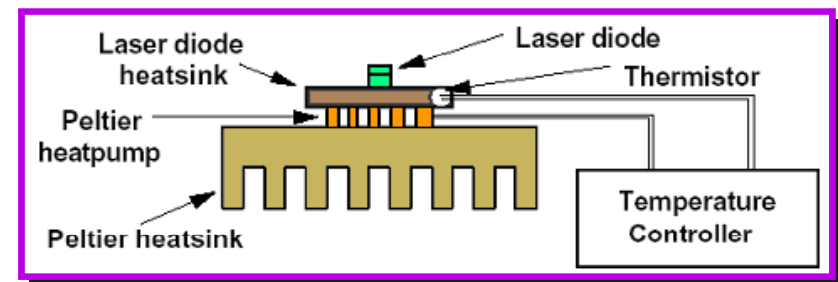
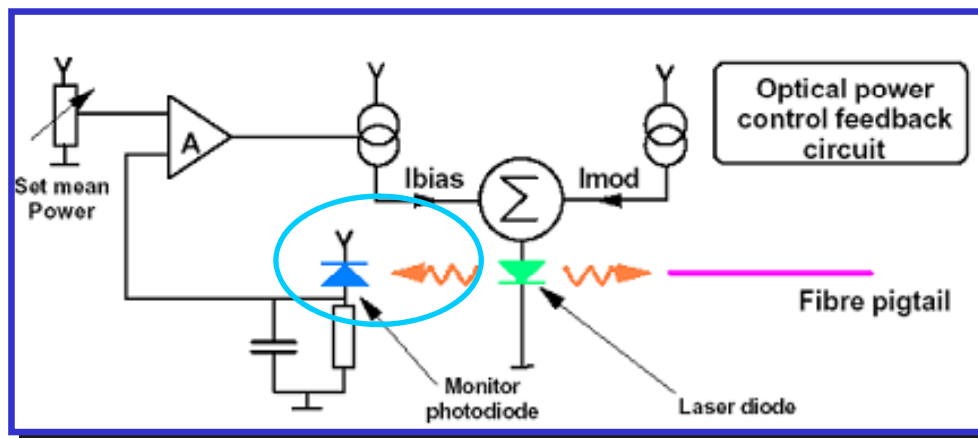
Objetivo de los circuitos electrónicos del tx (*drivers*): Polarizar al láser/LED adecuadamente (suministrando I_{bias}) y realizar la conversión tensión/corriente para la modulación directa + **Estabilización de las variaciones curva I-P y long. onda emisión con temperatura y envejecimiento**

Circuitos para Láser



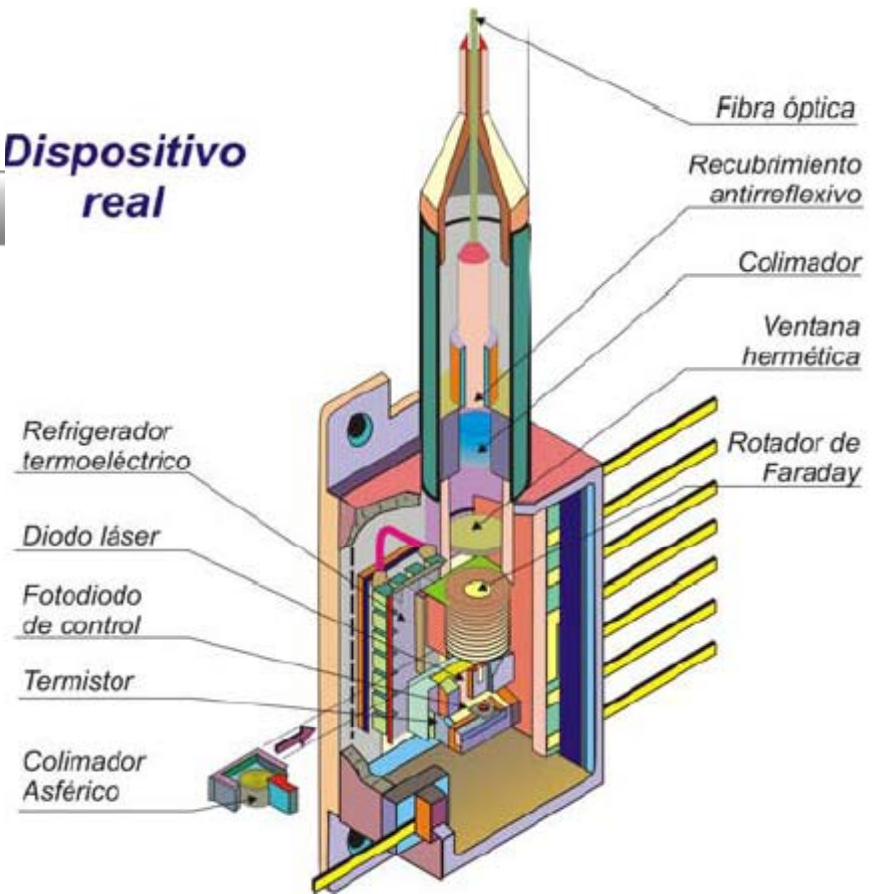
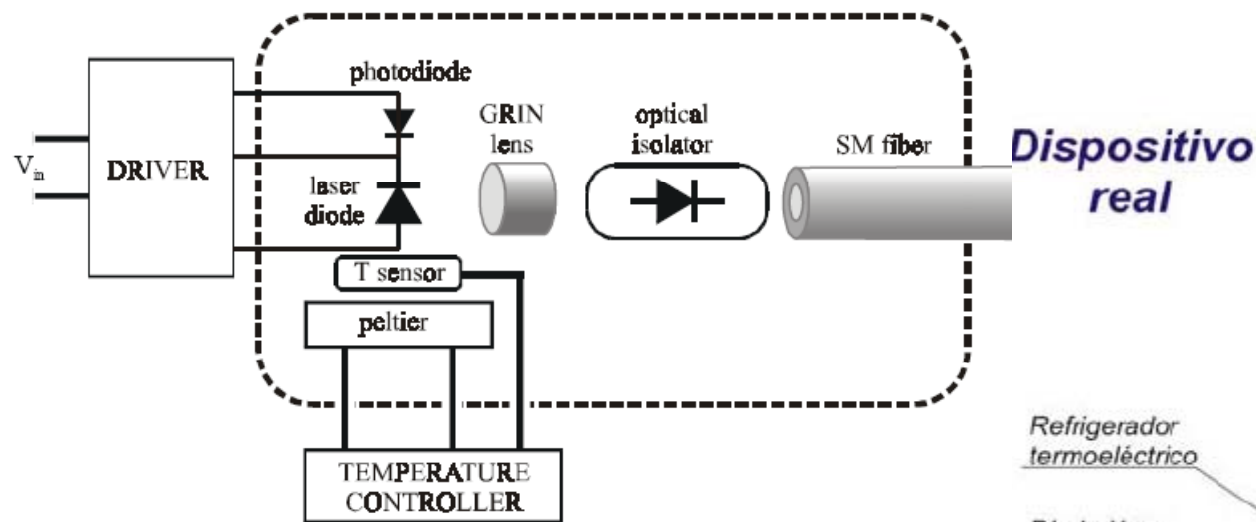
Complejos

- Velocidad alta
- Con control de temperatura (incluyen fotodiodos y disp. para mantener temp. constante)

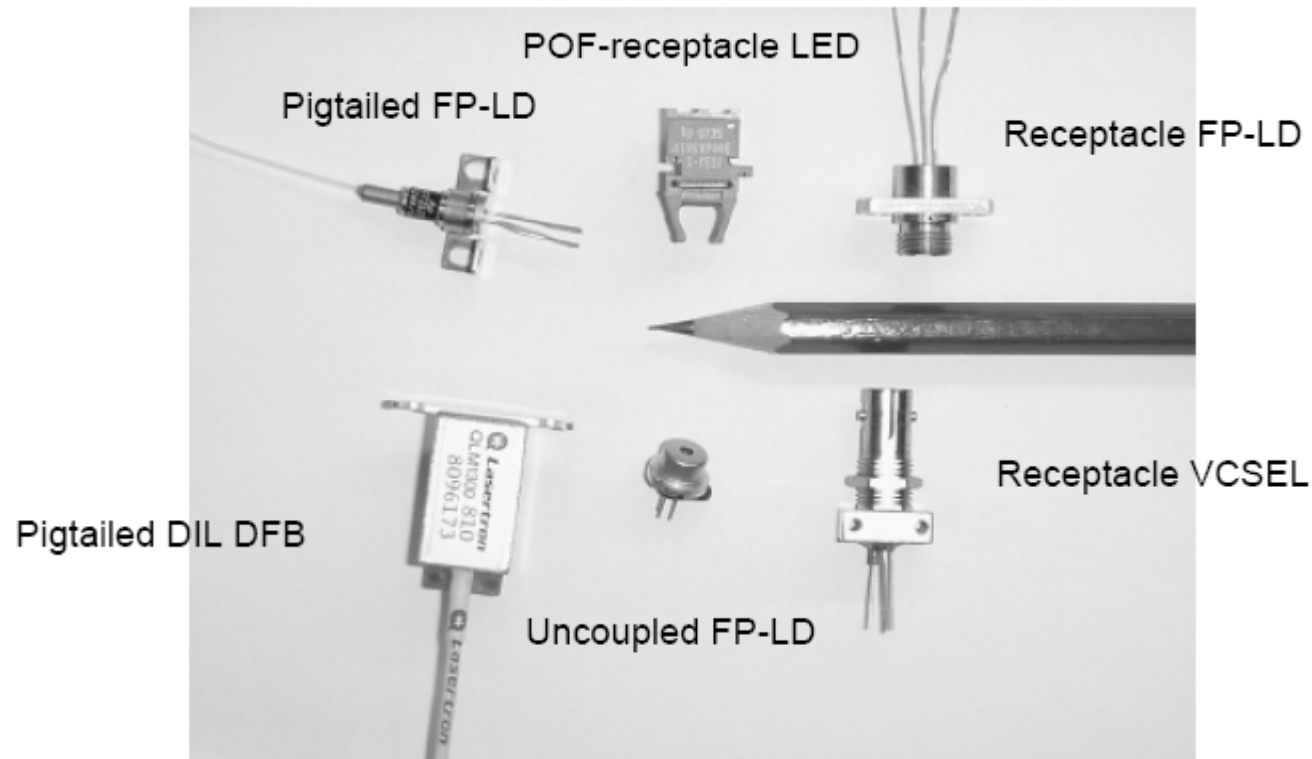


Ing. Telecom., CC.OO.: Fuentes de luz Transmisores para láser

Un láser comercial, además del diodo láser en sí, lleva incorporados habitualmente dispositivos de regulación de temperatura (Peltier), óptica de acoplo a la fibra óptica, aislamiento óptico de radiación de retorno (Faraday), fotodiodo de control

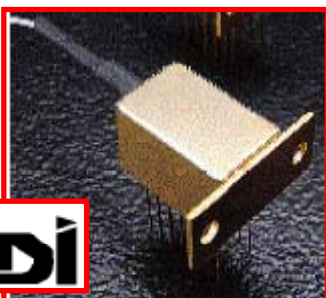


ENCAPSULADOS/ACOPLOS



Existe una gran variedad de modelos comerciales de encapsulado, casi todos ellos modificaciones de los habituales en transistores y CI. El acoplo a fibra puede hacerse mediante un "pigtail", tramo corto de fibra terminado en conector macho, o mediante un conector de fibra hembra (receptacle)

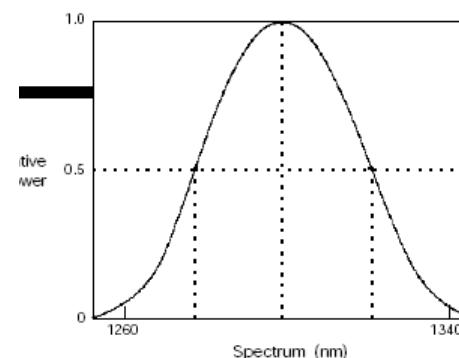
Edge-Emitting LED



Laser Diode's 1300 nm edge-emitting LEDs (light-emitting diode) feature high power stability with temperature variation and excellent spectral characteristics.

They are MOCVD-grown InGaAsP devices that are aligned to either a singlemode or multimode optical fiber and packaged in our high stability, 14-pin dual-in-line package (DIP). They are offered in two versions of the DIP. The standard package with a high-profile flange is configured either with or without a thermistor and a Peltier-effect thermoelectric cooler (cooled package). We also offer an uncooled, low-profile package without a flange for applications where space is limited and temperature control is not required.

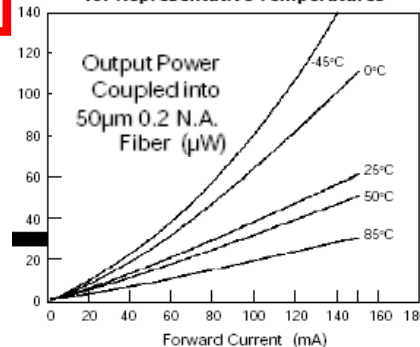
Typical Emission Spectrum



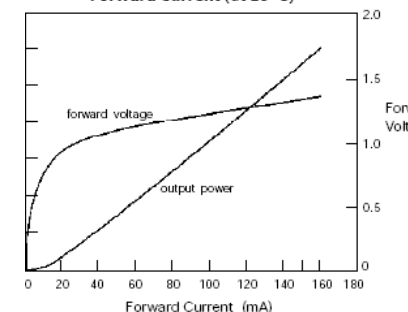
Electro-optical characteristics

| | | minimum | typical | maximum |
|---|-------|---------|---------|---------|
| Central wavelength | nm | 1270 | 1300 | 1330 |
| Spectral width | nm | - | 70 | 90 |
| Spectrum vs. temperature coefficient | nm/°C | - | 0.75 | - |
| Spectral width vs. temperature coefficient | nm/°C | - | 0.3 | - |
| Optical rise/fall time | nsec | - | 4.0 | - |
| Forward current | mA | - | - | 150 |
| Output power | μW | - | - | - |
| Into 50-micron core, 0.2 N.A. fiber at 150mA | | | | |
| Option 1 | - | 40 | 60 | - |
| Option 2 | - | 80 | 100 | - |
| Into 9-micron core, singlemode fiber at 150mA | | | | |
| Option 1 | - | 4 | - | - |
| Option 2 | - | 8 | - | - |
| Average power decrease with increase in temperature | %/°C | - | -1.5 | - |
| Average power increase with decrease in temperature | %/°C | - | +5.0 | - |

Output Power of the LDT-362 as a Function of Forward Current for Representative Temperatures

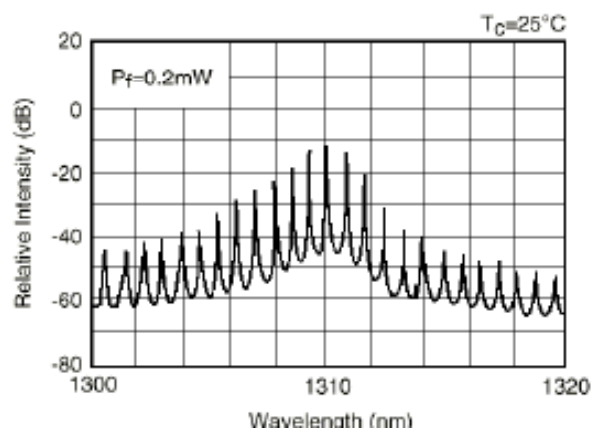
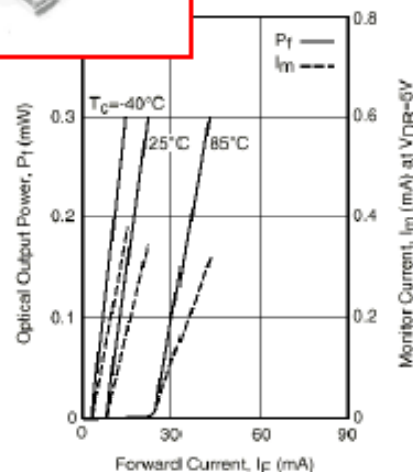


Output Power and Forward Voltage as a Function of Forward Current (at 25°C)



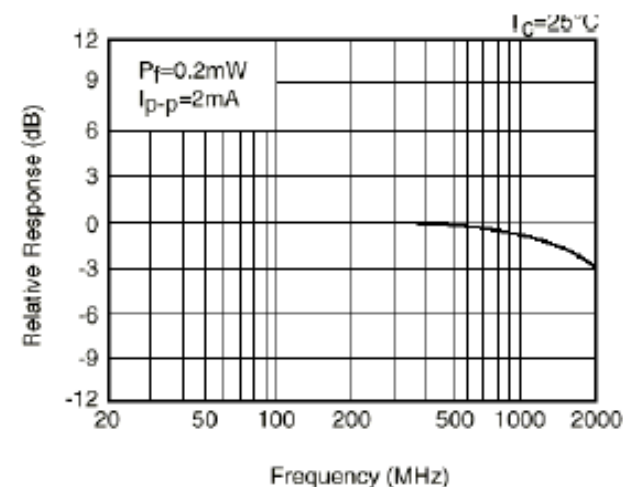
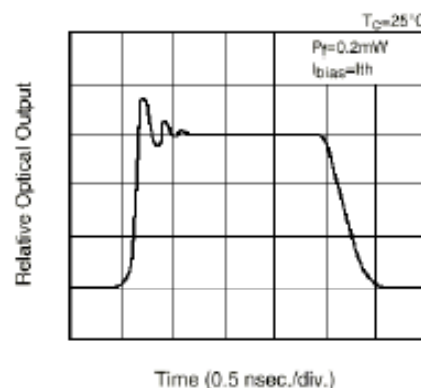
FABRY-PEROT

FUJITSU



OPTICAL AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T_C=25°C)

| Parameter | Symbol | Conditions | Limits | | | Unit |
|---|------------------|--|--------|------|-------|-------|
| | | | Min. | Typ. | Max. | |
| Fiber Output Power | P _f | CW | 0.2 | - | - | mW |
| Threshold Current | I _{th} | CW | 5 | 8 | 15 | mA |
| Operating Current | I _{op} | CW, P _f =0.2mW | 15 | - | 35 | mA |
| Forward Voltage | V _F | CW, P _f =0.2mW | - | 1.2 | 1.5 | V |
| Series Resistance | R _s | CW, P _f =0.2mW | - | 5 | 8 | Ω |
| Threshold Output Power | P _{th} | CW, I _f =I _{th} | - | 5 | 8 | μW |
| Slope Efficiency | S | CW, P _f =0.2mW | 10 | - | 25 | μW/mA |
| Linearity of dL/dI | S _{var} | CW, 20 to 260μW | - | - | +/-15 | % |
| Saturation of dL/dI | S _{sat} | CW, 20 to 260μW | -30 | - | - | % |
| Center Wavelength | λ _c | CW, P _f =0.2mW | 1,290 | - | 1,330 | nm |
| Spectral Width (RMS) | σ | CW, P _f =0.2mW | - | 1.5 | 3.0 | nm |
| Monitor Current | I _m | CW, P _f =0.2mW, V _{DR} =5V | 0.15 | - | 0.6 | mA |
| Monitor Dark Current | I _D | V _{DR} =5V | - | 1 | 50 | nA |
| Linearity of P _f -I _m | - | CW, 20 to 260μW, V _{DR} =5V | - | - | +/-10 | % |



Wavelength-Selected Ultra High-Power D2543P-Type Isolated DFB Laser Modules

agere^{systems}



Featuring wavelength selection, the D2543P type Laser Module is ideally suited for use with external lithium niobate modulators, and in ultra high-power (40 mW) applications.

Features

- High-performance, multiquantum-well (MQW), distributed-feedback (DFB) laser
- D2543P-Type is offered on 100 GHz ITU grid wavelengths ranging from 1528.77 nm—1610.06 nm
- Polarization-maintaining fiber pigtail
- For use with lithium niobate modulators
- Ultra high optical power (40 mW, CW)
- Hermetic, 14-pin package

Applications

- Telecommunications:
 - Dense WDM
 - SONET/SDH OC-192/STM-64
 - Extended and ultralong reach
 - Undersea systems
- Digital video

Description

The D2543P-Type DFB laser module is designed for use with an external lithium niobate modulator and also in applications where ultra high power (40 mW) is required. The laser module features a polarization-maintaining fiber (PMF) pigtail, enabling it to be directly connected to a modulator without the need of a polarization controller. The PMF maintains the polarization of the output light to a consistent orientation. This allows the D2543P to be used as a CW light source for systems requiring extremely low chirp such as undersea, or 10 Gbits/s and 40 Gbits/s systems. The module contains a multiquantum-well (MQW), distributed feedback (DFB) laser. The wavelength of the laser can be temperature tuned for more precise wavelength selection by adjusting the temperature of the internal thermoelectric cooler.


Table 3. D2543P-Type Optical Characteristics (at 25 °C laser temperature)

| Parameter | Symbol | Test Conditions | Min | Typ | Max | Unit |
|--|-------------------|---|---------|-----|-----------|--------|
| Peak Optical Output Power | P_P | — | 40.0 | — | — | mW |
| Center Wavelength* (See Ordering Information, Tables 5 and 6.) | λ_C | $T_L = T_{SET}$ $\lambda_C = \lambda_{ITU} \pm 0.1 \text{ nm}$ | 1528.77 | — | 1610.06 | nm |
| Line Width (3 dB full width) | $\Delta\lambda$ | CW, $P_F = 40.0 \text{ mW}$ | — | 2 | 5 | MHz |
| Side-mode Suppression Ratio | SMSR | CW | 35 | 45 | — | dB |
| Relative Intensity Noise | RIN | CW, $P_F = 40 \text{ mW}$ $200 \text{ MHz} < f < 10 \text{ GHz}$ | — | — | -140 | dB/Hz |
| Optical Isolation | — | $T_C = 0 \text{ }^\circ\text{C to } 75 \text{ }^\circ\text{C}$ | 30 | — | — | dB |
| Optical Polarization Extinction Ratio† | — | $0 \text{ }^\circ\text{C to } 75 \text{ }^\circ\text{C}$ | 20 | — | — | dB |
| FM Efficiency | FM | $f_{MOD} = 30 \text{ kHz}$, $P_F = 40 \text{ mW}$ | — | 50 | — | MHz/mA |
| Wavelength Drift (EOL) | $\Delta\lambda_C$ | Tested over 25-year lifetime | — | — | ± 0.1 | nm |

* Custom wavelengths available.

† The ST® ferrule key is not aligned to the slow axis of fiber. The connector is intended for testing purposes only.

~10 GHz

- 
- Fundamentos de la emisión óptica
 - Diodos emisores de luz, LED
 - Diodos láser, LD
 - Comparación de las características de LED y LD
 - Circuitos electrónicos en el emisor (drivers). Otras cuestiones prácticas.
- Resumen y conclusiones



- En sistemas de comunicaciones ópticas las fuentes ópticas -elementos encargados de realizar la conversión electro-óptica- están basados mayoritariamente en **materiales semiconductores** de gap directo, formando uniones PN polarizadas en directa
- Los **LED** se basan en **emisión espontánea**. Por sus características (baja coherencia, divergencia alta, baja potencia óptica de salida, circuitos electrónicos sencillos,...) se emplean habitualmente en combinación con **fibras multimodo** para enlaces de **distancias cortas y velocidades bajas**.
- Los **láseres** se basan en **emisión estimulada**, conseguida formando cavidades que combinan medio activo y espejos para la realimentación. Son de mayores prestaciones que los LED (mayor coherencia, más directivos, mayor potencia de salida,...), pero más complejos y caros. Se pueden usar en **fibras monomodo**. Los hay de dos tipos, básicamente:
 - **Láseres multimodo (Fabry-Perot)** que se usan en enlaces de **velocidades medias/bajas para distancias medias/cortas**
 - **Láseres monomodo (DFB,DBR)** que se usan en enlaces de **alta capacidad** -alta velocidad, distancias largas- y en **sistemas WDM**