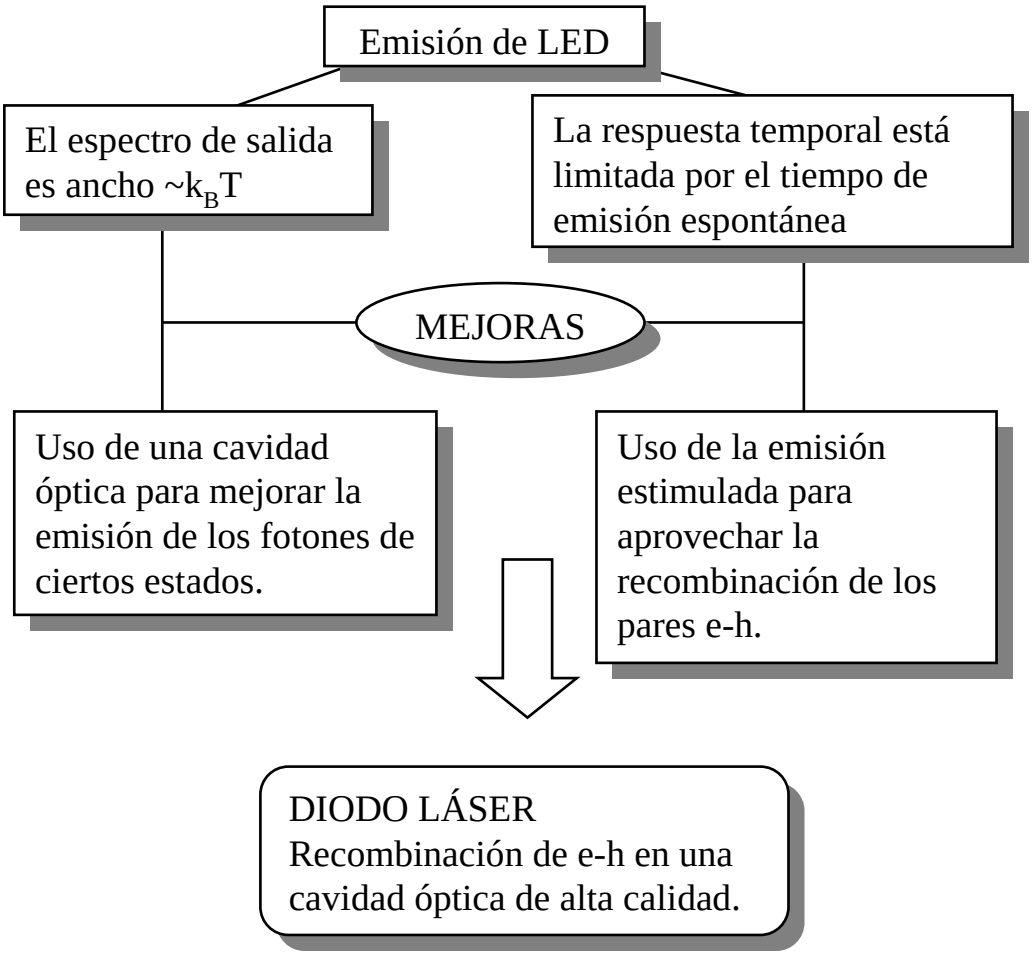
B.6. El diodo láser (LD)

B.6.1. Introducción

Ventajas frente al LED:

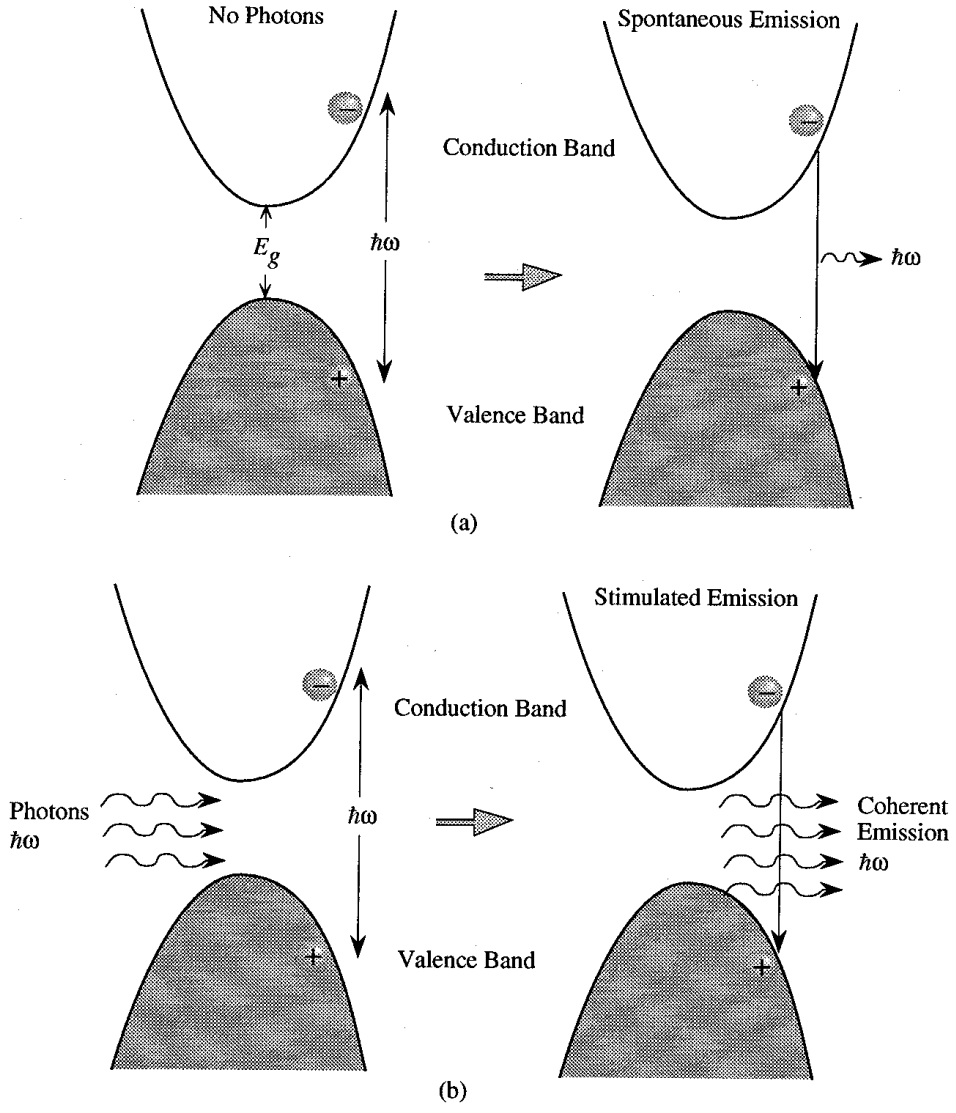
- espectro de emisión muy estrecho
- ancho de banda de hasta 50GHz
- haz luminoso de mayor intensidad y más focalizado.



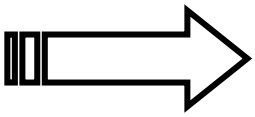
B.6.2. Emisión espontánea y estimulada

- LD => diodo p-n, pero utilizado a altos niveles de inyección y con estructura adecuada para emisión estimulada.
- LED => diodo p-n con emisión espontánea

LD => emisión estimulada
LED =>emisión espontánea



Emisión estimulada => emisión en presencia de otros fotones



El fotón emitido será de la misma frecuencia y estará en fase

Frecuencia de generación de fotones estimulados es función de:

$$W_{em}^{st}(\hbar\omega) = W_{em}(\hbar\omega) n_{ph}(\hbar\omega)$$

W_{em}: velocidad de recombinación en el proceso de emisión espontánea

n_{ph}: densidad de fotones

Debemos confinar los fotones emitidos de forma espontánea para aumentar la densidad de fotones $n_{ph}(\hbar\omega)$ => cavidad óptica

B.6.3. La estructura láser: la cavidad óptica

Confinar los fotones emitidos en una cavidad => cavidad resonante donde se reflejan los fotones

- sólo se permite que una pequeña fracción de fotones abandone la cavidad.

CAVIDADES:

- Fabry-Perot
- con realimentación distribuida
- de emisión superficial

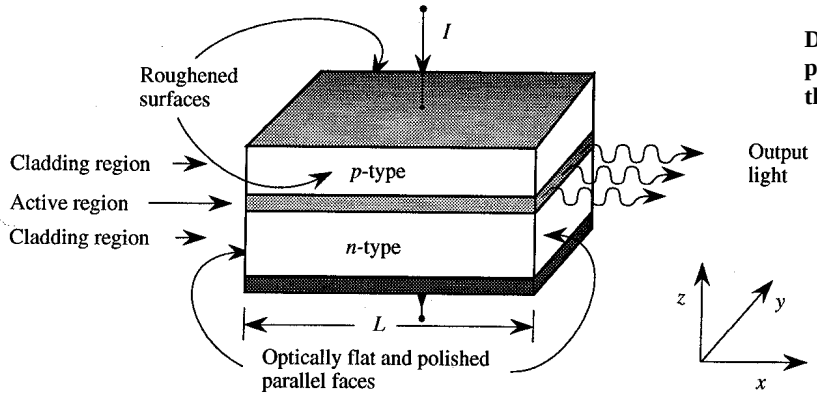
Cavidad Fabry-Perot: modos resonantes

$$L = \frac{q\lambda}{2} \qquad \text{con} \qquad \lambda = \frac{\lambda_0}{n_r}$$

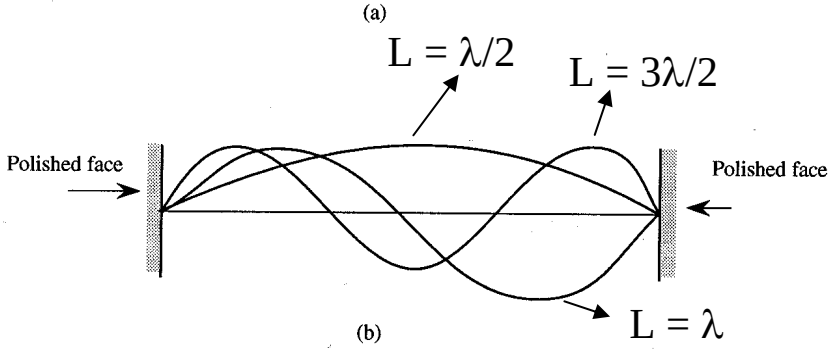
Sólo se pulen dos caras opuestas para generar modos resonantes en una sola dirección (x)

- la zona activa (donde se produce la recombinación de pares e-h) sólo ocupa una pequeña parte de la cavidad => debe diseñarse la estructura de forma que la probabilidad de que la onda óptica esté en la zona activa sea muy alta.

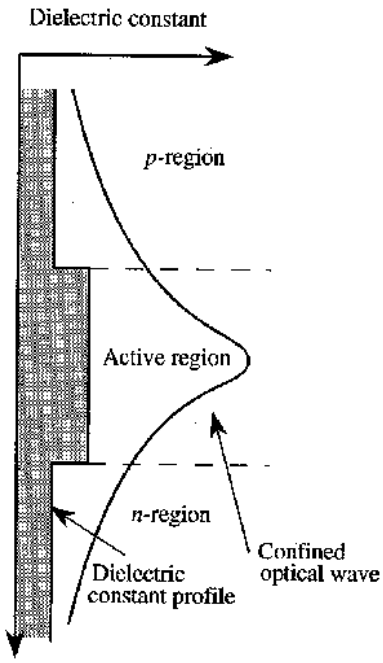
=> confinamiento en z: La cavidad se recubre con materiales de mayor anchura de la banda prohibida (heteroestructuras)



(a)

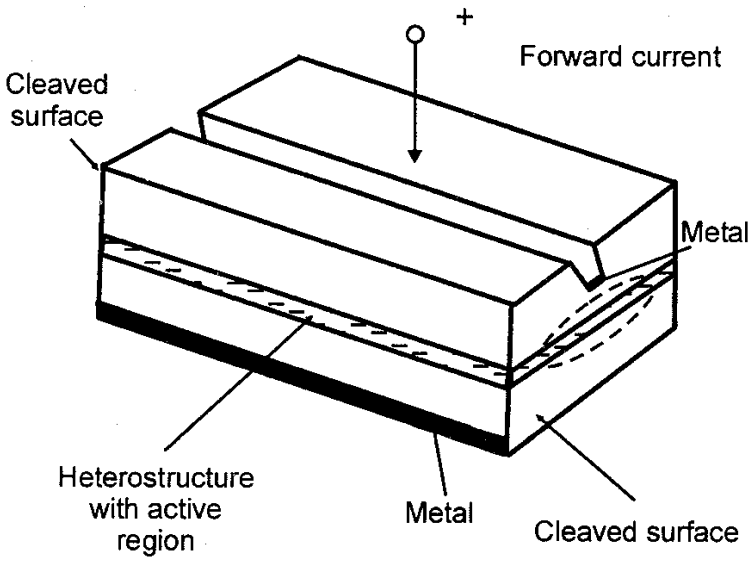


(b)



(c)

=> confinamiento en y: contacto en forma de tira metálica estrecha que restringe el flujo de corriente dentro de una estrecha región por debajo de la tira.



- Mayores avances en láseres => avances en la cavidad

• Γ= Factor de confinamiento óptico

Nos da la fracción de la onda óptica en la zona activa.

Γ ≅ 100% en láseres de heteroestructura.

Γ ≅ 1% en láseres de pozo cuántico pero mejores propiedades electrónicas debido a la bidimensionalidad de estados energéticos.

B.6.3.1. Absorción óptica, pérdidas y ganancia

• Ganancia del material en la zona activa:

Viene dada como diferencia entre los procesos de absorción y emisión.

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

Si se cumple la condición de inversión de población, es decir, hay más e^- en la BC en las proximidades de E_c que en la BV en las proximidades de E_v :

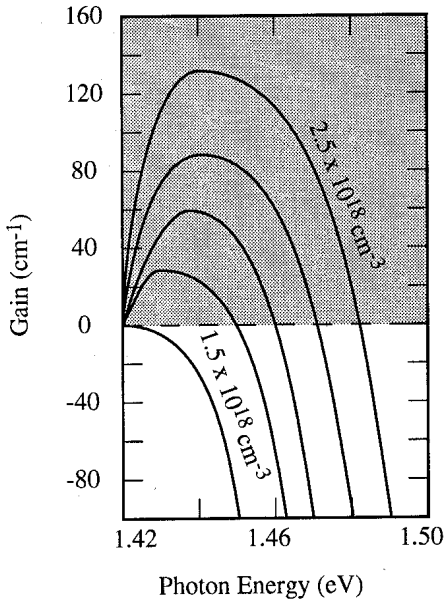
$$f^e(E^e) + f^h(E^h) > 1$$

$\Rightarrow$ g>0 y la intensidad óptica crece:

$$I_{ph} = I_{ph}^0 e^{g(\hbar\omega)x}$$

ganancia > 0 => inversión de población
=> sucede a alto nivel de inyección

pero incluso a altos niveles de inyección, si $\hbar\omega >> E_g$ *como las probabilidades de ocupación son pequeñas,* $g < 0$



• Ganancia de la cavidad = $\Gamma \cdot g(\hbar\omega)$

Γ: confinamiento óptico ~1 para heteroestructuras
0,01 para pozos cuánticos

Pozos cuánticos tienen mayor ganancia debido a que g es muy alta.

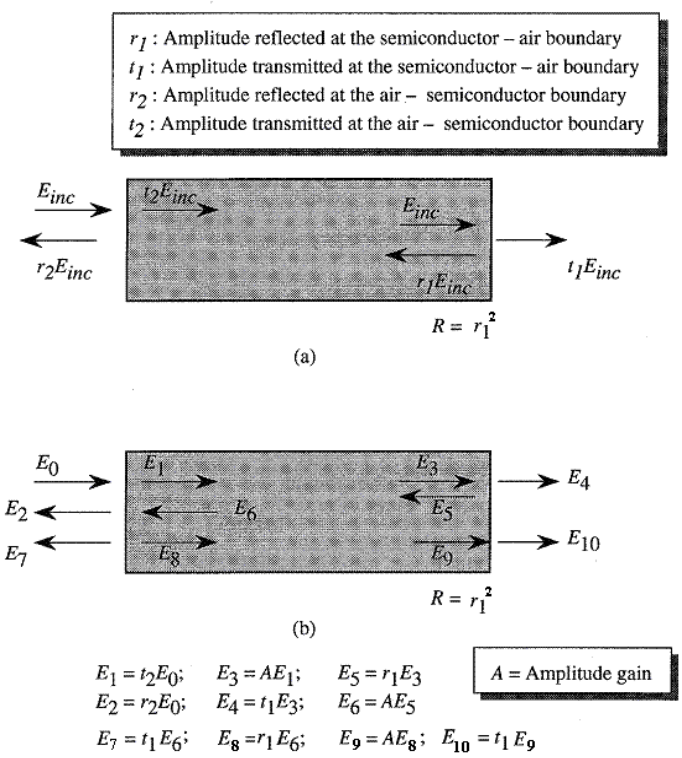
Para que emita el láser => ganancia inicial > pérdidas de fotones

• Pérdidas de fotones:
i) absorción de fotones en recubrimiento y contactos (α_{loss}).
ii) fotones que abandonan la cavidad.

i) Pérdidas por absorción de fotones (α_{loss}): absorción por portadores libres. Este proceso es mucho menor que la absorción óptica de banda a banda.

Llamaremos $g_{tot} = \Gamma \cdot g - \alpha_{loss}$

ii) Pérdidas por transmisión y reflexión: estudiemos la cavidad de Fabry-Perot



$$E_{trans} = E_4 + E_{10} + \ldots = \frac{t_1 t_2 A}{1 - A^2 r_1^2} E_0$$

$$E_{ref} = E_2 + E_7 + \ldots = \left(r_2 + \frac{r_1 t_1 t_2 A^2}{1 - A^2 r_1^2} \right) E_0$$

con $$A = e^{\left(\frac{g_{tot}}{2} + ik \right) L}$$

• <u>Condición para inicio del efecto láser</u> => E_{trans} y E_{ref} $\neq 0$ y $E_0 = 0$

Para ello se ha de cumplir que $A^2 r_1^2 = 1$

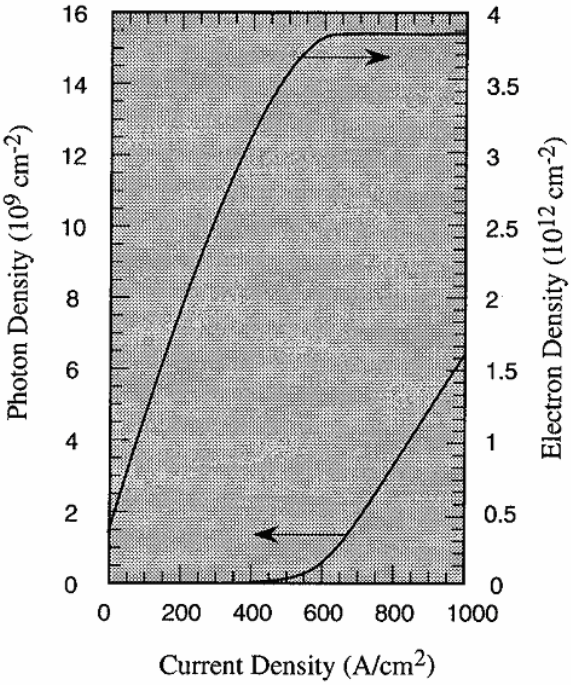
$$\Rightarrow \quad g_{tot}(th) = \Gamma g_{th} - \alpha_{loss} = \frac{1}{L} \ln r_1^{-2}$$

o si $R = r_1^2$ $$\Gamma g_{th} = \alpha_{loss} - \frac{1}{L} \ln R$$

y la fase debe cumplir: $$k = \frac{m\pi}{L}$$

Estas condiciones no son las mismas para otras cavidades.

B.6.4. El láser por encima y por debajo del umbral



LD tiene cambio abrupto por debajo del valor umbral

valor umbral: ganancia de la cavidad > pérdidas de la cavidad

Baja inyección => ganancia baja => como un LED

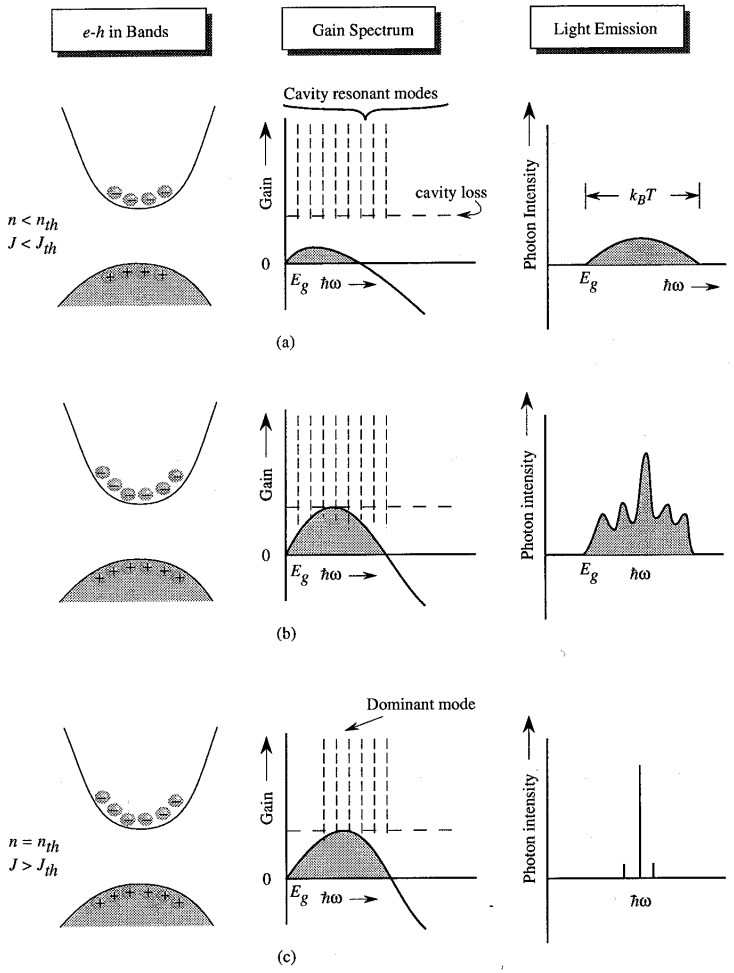
$$I_{ph} = (1 - \beta_{loss})\,(R_{spon} A d_{las}) = (1 - \beta_{loss})\,\frac{I}{e}$$

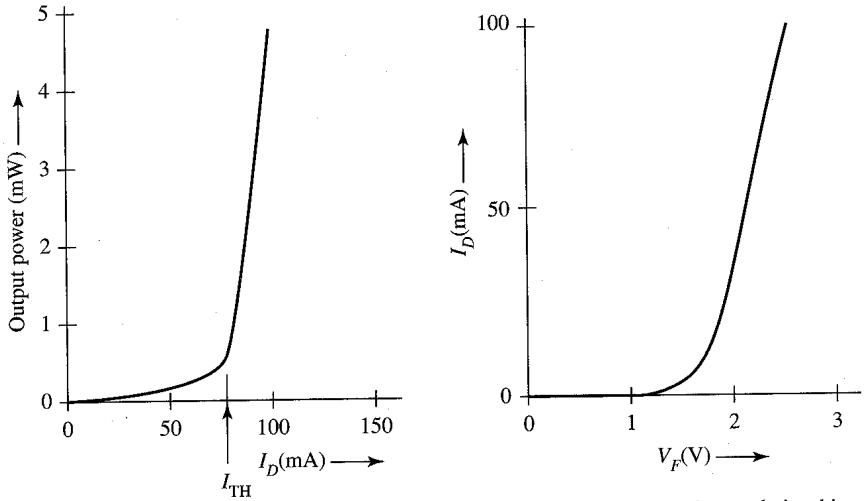
Alta inyección => ganancia mayor que la umbral => LD

En el umbral: $$n_{th} = \frac{J_{th} \cdot \tau_r(J_{th})}{e \cdot d_{las}}$$

$$I_{ph} = \frac{I}{e} = \frac{n_{th} A d_{las}}{\tau_r}$$

Luz igual que el LED, pero monocromática, coherente y colimada.

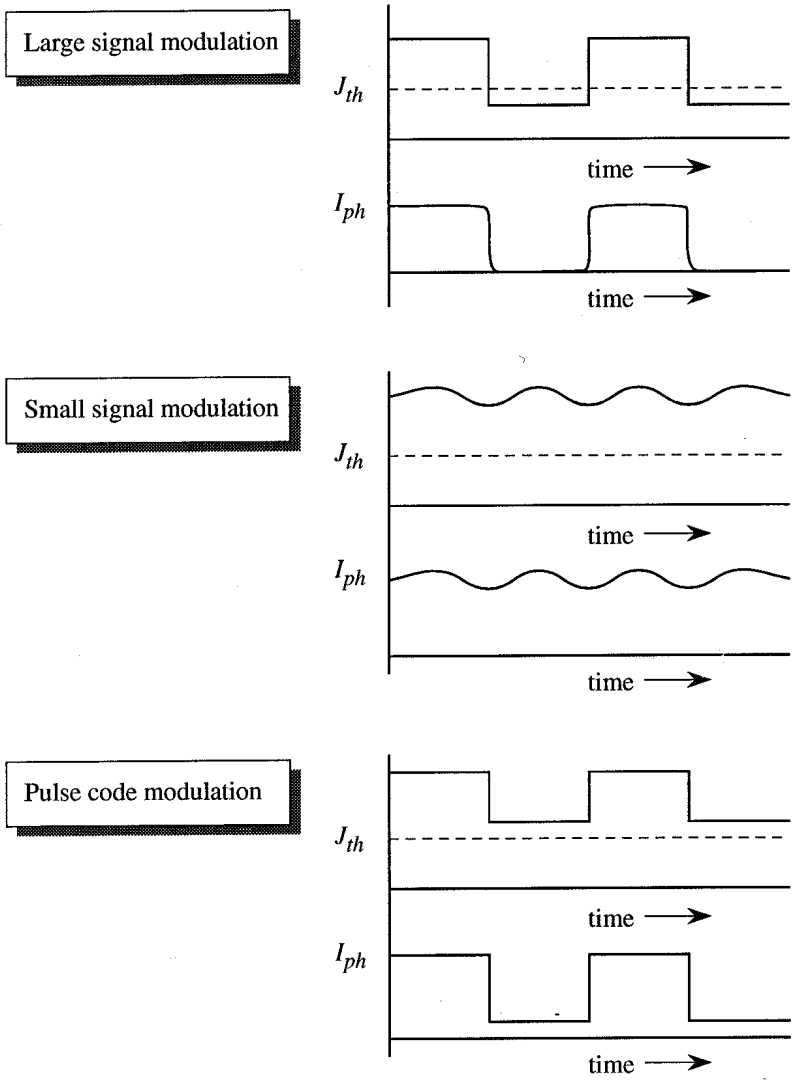




(a) Output power, current relationship

(b) Forward current voltage relationship

B.6.5. El tiempo de respuesta del diodo láser



Bajo ancho de banda
~10ns

Mayor ancho de banda
~50GHz

Buen ancho de banda
~10GHz

Respuesta general depende de límites intrínsecos y extrínsecos

límites intrínsecos => diseño de la cavidad, arrastre y difusión de portadores

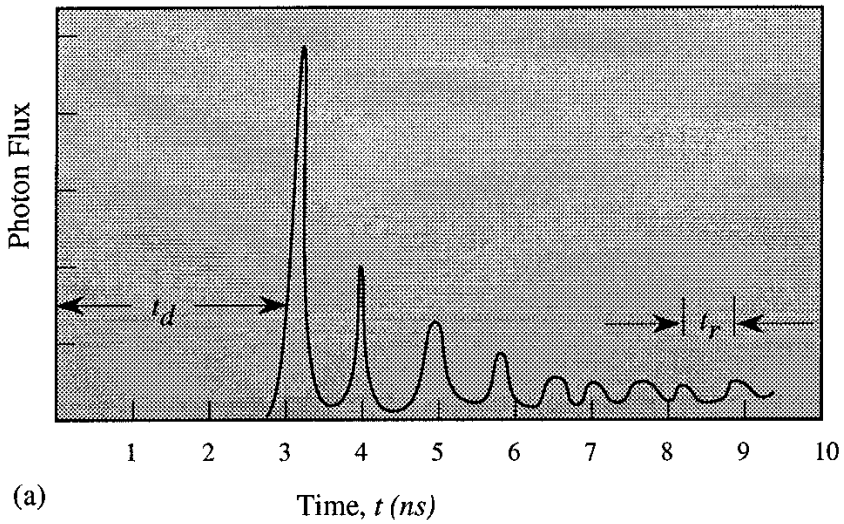
límites extrínsecos => - sobrecalentamiento
- degradación de los espejos
- elementos parásitos

B.6.5.1. Conmutación del láser en gran señal

- retraso desde la inyección de la corriente hasta la emisión de fotones

$$t_d = \tau \ln\left(\frac{J}{J - e\frac{n_{2D}(th)}{\tau}}\right) = \tau \ln\left(\frac{J}{J - J_{th}}\right)$$

- oscilaciones hasta alcanzar el equilibrio



B.6.5.2. Respuesta del láser en pequeña señal

Depende de:

1) La corriente inyectada y la corriente umbral:
- mayor corriente inyectada mejor respuesta
- menor corriente umbral (mejor relación corriente inyectada luz emitida)

2) Efecto Auger:

- su existencia obliga a aumentar el nivel de inyección para alcanzar el mismo nivel de luz
- aumenta el amortiguamiento reduciendo el ancho de banda

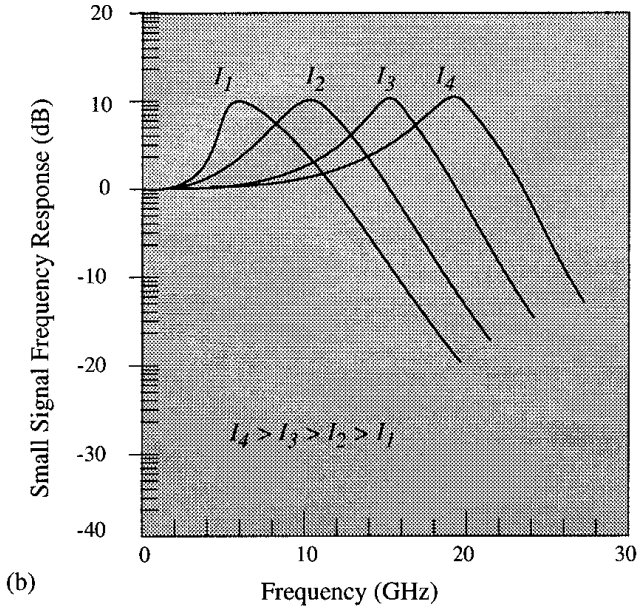
3) Vida media de los fotones:

- reducir la vida media para aumentar el ancho de banda
- pero ganancia y valor umbral dependen de esta vida media
- la vida media se reduce acortando la cavidad, longitud óptima 100μm

4) Variación de ganancia:

- cuanto mayor variación de la ganancia en la región activa mayor ancho de banda.

NOTA: Desgraciadamente sólo se han alcanzado anchos de banda de 40GHz con LDs normales y 35GHz con LDs de pozo cuántico => con dispositivos de microondas se alcanzan hasta 300GHz



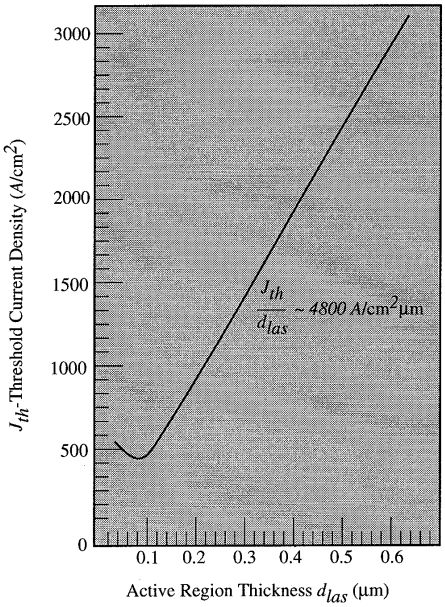
(b)

B.6.6. Diseño de láseres semiconductores : diseño de estructuras electrónicas

Se busca:

- reducción de la corriente umbral
- aumento del ancho de banda
- Láseres con frecuencias de emisión importantes en aplicaciones concretas.

B.6.6.1 Corriente umbral baja

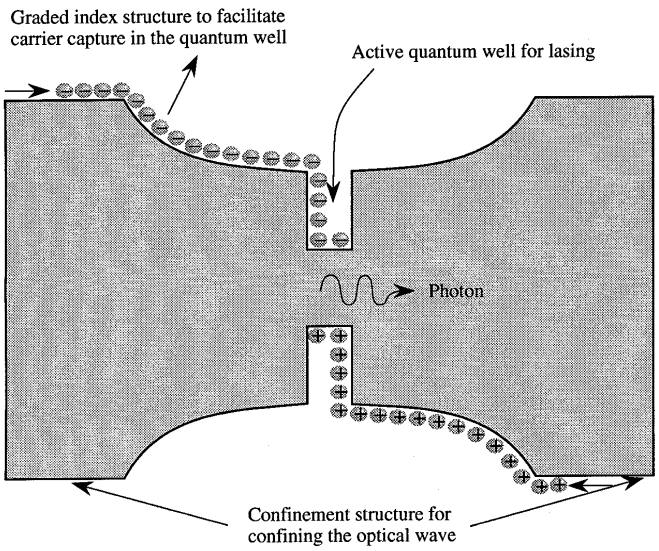


$$J_{th} = \frac{e \cdot n_{th} \cdot d_{las}}{\tau_r(J_{th})} = \frac{e \cdot n_{2D}(umbral)}{\tau_r(J_{th})}$$

- Se reduce disminuyendo d_{las} (grosor de la zona activa) pero para valores muy pequeños $\Rightarrow \Gamma \to 0 \Rightarrow$ Ganancia de la cavidad = $\Gamma \cdot g(\hbar\omega) \to 0$ y $J_{th} \uparrow$.

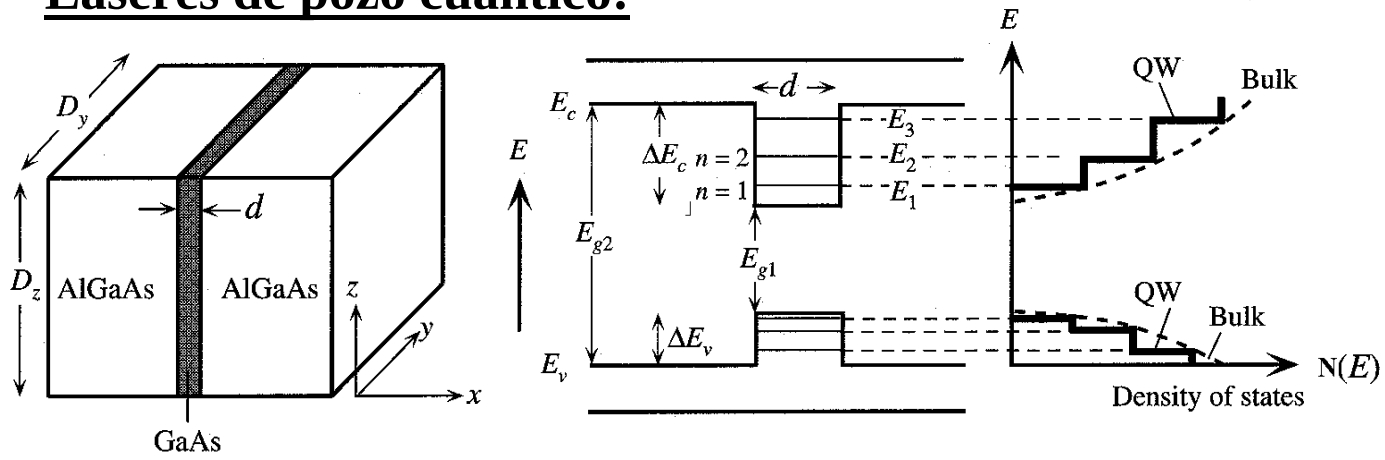
- Aumentando el dopado tipo p de la región activa.

<u>Pozos cuánticos:</u> se consigue reducir la corriente umbral en un factor 3



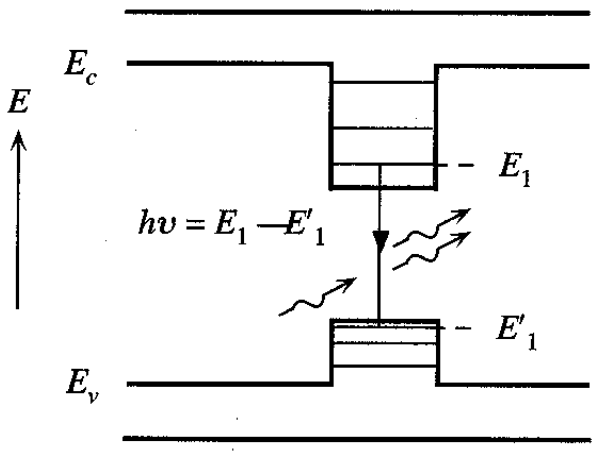
En un pozo cuántico se produce una reducción de la densidad de estados energéticos permitidos lo que hace que la condición de inversión se alcance con mucha menor inyección.

Láseres de pozo cuántico:



$$E = E_c + \frac{\pi^2 \cdot \hbar^2 \cdot n^2}{2 \cdot m_e^* \cdot d^2} + \frac{\pi^2 \cdot \hbar^2 \cdot n_y^2}{2 \cdot m_e^* \cdot D_y^2} + \frac{\pi^2 \cdot \hbar^2 \cdot n_z^2}{2 \cdot m_e^* \cdot D_z^2}$$

Como D_y y D_z >> d, la mínima energía (E_1) es determinada por n y d y la separación entre niveles energéticos determinados por n_y y n_z (plano yz) es tan pequeña que podemos suponer que el electrón es libre para moverse en dicho plano.



- la concentración de electrones en E_1 aumenta rápidamente con la corriente con lo que la inversión de población entre E_1 y E'_1 puede ocurrir sin necesidad de una gran corriente.

- la mayor parte de los electrones están en E_1 y la mayor parte de los huecos en E'_1 con lo que la energía de los fotones emitidos es muy cercana a E_1- E'_1 (menor anchura espectral).

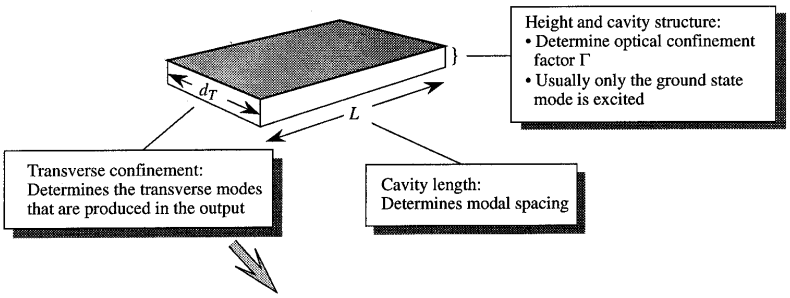
B.6.7. Estructuras avanzadas

B.6.7.1. Aspectos de la cavidad de Fabry-Perot

- Modos longitudinales (L):

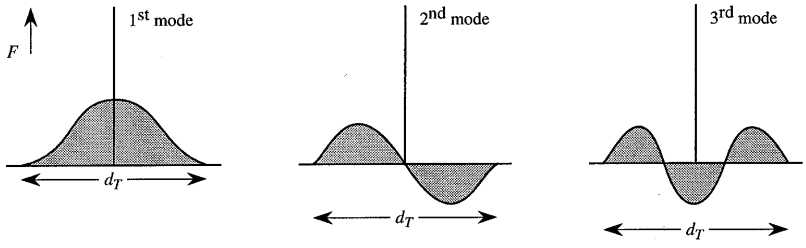
$$\nu = m \cdot \frac{c}{2 \cdot n_r \cdot L} \qquad m = 1, 2, 3, \ldots$$

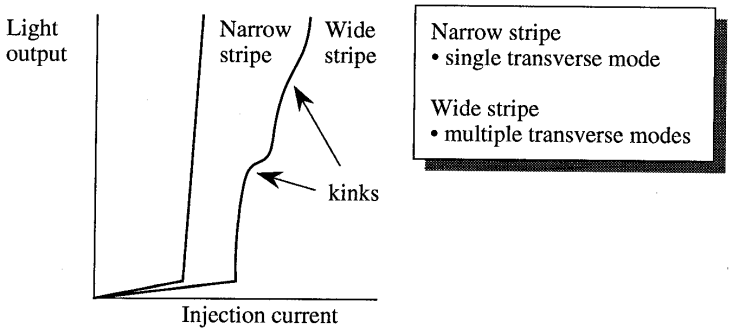
$$\Delta\nu = \frac{c}{2 \cdot n_r \cdot L}$$



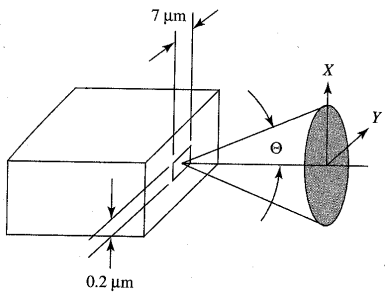
- Modos transversales (d_T):

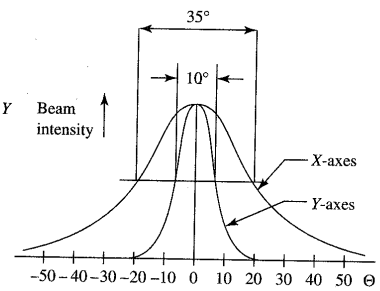
Si d_T es grande tenemos modos transversales muy próximos en frecuencia. La salida tendrá varios de estos modos al aumentar la inyección de corriente => aparecen codos en la respuesta = ruido que hay que evitar.

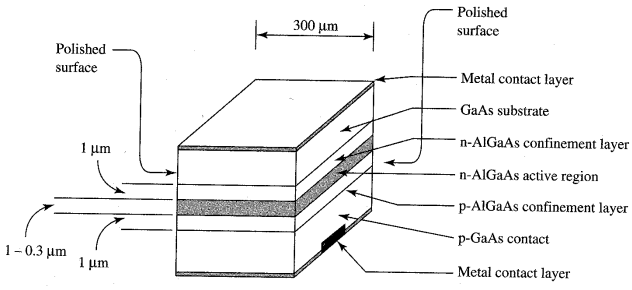




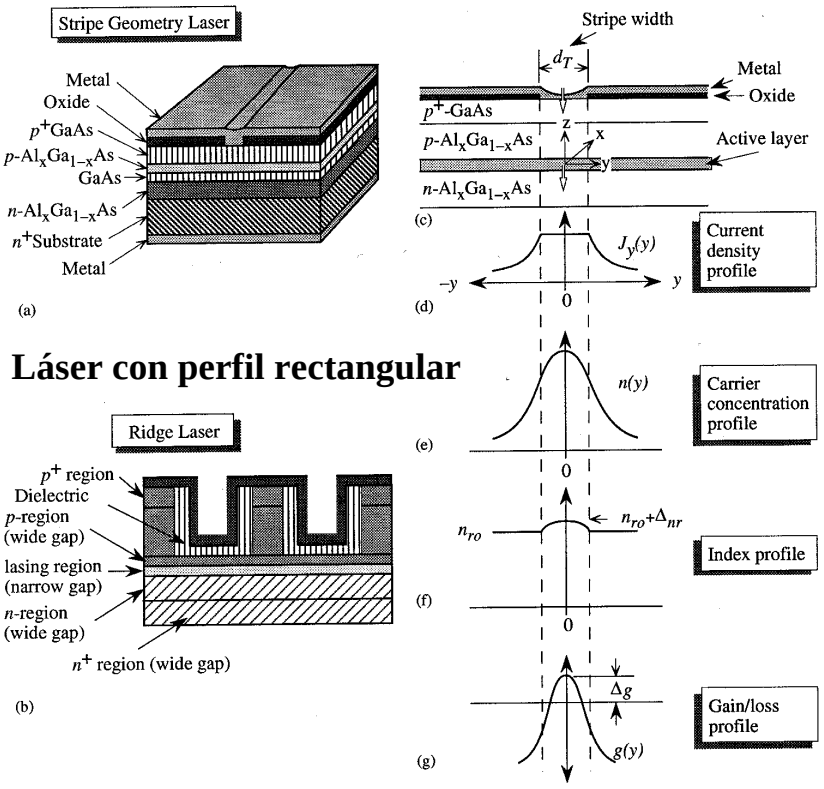
Patrón de radiación similar al de un ELED salvo que los semiejes ancho y estrecho del cono elíptico se invierten y los ángulos de apertura son menores.







Cavidades guiadas por ganancia:

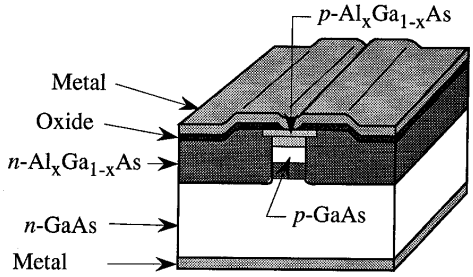


Láser con perfil rectangular

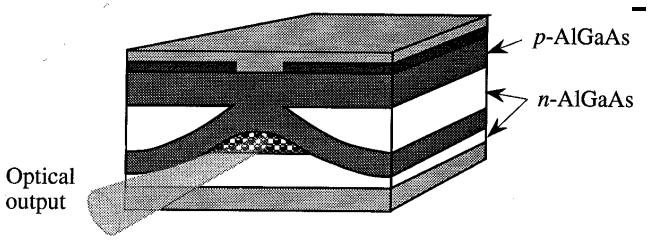
Láser con geometría de tiras: la concentración de portadores no uniforme debajo de la tira genera un perfil de ganancia altamente no uniforme que es lo que produce el efecto de guiado.

- Varios modos transversales.

Cavidades guiadas por índice:

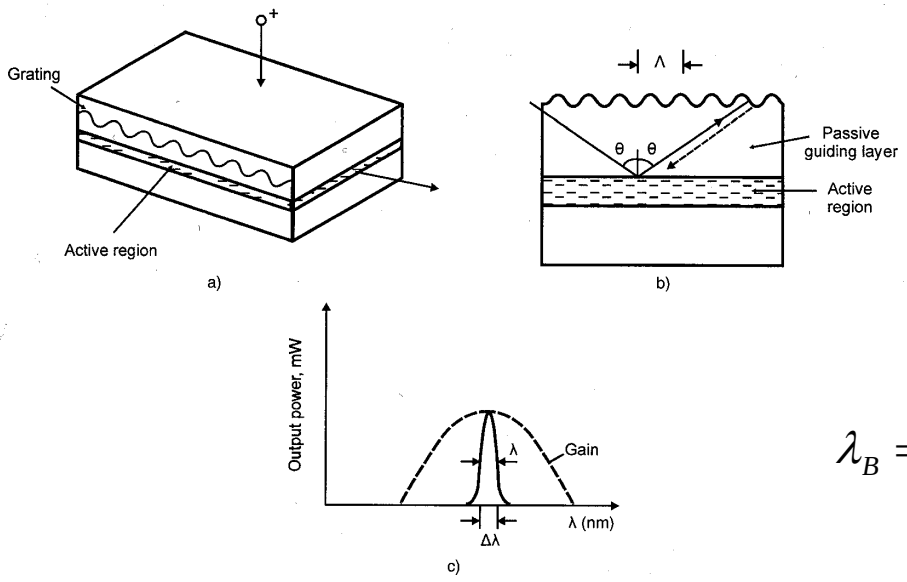


- Variación del índice escalón rodeando la zona activa de materiales de mayor gap.
- Sin codos en su característica (monomodal)
- corriente umbral baja



B.6.7.2 Láseres de realimentación distribuida (DFB)

Se desarrollan para aumentar la selectividad modal => mejora del ancho de espectro.



Sólo las longitudes de onda λ_B, interferirán constructivamente al reflejarse y existirán en la cavidad.

$$\lambda_B = \frac{2 \cdot \Lambda \cdot n_{eff}}{q} \qquad q = 1,2,...$$

$n_{eff} = n \cdot \sin\theta$

Proceso de fabricación difícil => coste mucho mayor

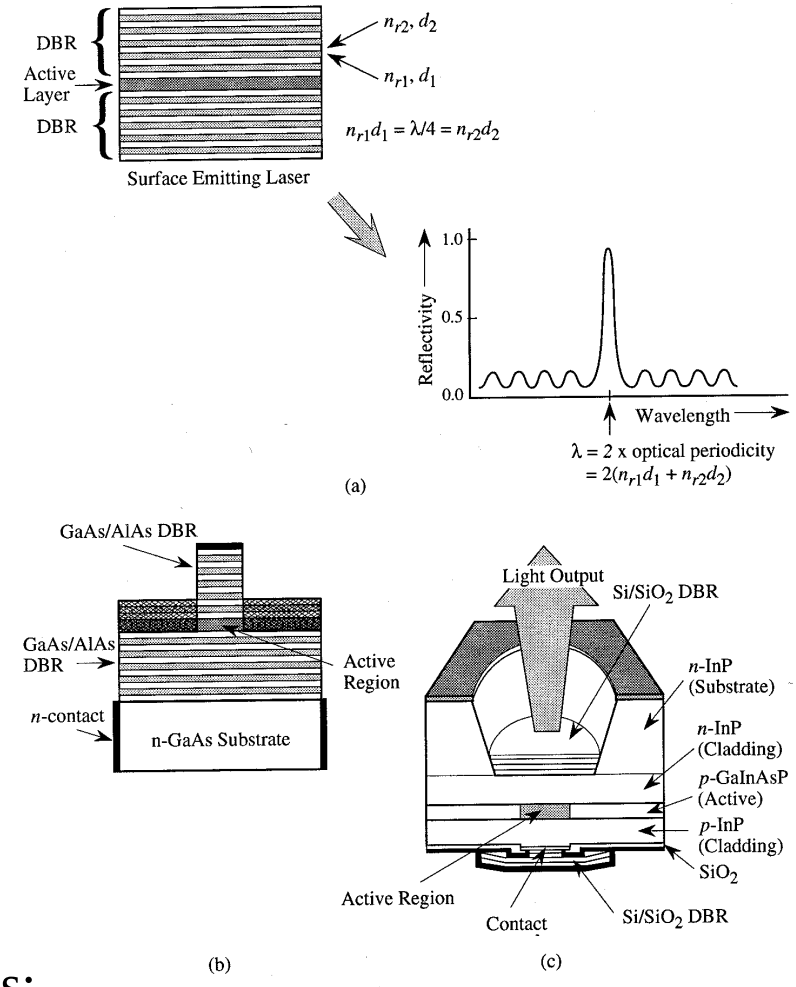
B.6.7.3 Láseres de emisión superficial (SEL)

- permite láseres de menor tamaño
- permite corrientes umbrales menores

- los espejos se colocan en las superficies superior e inferior
- se aplican reflectores distribuidos de Bragg (DBR) para mejorar la reflectividad (hasta un 99%). Alta reflectividad a λ_0 si:

$$n_{r1}d_1 + n_{r2}d_2 = \frac{\lambda_0}{2}$$

- se pueden construir matrices de láseres y alcanzar potencias de 1W



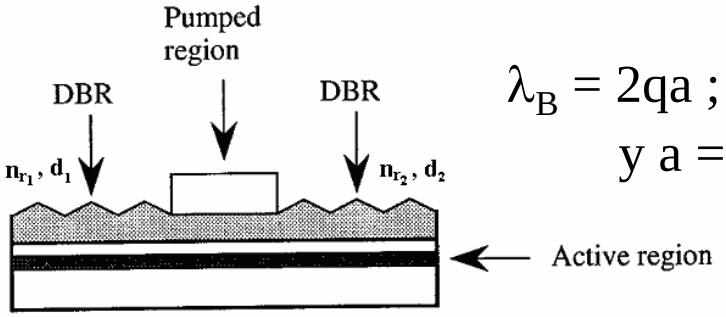
Problemas:

- inyección de carga: los espejos dificultan la inyección de carga
- calentamiento: los DBRs tienen alta resistencia

Un láser de semiconductor no supera los 10mW => con una matriz de SEL llegamos a 1W (pero no están en fase)

B.6.7.4 El láser DBR

- las capas reflectantes están fuera de la región activa
- permite modular la longitud de onda electrónicamente a través de n_{r1} y n_{r2}.



Distributed Bragg reflector structure

$\lambda_B = 2qa$; con q un nº entero positivo

y $a = n_{r1}d_1 + n_{r2}d_2$

$\Delta\lambda \cong 30Å$

B.6.8 Dependencia con la temperatura de la emisión del láser

B.6.8.1 Dependencia con la temperatura de la corriente umbral

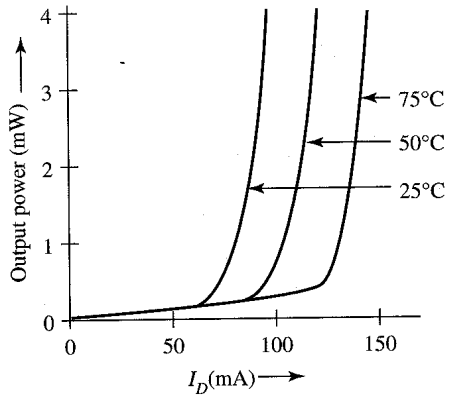
- corriente umbral aumenta con la temperatura, ya que:

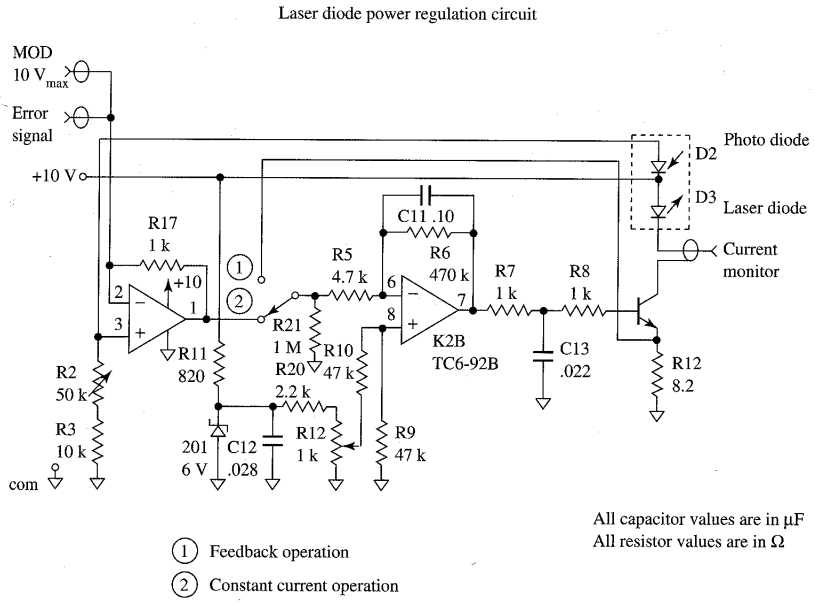
i) Se necesita una mayor inyección de portadores para que se llegue a cumplir la condición de inversión de población pues f^e y f^h se expanden.

ii) Pueden existir electrones y huecos con energías mayores => portadores que abandonan la región activa, produciendo pérdidas

iii) recombinación de Auger

$$J_{th}(T) = J_{th}^0 e^{\frac{T}{T_0}}$$





B.6.8.2. Dependencia con la temperatura de la frecuencia de emisión

- la frecuencia de emisión cambia con la temperatura, ya que:

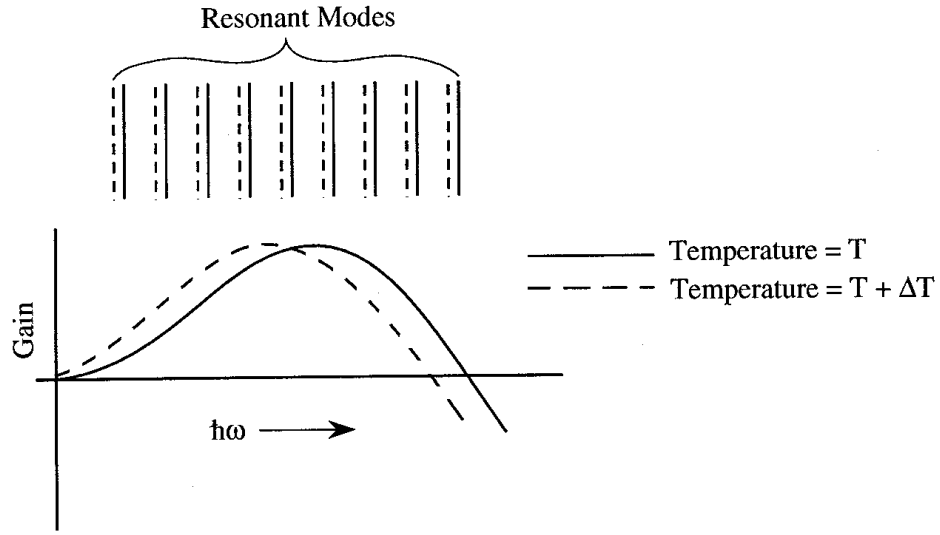
i) variación de la banda prohibida => variación del espectro de ganancia en 3Å o 4Å por K.

ii) la expansión térmica de la cavidad y la variación del índice de refracción altera la posición de los modos resonantes:

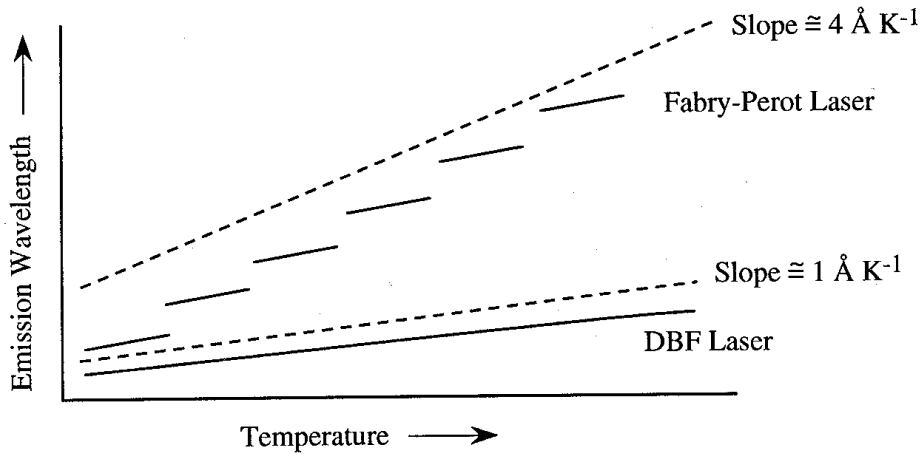
$$q\lambda_q = 2L; \quad \lambda_q = \frac{\lambda_{q0}}{n_r}$$

Como resultado de ambos efectos, la longitud de onda de emisión varía desplazándose a 1Å/K hasta que un modo adyacente se convierte en el más próximo al pico de ganancia, momento en el que se produce un salto de un modo a otro.

- en láseres DFB no se produce el salto de modos y la variación es continua con la temperatura



(a)



(b)

B.6.9 Aplicaciones del diodo láser

Normas de seguridad:

•Utilícense gafas especiales para cada uno de los láseres que se van a manipular.

•Nunca mirar al rayo láser directamente ni tampoco a una imagen especular del rayo.

•Para rayos de alta potencia siempre es conveniente terminarlos con un material absorbente y a ser posible en un contenedor cerrado.

•Se debe proteger la piel para láseres de potencia. Ropa blanca de grosor medio (bata de laboratorio) reduce la exposición del rayo láser en un factor 100.

•Un rayo invisible produce los mismos daños que uno visible. Hay que tomar por tanto precauciones especiales al trabajar con rayos láser fuera del espectro visible.

Aplicaciones principales:

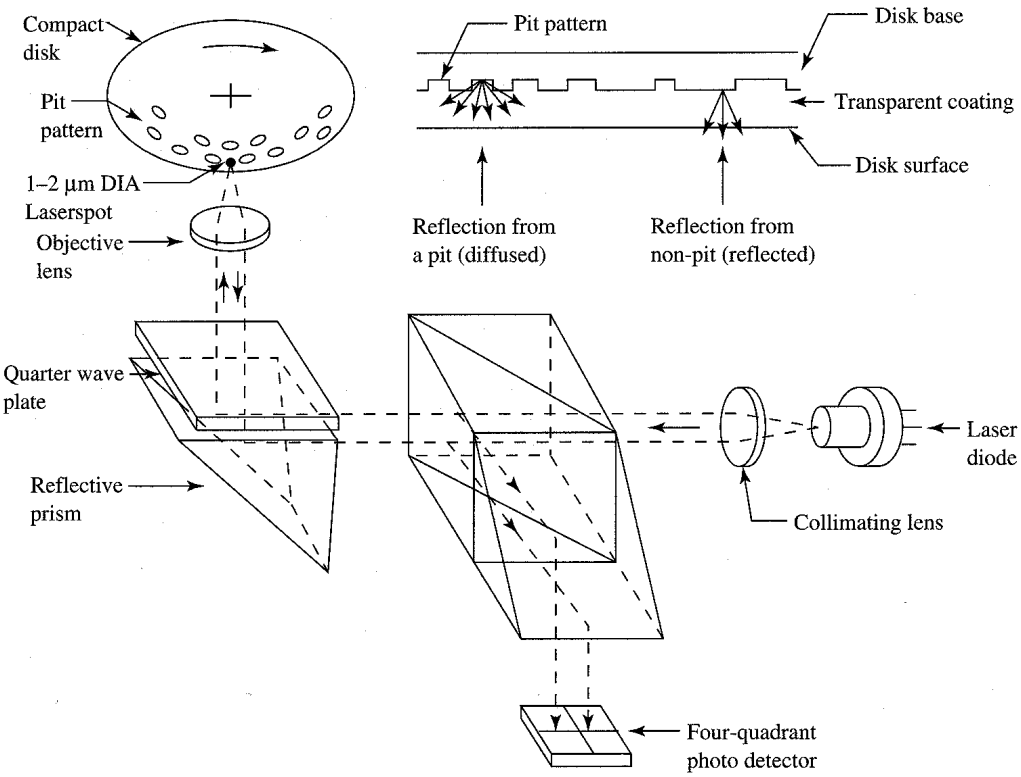
(a) aplicaciones industriales y de trabajo con materiales
(b) procesado de información y comunicaciones ópticas
(c) aplicaciones médicas y biológicas
(d) aplicaciones científicas y de medida

(a) aplicaciones industriales y de trabajo con materiales

- mayor precisión en cortes y tratamiento de materiales
- los materiales no se calientan => no se deforman
- coste elevado

(b) procesado de información y comunicaciones ópticas

- CD-ROM
- código de barras
- impresora láser
- comunicaciones ópticas

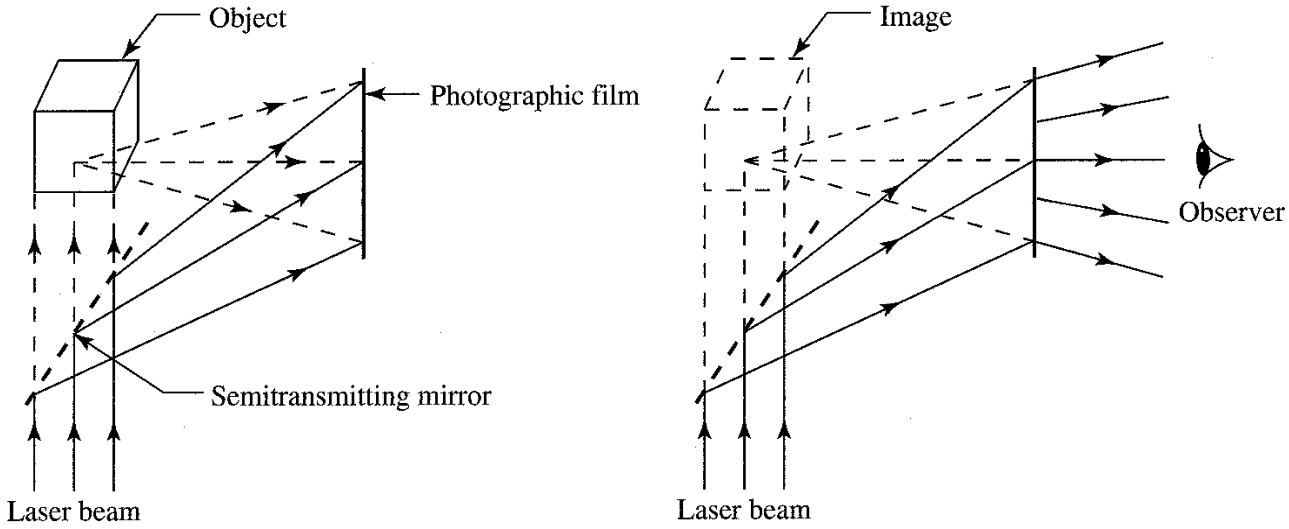


(c) aplicaciones médicas y biológicas

- operaciones
- diagnóstico

(d) aplicaciones científicas y de medida

- determinar líneas horizontales
- medida de distancias
- holografía



(a) Recording the hologram

(b) Displaying hologram