

COMUNICACIONES OPTICAS

LASERES DE SEMICONDUCTOR

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

TEORIA LASER

Light Amplification by Stimulated Emission of radiation (LASER)
Amplificación de luz por radiación de emisión estimulada

En un semiconductor en equilibrio térmico se cumple que:

$$\frac{\text{tasa}_{\text{emisión}_{\text{estimulada}}}}{\text{tasa}_{\text{emisión}_{\text{espontánea}}}} = \frac{1}{e^{hc/\lambda k_B T} - 1}$$

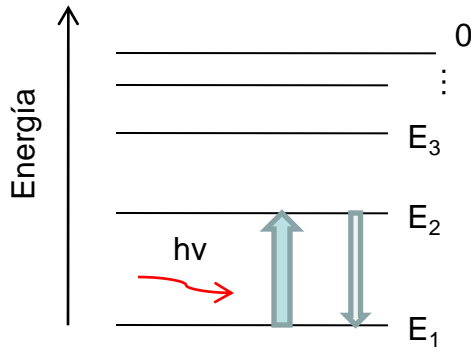
Para $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ y $T = 300^\circ\text{K}$, esta relación es del orden de 10^{-26} , es decir, casi nula.

Para lograr el efecto láser, es necesario un medio con **GANANCIA**, forzando a que sea muy probable que existan transiciones por **RADIACION ESTIMULADA** teniendo muchos electrones o átomos en estados excitados (**INVERSION DE POBLACION**).

Para lograr la inversión de población se debe introducir energía (óptica, eléctrica, etc) en el sistema para romper el equilibrio térmico y existan mas átomos en el nivel excitado que en el fundamental (**BOMBEO**).

Para aumentar el numero de transiciones radiativas es necesario un alto flujo de fotones en la región en la que se va a producir la transición. Esto implica una **RETROALIMENTACION OPTICA** a través de un **RESONADOR** (no todos los fotones son emitidos y gran parte de ellos permanecen dentro del resonador para fomentar la emisión estimulada).

INVERSION DE POBLACION



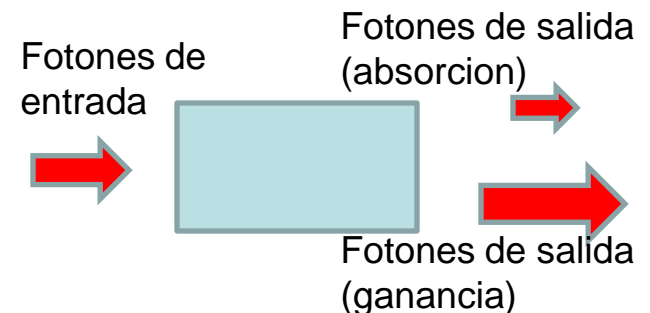
Cuando un fotón entra en un medio con energías cercanas a la diferencia de energías entre dos niveles existe una probabilidad de que se absorba y otra de que genere emisión estimulada.

La probabilidad de absorción es proporcional al numero de átomos/electrones en el nivel excitado.

Se producirá ganancia si tenemos mas fotones a la salida que a la entrada.

Para potenciar la emisión estimulada sobre la absorción deberemos colocar mas átomos en el estado excitado (muchos portadores en banda de conducción y muchos huecos en banda de valencia).

A esto se le conoce como **INVERSION DE POBLACION**, y se necesita un aporte de energía considerable en forma de **BOMBEO** para lograrla.

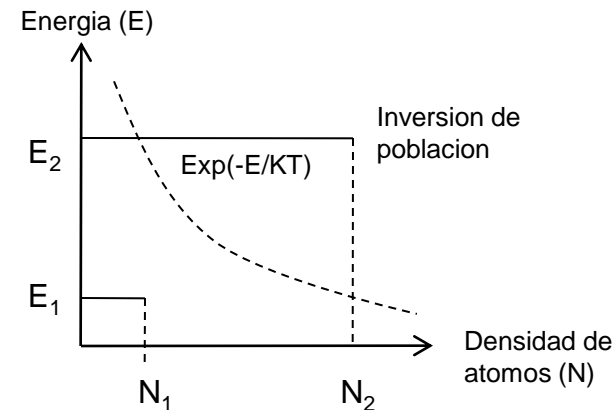
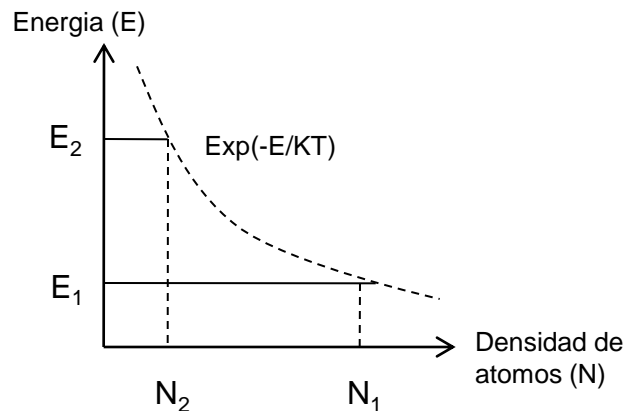


INVERSION DE POBLACION

Bajo condiciones de equilibrio térmico dada por la distribución de Boltzmann el nivel mas bajo de energía E_1 de los dos niveles del sistema atómico contiene mas átomos que el nivel de energía mas alto E_2 .

Sin embargo, para obtener amplificacion optica es necesario crear una distribucion de atomos de no equilibrio tal que la poblacion del nivel de energia superior sea mayor que el nivel mas bajo de energia ($N_2 > N_1$)

Para obtener la inversion de poblacion se deben excitar atomos en el nivel de energia mas alto E_2 y por lo tanto obtener una distribucion de no equilibrio. Este proceso se obtiene utilizando una fuente de energia externa (BOMBEO).



BOMBEO

Formas de realizar el bombeo: en un láser de He-Ne por colisiones entre átomos, en amplificadores ópticos con otro láser de semiconductor y en láseres de semiconductor a través de la inyección de portadores.

En todos ellos se necesita un aporte energético mayor que el que finalmente entregue el láser.

En cualquier caso, es necesario que el flujo de fotones incidentes sea grande para que se potencie el efecto de emisión estimulada.

Esto se realiza añadiendo al elemento con ganancia un sistema de realimentación óptica, donde los fotones quedan semi-atrapados en una cavidad resonante.

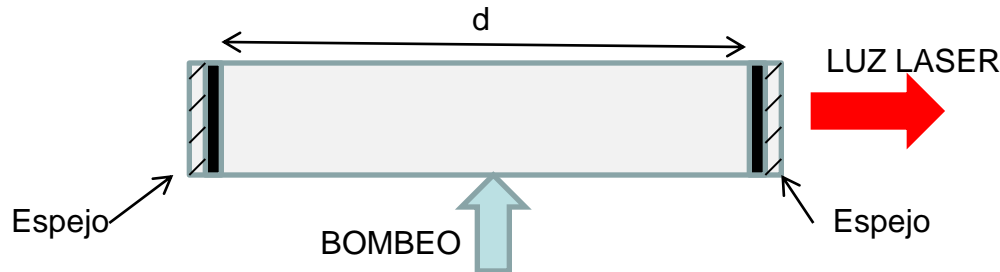
RESONADORES

Cuando el medio tiene ganancia (emisión \gg absorción), se necesita aumentar el número de fotones dentro de dicho medio para potenciar aún más la emisión estimulada.

El resonador más simple consiste en fabricar un par de espejos a ambos lados del medio con ganancia, de forma que los fotones generados se mantengan dentro de la cavidad dando lugar a más fotones por emisión estimulada.

Se produce un efecto de RETROALIMENTACION limitado por el número de átomos que puedan dar lugar a emisión estimulada y a las propiedades mecánicas del material.

Al menos uno de los espejos debe tener reflexión menor del 100% para poder emitir luz al exterior.



**Resonador
Fabry-Perot.**

El resonador también influye sobre las propiedades espectrales de la luz emitida.

Para un resonador con distancia d , en una ida y vuelta completa la luz se desfase un valor $2kd$.

Para que el resonador admita fotones de una determinada longitud de onda se debe cumplir que:

$$2kd = \frac{4\pi nd}{\lambda} = m2\pi \quad \text{n es el índice refractivo del medio con ganancia}$$

RESONADORES

Las longitudes de onda permitidas son: $\lambda_m = \frac{2nd}{m}$ o $\nu_m = \frac{c}{2nd} m$

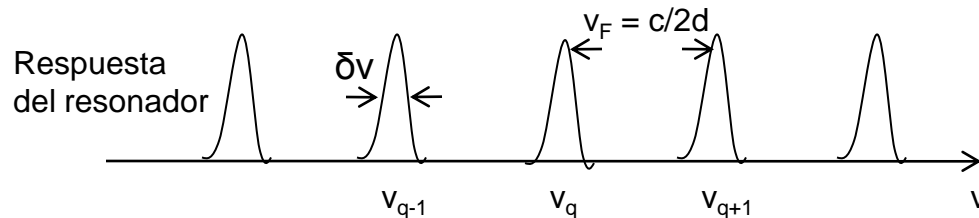
Dos frecuencias ópticas permitidas están separadas una distancia $c/2nd$. De acuerdo al tamaño del resonador existirán mas o menos frecuencias permitidas en un rango de longitudes de onda determinado.

La anchura espectral que se permite transmitir para cada frecuencia de paso es:

$$\delta\nu = \frac{c}{2nd} \frac{1}{F}$$

Donde F es la “fineza” del resonador

$$F = \frac{\pi R^{1/4}}{1 - R^{1/2}} = \frac{\pi}{\alpha_r d} \quad R \text{ (reflexión del espejo) grande}$$



Para una ida y vuelta, la luz se atenúa debido a la reflexión en los dos espejos y otras pérdidas del resonador (α_s):

$$e^{-\alpha_r 2d} = R_1 R_2 e^{-\alpha_s 2d} \quad \text{con} \quad \alpha_r = \alpha_s + \frac{1}{2d} \ln \frac{1}{R_1} + \frac{1}{2d} \ln \frac{1}{R_2}$$

α_r son las pérdidas de energía por unidad de longitud.

$\alpha_r c/n$ es la pérdida de fotones por unidad de tiempo.

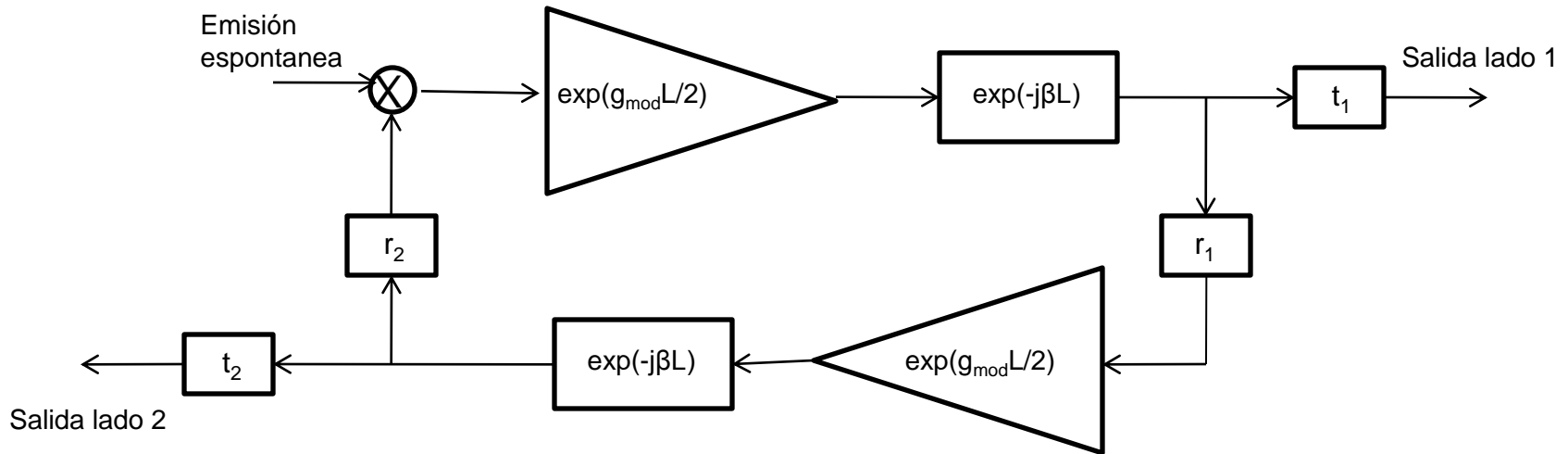
Así, el tiempo de vida media de un fotón en la cavidad se define como (τ_p):

Por lo que:

$$\tau_p = \frac{n}{\alpha_r c}$$

$$\delta\nu = \frac{1}{2\pi\tau_p}$$

Laser Fabry-Perot en diagrama a bloques



g_{mod} es la ganancia modal que la onda experimenta al viajar en una unidad de longitud de una guía de onda amplificadora que constituye la cavidad.

L es la longitud de la cavidad.

$\exp(-j\beta L)$ es el cambio de fase que recibe la onda en la cavidad.

β es la constante de propagación del campo modal de la guía de onda.

r_1 y r_2 son los coeficientes de reflexión.

t_1 y t_2 es la onda transmitida (luz a la salida del laser).

Para una onda óptica o modo $A \exp(j\omega t)$.

Después de la reflexión en toda la cavidad (ida y vuelta) la amplitud de la onda es:

$$r_1 r_2 A \exp(g_{\text{mod}} L) \exp(-2j\beta L) \exp(j\omega t)$$

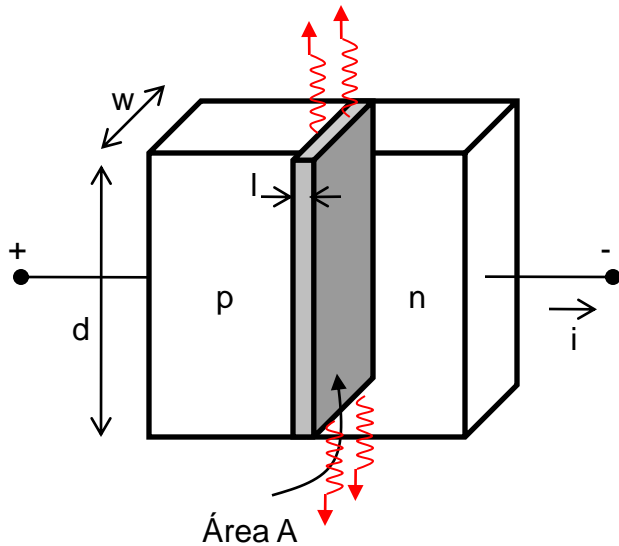
El sistema retroalimentado cumple la condición de oscilación si:

$$r_1 r_2 \exp(g_{\text{mod}} L) \exp(-2j\beta L) = 1, \text{ esto se cumple si :}$$

Condición de fase de resonancia $\omega = m\pi c/Ln_e$; m es un entero

$$\text{Condición de amplitud } g_{\text{mod}} = (1/L) \ln(1/r_1 r_2)$$

LASERES DE SEMICONDUCTOR



Para que un láser de semiconductor sea fabricado con una homounión se necesitan inyecciones de portadores demasiado elevadas.

Generalmente se usa una doble heteroestructura debido a que se consigue una inversión de población con muy poca inyección de portadores.

El semiconductor p de la zona activa se dopa fuertemente (el nivel de Fermi puede estar dentro de la banda de valencia) para que haya muchos estados accesibles en cuanto se inyecten electrones.

El resonador está formado por las propias caras del semiconductor que convenientemente pulidas presentan coeficientes de reflexión del orden del 30%.

El láser de semiconductor más general estará formado por una estructura Fabry-Perot a lo largo y una doble heteroestructura en la dirección de las capas.

PRINCIPIOS DE OPERACIÓN. GANANCIA

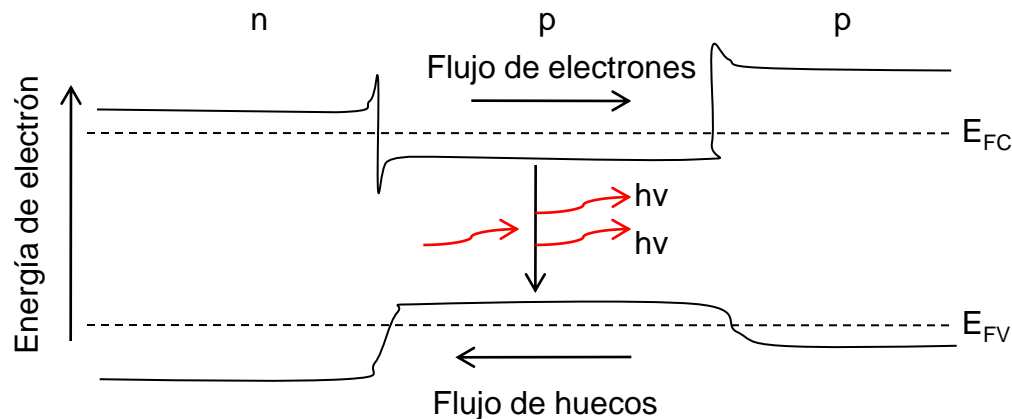
El factor de ganancia esta dado por:

$$\gamma_0(\nu) = \frac{\lambda^2}{8\pi\tau_R} \rho(\nu)(f_e(\nu) - f_a(\nu))$$

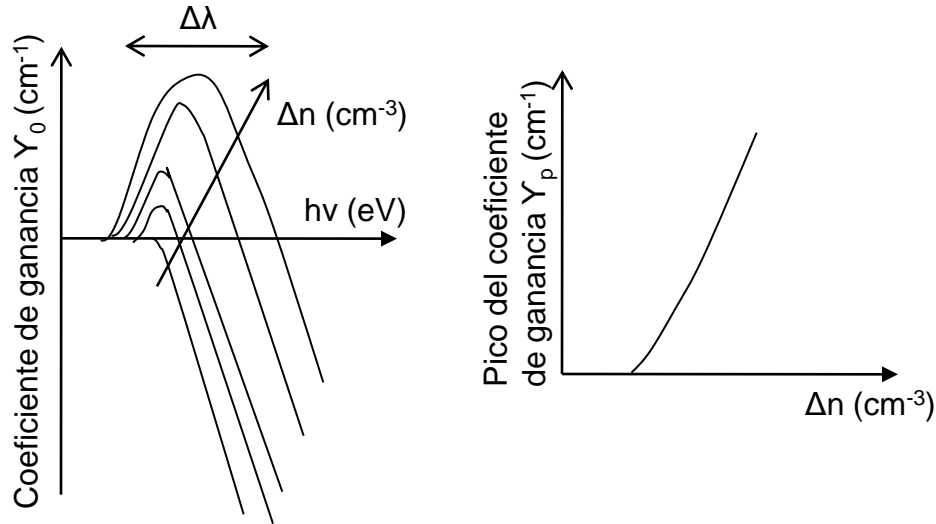
El que haya inversión de población significa que el factor γ_0 es positivo (es decir, que es mas probable que exista un electrón en banda de conducción y un hueco en banda de valencia entre los que existe una diferencia $E = h\nu$).

Depende de la temperatura a través de las funciones f_e y f_a .

Para calcular f_e y f_a se necesitan los niveles de Fermi de cada una de las bandas para la región activa. Para condiciones de inyección fuerte los niveles de Fermi E_{FC} y E_{FV} son como se muestra en la figura. Para producir ganancia: $E_{FC} - E_{FV} > h\nu > E_g$



PRINCIPIOS DE OPERACION. GANANCIA



Para un láser de InGaAsP, según se inyecten mas portadores conseguimos mayores tasas de ganancia a anchuras espectrales mas grandes.

El pico de máxima ganancia aumenta de forma casi lineal con la concentración de portadores inyectados Δn

La forma del factor de ganancia es compleja y es muy dependiente del valor de Δn inyectado.

Con base a un análisis empírico, la relación del pico de ganancia con Δn es lineal:

$$\gamma_p \approx \alpha \left(\frac{\Delta n}{\Delta n_T} - 1 \right)$$

α es la absorción del medio

Δn_T es la concentración de portadores necesaria

Para compensar la absorción

Se deben de compensar las perdidas de la cavidad. Inyectando Δn_T portadores.

PRINCIPIOS DE OPERACIÓN. BOMBEO

El bombeo óptico no es muy efectivo en semiconductores porque se necesitan elevadas potencias ópticas para conseguir inversión de población.

Es mucho mas efectivo introducir portadores a través de una corriente eléctrica. La tasa de portadores inyectados por unidad de tiempo y de volumen (R) es:

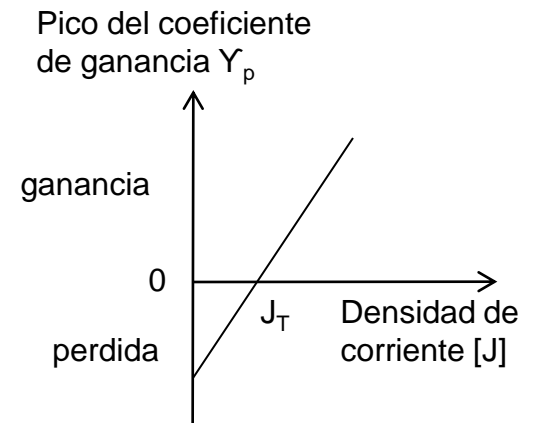
$$R = \frac{I_{elec}}{e} \frac{1}{w d l}$$

Como $\Delta n = R \tau$ $\Delta n = \frac{\tau}{el} J$ Por lo tanto $\gamma_p \approx \alpha \left(\frac{J}{J_T} - 1 \right)$ $J_T = \frac{el}{\tau} \Delta n_T = \frac{el}{\eta_i \tau_r} \Delta n_T$

En láseres de semiconductor es conveniente que la corriente de umbral sea lo mas pequeña posible.

Debido a que la anchura de la zona activa esta en el numerador de la corriente umbral, si se hace l mas pequeña se puede conseguir también una J_T menor.

Esta es una de las razones del empleo de dobles heteroestructuras, donde los valores de l pueden hacerse muy pequeños ($\sim 0.1 \mu m$), mientras los portadores quedan confinados dentro de la zona activa.



PRINCIPIOS DE OPERACIÓN RESONADOR

El resonador queda fijado en un diodo laser a través de las propias caras del dispositivo con coeficientes de reflexión relativamente grandes.

Las perdidas del resonador son:

$$\alpha_r = \alpha_s + \frac{1}{2d} \ln \frac{1}{R_1} + \frac{1}{2d} \ln \frac{1}{R_2} = \alpha_s + \frac{1}{d} \ln \frac{1}{R} \quad R = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2$$

Donde α_s son las perdidas adicionales del resonador (scattering, absorción de fotones por electrones en banda de conducción, etc.).

Existe también una corrección al valor de α_r debido a que no toda la potencia óptica viaja en la región activa, y se estima que la luz que no viaja por la zona activa no contribuye a la acción laser: se considera una perdida adicional. Por lo tanto:

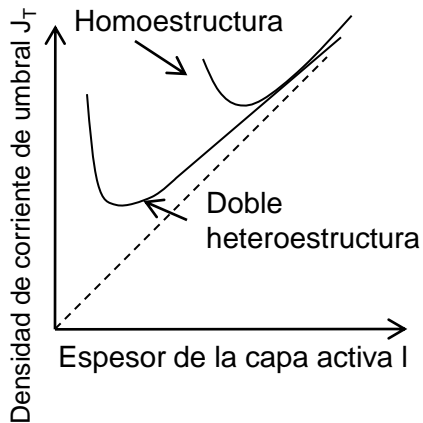
$$\alpha_r = \frac{1}{\Gamma} \left(\alpha_s + \frac{1}{d} \ln \frac{1}{R} \right) \quad \Gamma \text{ (factor de confinamiento) es la fraccion de potencia dentro de la zona activa}$$

El guiado en la dirección transversal a las capas se realiza por la diferencia de índices de refracción entre capas y porque todos los fotones que no se propagan en la dirección de la cavidad se pierden y no dan lugar a ganancia.

PRINCIPIOS DE OPERACIÓN. RESONADOR

El valor de J_T da la corriente necesaria para conseguir que el medio sea transparente, pero no para que se produzca efecto laser ya que existen perdidas en la cavidad que no permiten que la retroalimentación sea positiva. γ_p debe compensar el valor de α , y el de α_r . Considerando que, en ese caso, $\gamma_p = \alpha_r$:

$$J_{th} = \frac{\alpha_r + \alpha}{\alpha} J_T$$

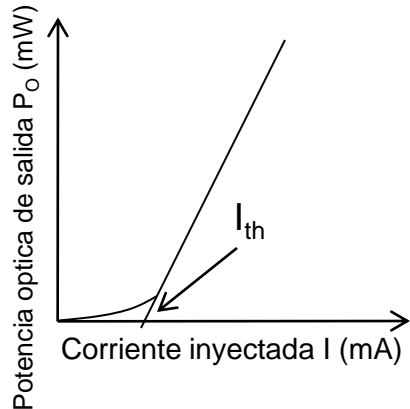


Una reducción del valor del espesor de la capa activa (l) mejora la condición de corriente umbral, y la doble heteroestructura reduce aun mas ese valor. Si se reduce demasiado el valor de l aumentan las perdidas del resonador a través del factor Γ .

Un valor típico para j_{th} para homoestructura ($l = 2 \mu m$): $3.8 \cdot 10^4 A/cm^2$ (área de inyección: $10 \times 200 \mu m^2$ implica una corriente umbral **$I_{th} = 760 mA$**). El valor para una doble heteroestructura ($l = 0.1 \mu m$): $1915 A/cm^2$, que corresponde a un valor de **$I_{th} = 38 mA$** .

Datos: InGaAsP; $\Delta n_T = 1.25 \cdot 10^{18} cm^{-3}$; $\alpha = 600 cm^{-1}$; $\tau_r = 2.5 ns$; $n = 3.5$; $\eta_i = 0.5$; $\alpha_s = 59 cm^{-1}$; $T = 300 ^\circ K$.

PARAMETROS DE FUNCIONAMIENTO: POTENCIA EMITIDA



Al inyectar corriente a un laser de semiconductor se pueden observar dos zonas:

$I \ll I_{th}$: no existe ganancia. La emisión estimulada es despreciable, y el dispositivo emite luz básicamente por emisión espontánea: funciona como un LED.

$I \gg I_{th}$: existe ganancia en la cavidad y, por tanto se produce una emisión de fotones considerable.

El numero de fotones generados por unidad de tiempo dentro de la cavidad es proporcional a la tasa de recombinación y esta a su vez proporcional a la inyección de portadores, es decir, a la intensidad eléctrica.

$$\eta_e = \frac{\left(\frac{1}{d} \ln \frac{1}{R}\right)}{\alpha_r}$$

$$\Phi = \eta_i \frac{I - I_{th}}{e}$$

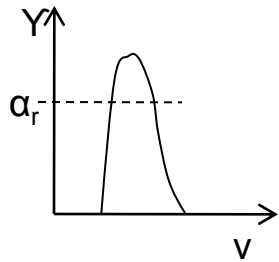
Por lo tanto, la potencia emitida:

$$P = \eta_i \eta_e \frac{I - I_{th}}{e} h \nu_p = \eta_d \frac{1.24}{\lambda_p} (I - I_{th})$$

η_d (tipica) ~ 0.4 , eficiencia energetica η_{pot} (para $I \gg I_{th}$) $\sim 40 \% - 65 \%$

En la zona de union entre las dos curvas existe una mezcla de emisiones y comportamientos: el dispositivo se comporta como un LED superliminiscente (SLED).

PARAMETROS DE FUNCIONAMIENTO: DISTRIBUCION ESPECTRAL



La distribución espectral de un diodo laser esta determinada por: la curva de ganancia, las condiciones de la cavidad resonante, y de un estrechamiento espectral debido a la emisión estimulada.

Anteriormente se mostro en la curva espectral de ganancia que la región donde se puede producir ganancia es bastante ancha. Sin embargo, solo hay ganancia en una parte de ella, por lo que se estrecha.

Dentro de esas frecuencias posibles, el resonador permite algunas, ya que se comporta como un Fabry-Perot, con espejos en las caras del diodo laser. Dichas frecuencias cumplen con:

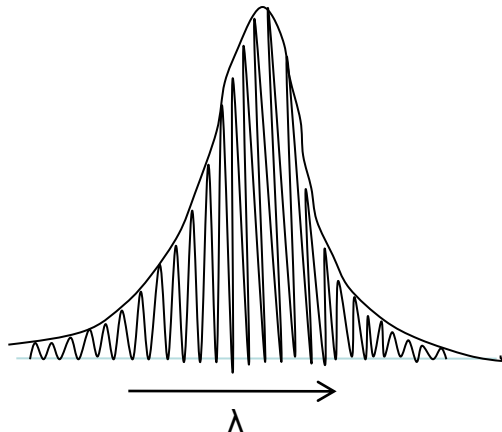
$$\nu_m = \frac{c}{2nd} m$$

Con anchuras espectrales de cada uno de los modos longitudinales:

$$\delta\nu = \frac{1}{2\pi\tau_p}$$

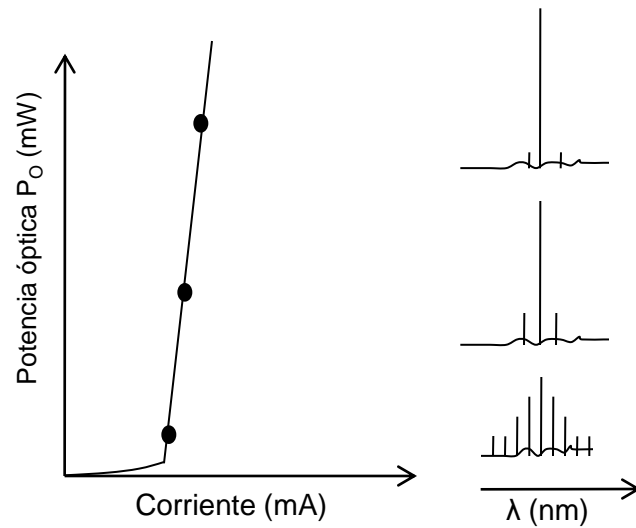
con

$$\tau_p = \frac{n}{\alpha_{cav}c} = \frac{n}{\Gamma\alpha_r c}$$



La distribución espectral se estrecha aun mas debido a que la emisión estimulada genera fotones iguales en frecuencia, dirección y polarización a los generados. Así, las frecuencias con mas ganancia son mucho mas amplificadas, estrechando la distribución espectral a unos 3-5 nm (FWHM).

PARAMETROS DE FUNCIONAMIENTO: DISTRIBUCION ESPECTRAL

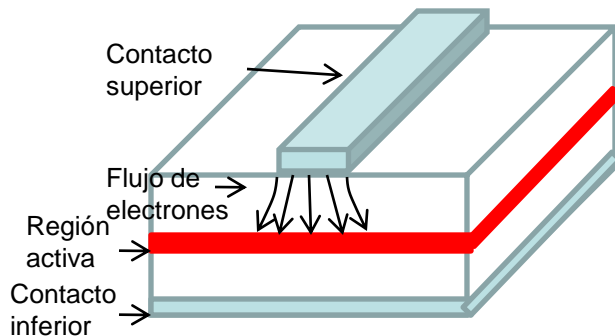


A cada una de las frecuencias solución del resonador se les denomina modo longitudinal, que no se deben confundir con los modos transversales (laterales) de la estructura que representan modos espaciales.

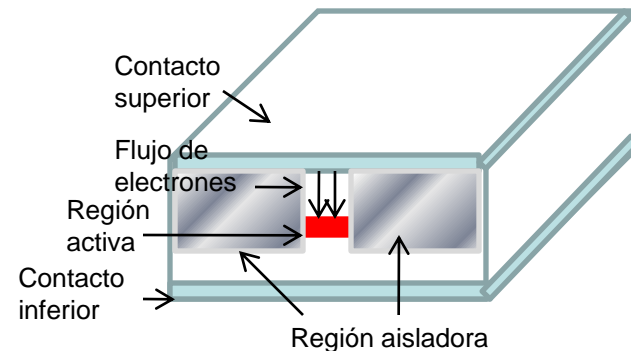
ESTRUCTURAS DE LASERES DE SEMICONDUCTOR

En un diodo laser la luz esta confinada en la dirección transversal a las capas por la heteroestructura y en la dirección longitudinal por las propias caras del dispositivo. En la dirección lateral se hace de dos maneras: láseres guiados por ganancia y láseres guiados por índice.

Los láseres guiados por ganancia tienen peores características que los guiados por índice, en particular la intensidad umbral es bastante mayor (del orden de 50-60 mA), ya que la luz se propaga por un medio fuertemente absorbente fuera de la zona activa.

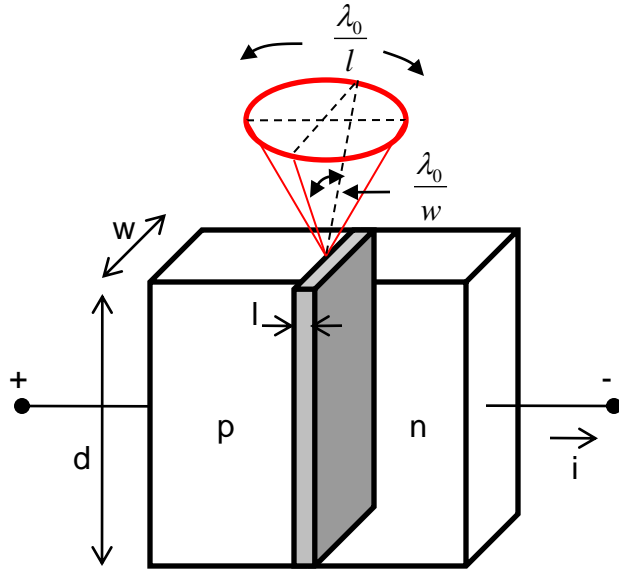


Láser guiado por ganancia.
El guiado se genera por inyección de portadores.



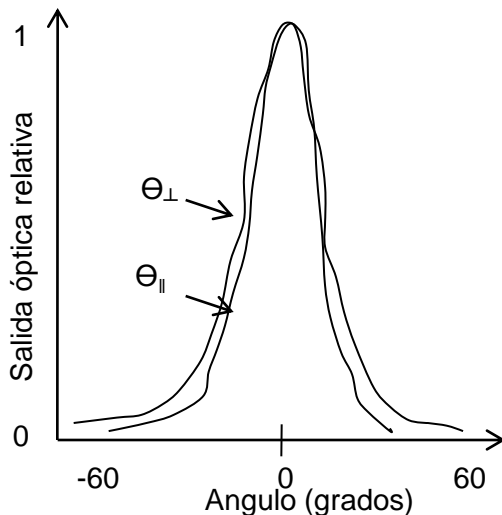
Láser guiado por índice. El guiado se controla con el índice de refracción.

PARAMETROS DE FUNCIONAMIENTO: DISTRIBUCION ESPACIAL



Los modos que aparecen se denominan modos transversales. Para acoplar el máximo de luz a la fibra óptica, es necesario que el laser sea monomodo transversal (se debe ajustar la anchura).

La distribución espacial del haz a la salida del laser se abre de acuerdo a la difracción en la cara de emisión, con ángulos como se ilustra en la figura (radianes).



Los láseres guiados por ganancia tienen caras típicas de salida de $1 \times 5 \mu\text{m}$, y a la salida tienen un haz elíptico de $\sim 9^\circ \times 30^\circ$. Si se aumenta demasiado la potencia puede haber problemas por inestabilidad de modos: no se suelen usar mucho para comunicaciones ópticas.

Los láseres guiados por índice pueden confinar lateralmente hasta valores cercanos al espesor de la capa activa, consiguiéndose haces prácticamente circulares ($\sim 30^\circ \times 30^\circ$, FWHM).

PARAMETROS DE FUNCIONAMIENTO: RESPUESTA DINAMICA

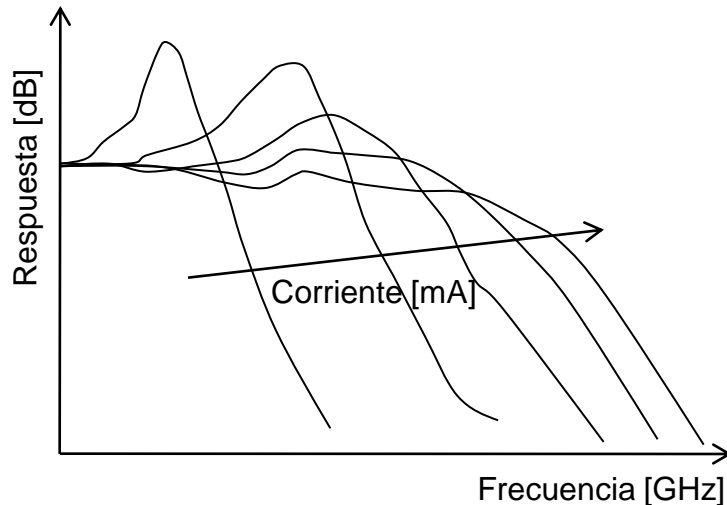
En los LEDs el ancho de banda de modulación esta determinado por el tiempo de vida media de recombinación radiativa de los portadores τ_r .

En láseres la frecuencia de modulación no se limita por τ_r , ya que la emisión estimulada es instantánea, y depende del tiempo de vida medio de los fotones dentro de la cavidad τ_p . ($\tau_r \sim 10$ ns, $\tau_p \sim 6$ ps).

La respuesta de un laser típico frente a la frecuencia de modulación, dada por una intensidad de modulación:

$$I = I_{bias} + I_{elec} \sin(2\pi f t)$$

La curva presenta una resonancia en una frecuencia f_0 (equivalente a un circuito RLC):



$$\left| \frac{P(f)}{P(0)} \right| = \frac{f_0^2}{\left((f^2 - f_0^2)^2 + f^2 \beta^2 \right)^{1/2}}$$

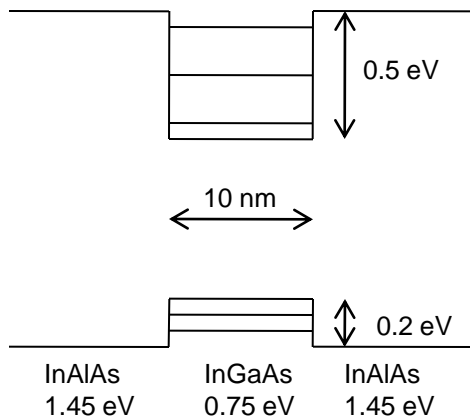
$$f_0^2 = \frac{I_{bias} - I_{th}}{4\pi^2 \tau_r \tau_p I_{th}}$$

Frecuencia de resonancia

$$\beta = \frac{I_{bias}}{2\pi \tau_p I_{th}}$$

Factor de amortiguamiento

LASERES ESPECIALES: MQW (MULTI QUANTUM WELL)



Con el uso de dobles heteroestructuras y la tecnología de deposición de capas actual es posible realizar capas activas muy pequeñas ($\sim 0.01 \mu\text{m}$).

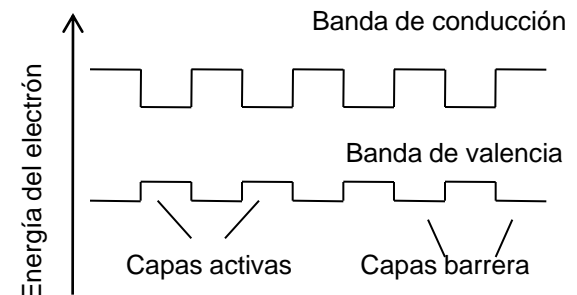
Con espesores por debajo de 50 nm empiezan a aparecer fenómenos cuánticos en los niveles energéticos de los electrones obteniéndose niveles discretos de energía dentro de la zona activa (SQW-Single Quantum Well).

Esto da lugar a transiciones entre niveles “discretos” lo que reduce el ancho espectral de emisión de las fuentes.

Además, se producen complejos fenómenos que reducen la variación de longitud de onda de emisión con la corriente inyectada y, sobre todo, disminuyen el “chirp” o variación de la distribución espectral emitida con la modulación de la fuente.

Los láseres SQW presentan una mayor intensidad umbral y menor potencia de emisión.

El problema de la potencia emitida se soluciona usando múltiples pozos cuánticos (MQW) y la intensidad umbral se reduce a base de proporcionar unas ciertas tensiones entre capas: pozos cuánticos tensionados (SQW, SMQW).



DIODOS LASER ESPECIALES: DFB (DISTRIBUTED FEEDBACK)

El principal problema en un sistema de comunicaciones ópticas que no este limitado en atenuación es la dispersión cromática.

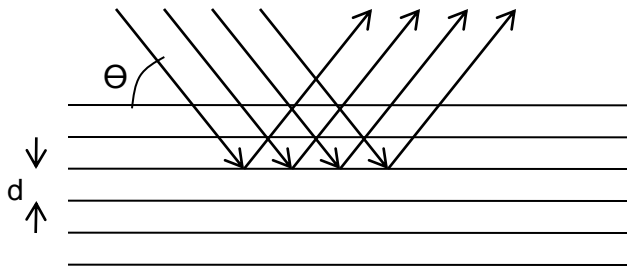
Una forma de reducir el valor de dispersión en un pulso es disminuyendo la anchura espectral.

Los láseres de fabry-Perot presentan anchuras espectrales de 3-5 nm, que son estrechas en comparación con los LEDs.

Se puede disminuir la anchura espectral reduciendo la cavidad hasta que quede un solo modo longitudinal. Esto es complicado.

También, se pueden aplicar perdidas selectivas en longitud de onda de forma que solo algunas longitudes de onda se puedan amplificar. Así actúa un laser DFB.

Su funcionamiento se basa en la reflexión de Bragg.



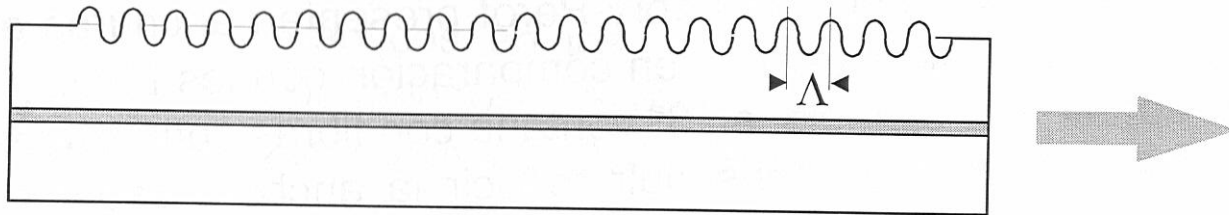
Si incide un haz de luz en un numero elevado de planos reflejantes separados una distancia d , se puede probar que el ángulo en el cual la reflexión es máxima viene dado por:

$$\text{sen } \theta = m \frac{\lambda}{2d}$$

Para $m = 1$. a ese ángulo se le denomina ángulo de Bragg. A otros m hay reflexión, pero menor.

DIODOS LASER ESPECIALES: DFB (DISTRIBUTED FEEDBACK)

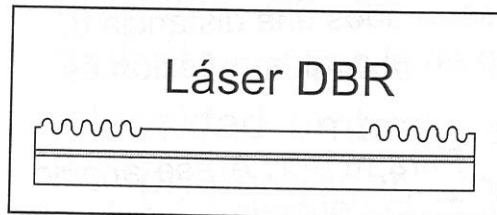
Un laser DFB es un laser en el que se ha practicado una corrugación cerca de la capa activa de forma que, a todos los efectos, la luz propagada dentro de la cavidad “ve” una variación de índice de refracción periódica.



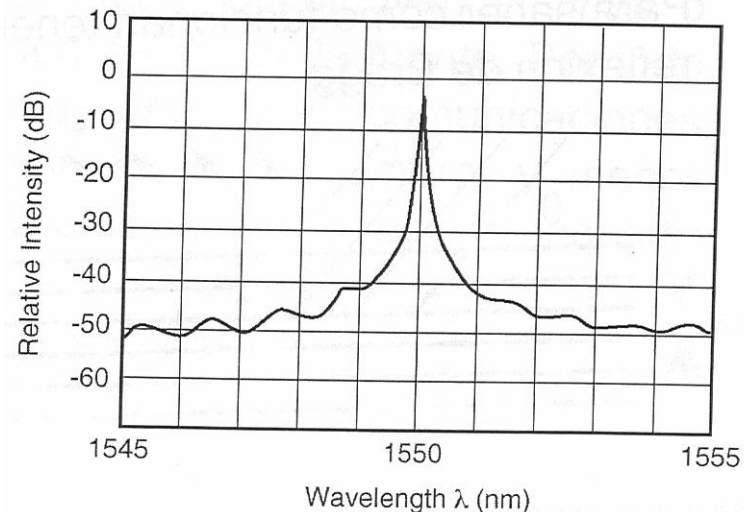
La relación de Bragg para ángulo normal implica dentro del laser que existe un máximo de ganancia para aquellas longitudes de onda que cumplan:

$$\Lambda = m \frac{\lambda_B}{2n}$$

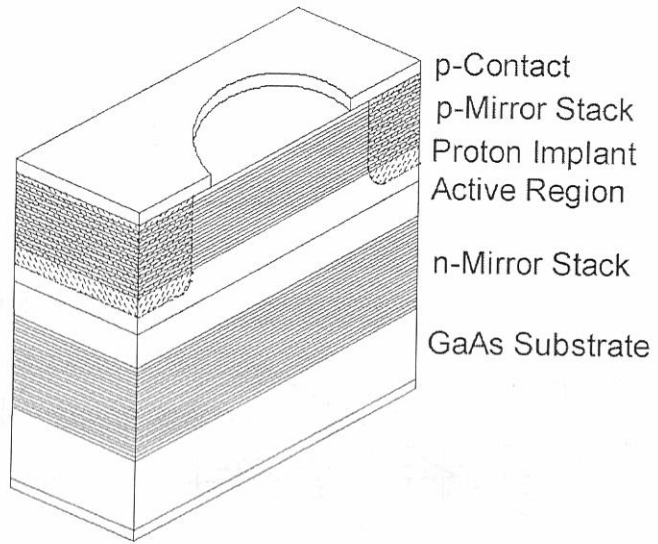
El valor de m suele ser mayor que 1 ya que el valor de Λ debe ser físicamente realizable. Las anchuras espectrales obtenidas para láseres emitiendo en continuo están sobre los 10-50 MHz.



Distributed Bragg Reflector



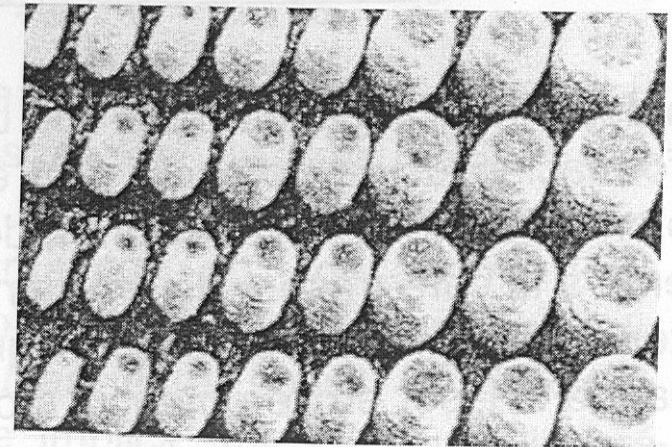
LASER ESPECIAL: VCSEL (VERTICAL CAVITY SURFACE EMITTING LASERS)



Los láseres VCSEL son fuentes de luz muy usuales para aplicaciones de bajo coste con fibras multimodo debido a dos razones:

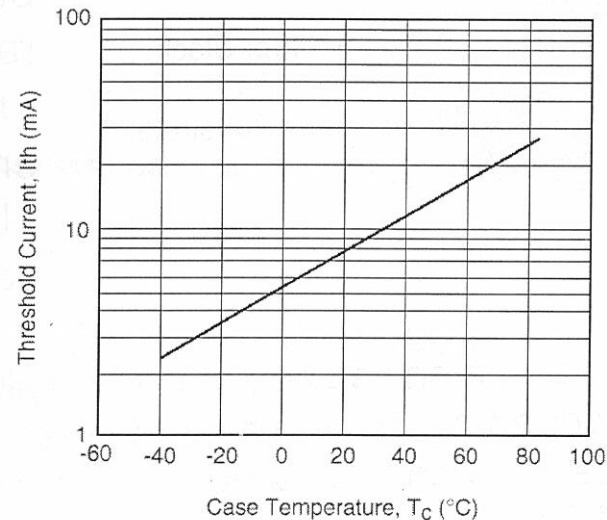
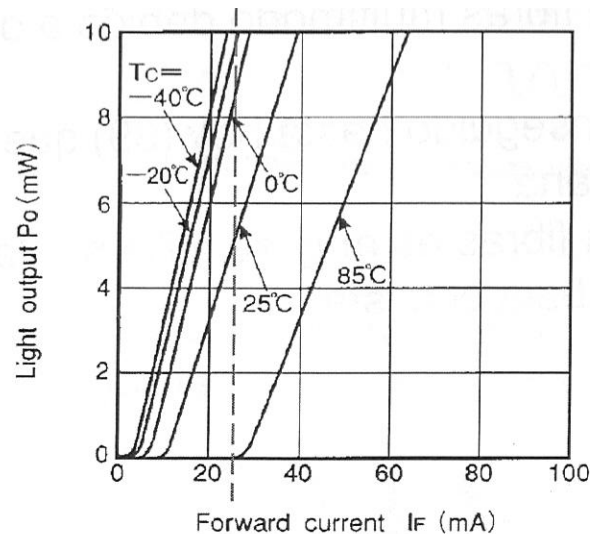
No se ha conseguido que emitan en 2a y 3a ventana. La inyección a fibras es muy sencilla por la manera de emitir: se rebaja el coste.

- * Emiten por arriba en vez de por los laterales.
- El resonador se basa en dos estructuras altamente reflejantes DBR en los dos extremos de la zona activa.
- el modo de salida es circular y su tamaño puede hacerse cercano al núcleo de la fibra.
- La cavidad es muy pequeña, lo que implica que los modos longitudinales están muy separados (menor anchura espectral), la intensidad umbral es muy pequeña pero emiten menos potencia.
- Pueden fabricarse matrices de láseres con aplicaciones muy diversas.



PROBLEMÁTICA DE FUNCIONAMIENTO: VARIACION DE I_{TH} CON LA TEMPERATURA

Uno de los problemas mas graves a la hora de trabajar con un diodo laser es la fuerte dependencia de la intensidad umbral con la temperatura.



Un laser funcionando en continuo (sin modular) necesita información de la potencia emitida para poder corregir la variaciones de potencia debidas a variaciones de temperatura, colocando un fotodiodo en la cara trasera de emisión del laser, para retroalimentar la intensidad aplicada y conseguir emisión de potencia constante.

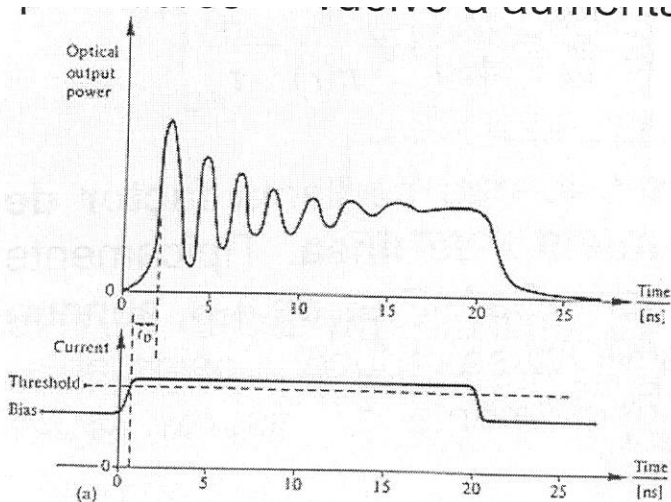
Cuando el laser emite potencia modulada en intensidad no se puede compensar el cambio de temperatura solo con el fotodiodo. Por lo tanto, el laser se compensa en temperatura utilizando sistemas enfriadores o “coolers”, basados en el efecto Peltier.

PROBLEMÁTICA DE FUNCIONAMIENTO: RESPUESTA DINAMICA

Las señales digitales son representadas por pulsos de intensidad eléctrica, muy estrechos y con flancos muy abruptos.

La respuesta del laser no es instantánea, sobretodo si al laser no se le aplica una corriente de polarización previa.

El modo de funcionamiento ante un pico seria de la siguiente forma: aparece una gran corriente de portadores \rightarrow tras un intervalo de tiempo aumenta la emisión estimulada de forma abrupta \rightarrow se produce una recombinación de portadores que despuebla la zona activa \rightarrow se emite menos potencia \rightarrow vuelven a llegar mas portadores \rightarrow vuelve a aumentar la potencia emitida \rightarrow ...

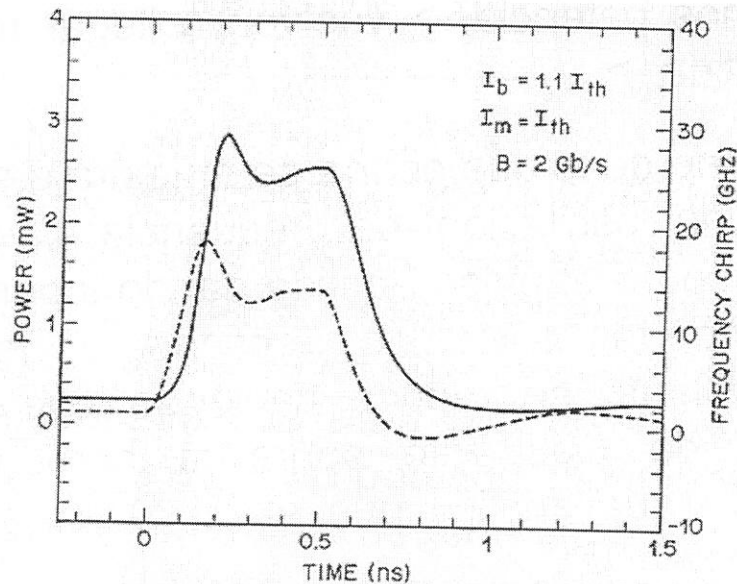


Una oscilación de frecuencia f_0 se produce sobre el pulso emitido dando lugar a un comportamiento no deseado. Este funcionamiento se reduce haciendo que la corriente de polarización este sobre la corriente umbral (lo que implica que el bit '0' lleve algo de potencia).

PROBLEMÁTICA DE FUNCIONAMIENTO: CHIRP

Un problema es el del aumento de la anchura espectral de un laser debido al efecto chirp. Físicamente el chirp se produce porque cuando se modula fuertemente un laser se producen variaciones importantes de las densidades de portadores que entran en zona activa.

El índice de refracción de un semiconductor depende de la concentración de portadores, lo que implica que el índice de refracción por el que se propaga la luz sufre variaciones con el tiempo y eso hace que existe una variación de la fase del modo propagado a través de la constante de propagación. Dicha fase que varia con el tiempo provoca un ensanchamiento espectral o chirp. El ensanchamiento espectral:



$$\delta\nu(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{dt} = \frac{\beta_c}{4\pi} \left[\Gamma \gamma \frac{c}{n(t)} - \frac{1}{\tau_p} \right]$$

β_c es el factor de ensanchamiento de linea. Para un laser InGaAsP es de 4-8, aunque en lasers MQW se reduce considerablemente, especialmente en lasers MQW tensionados.

PROBLEMÁTICA DE FUNCIONAMIENTO: RUIDO DE INTENSIDAD

La salida de un laser presenta fluctuaciones en potencia, fase y frecuencia.

El ruido en láseres de semiconductor viene dominado por la emisión espontanea en la frecuencia y dirección de emisión del diodo laser.

La emisión espontanea es bastante probable y la luz que se emite lo hace con polarizaciones, frecuencias y fases aleatorias y en tiempos también aleatorios.

El ruido de intensidad (RIN) en sistemas digitales no se suele tener demasiado en cuenta pero es muy importante en sistemas analógicos de CATV.

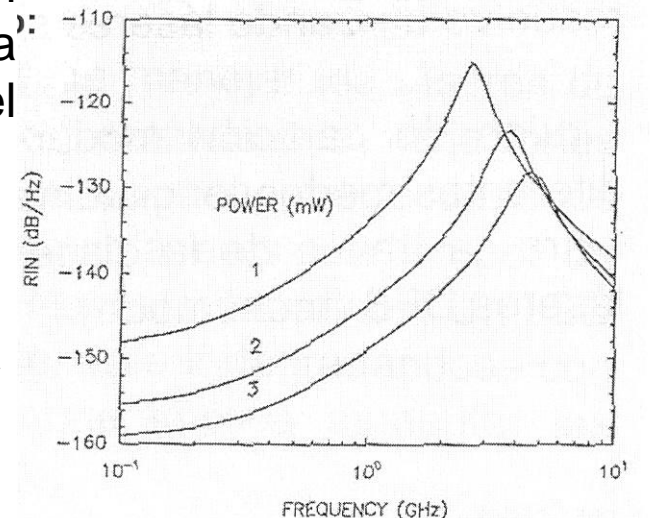
Siendo la función de autocorrelación en intensidad:

$$C_{PP}(\tau) = \frac{\langle (\delta P(t))^2 \rangle}{P^2}$$

P es el valor medio de potencia emitido. La aparición de fluctuación en potencia dará lugar a una variación de intensidad eléctrica en el detector. El RIN se define como:

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

El RIN tiene un máximo en la frecuencia de oscilación y mejora según se aumenta la potencia media de emisión. Valores típicos: 130-160 dB/Hz

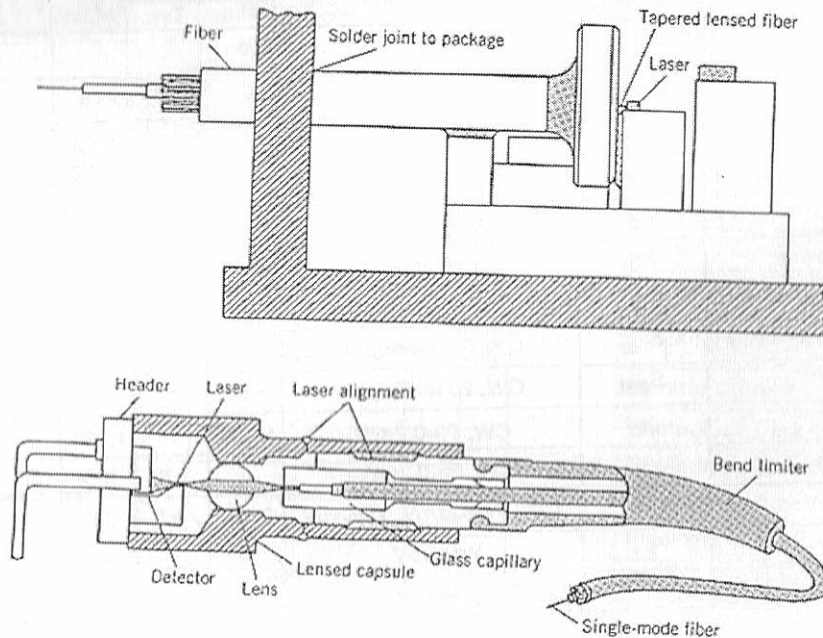


PROBLEMÁTICA DE FUNCIONAMIENTO: RUIDO

Otras formas de ruido que pueden degradar la transmisión:

- Ruido por reflexiones: en cuanto se producen reflexiones en la línea parte de la potencia puede volver a la cavidad y generar ruido extra, además de empeorar el RIN e incluso aumentar la anchura espectral de emisión. En casos extremos puede dar lugar a interferencias que degraden totalmente el enlace. Se resuelve utilizando aisladores ópticos.
- No linealidades en la curva P-I: no es exactamente un ruido, pero la operación de sistemas analógicos puede verse muy afectada por estas no linealidades. Se resuelve utilizando láseres super-lineales.
- Ruido de partición modal: se produce al intercambiarse potencia óptica entre diferentes modos longitudinales de la cavidad de forma aleatoria, lo que dará ruido extra a través de la dispersión cromática. Se resuelve en gran medida usando láseres DFB (monomodo).

PROBLEMÁTICA DE FUNCIONAMIENTO: ACOPLO A FIBRAS Y FIABILIDAD

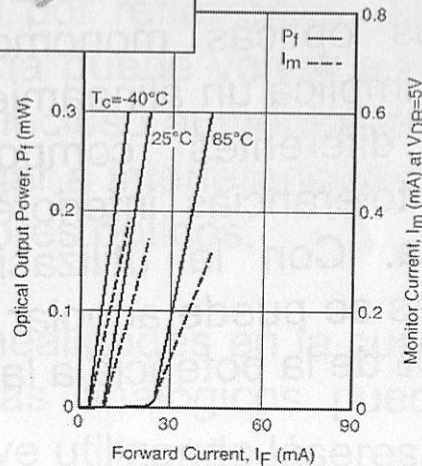
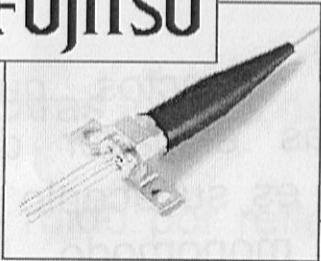


Uno de los aspectos que encarecen mas el laser de semiconductor es su acoplo a fibras ópticas monomodo, lo que implica un alineamiento de los diferentes componentes con tolerancias inferiores a la micra. Con la utilización de lentes se puede acoplar casi el 100% de la potencia a la fibra.

Por otra parte hay que tener gran cuidado a la hora de manejar los láseres de semiconductor pues son muy sensibles a electricidad estática o a variaciones bruscas de intensidad eléctrica.

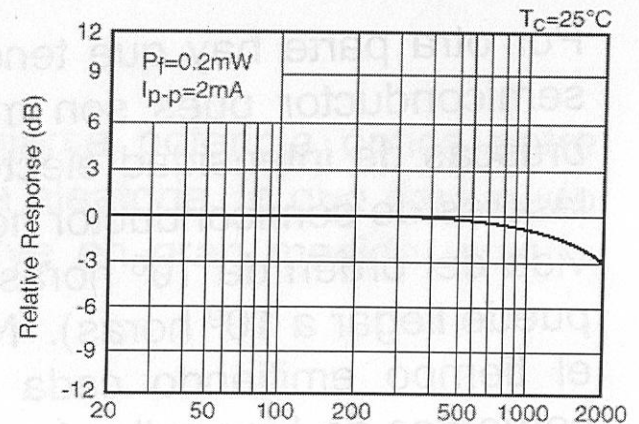
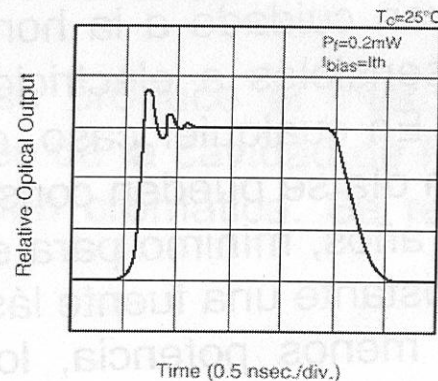
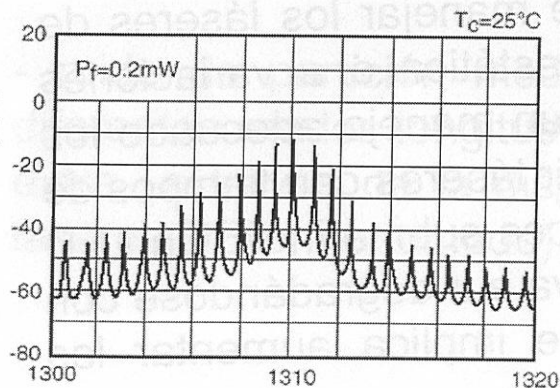
Con un manejo adecuado los láseres de semiconductor pueden funcionar por 10^6 horas (25 años, mínimo para enlaces submarinos. Un LED puede llegar a 10^9 horas). Un laser se degrada con el tiempo emitiendo cada vez menos potencia, lo que implica aumentar las corrientes de polarización aplicadas con el tiempo.

LASERES COMERCIALES: FABRY-PEROT

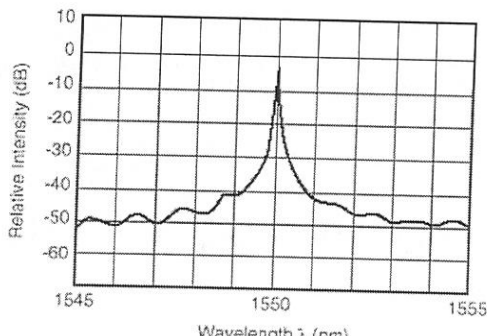
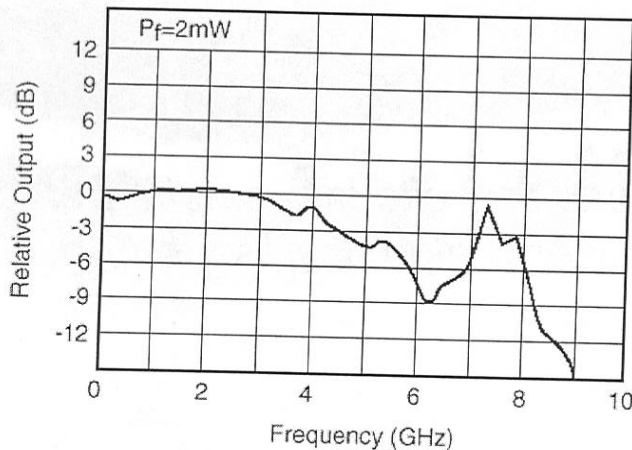
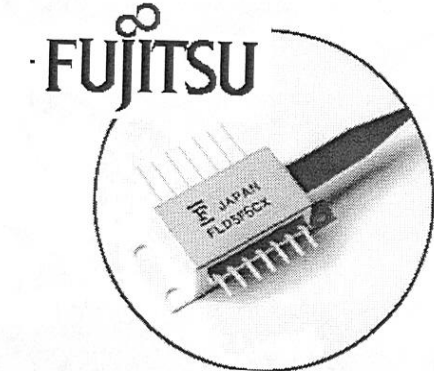


OPTICAL AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_c=25^\circ C$)

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	$\mu W/mA$
Linearity of dL/dI	S_{var}	CW, 20 to 260 μW	-	-	+/-15	%
Saturation of dL/dI	S_{sat}	CW, 20 to 260 μW	-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 260 μW , $V_{DR}=5V$	-	-	+/-10	%



LASERES COMERCIALES: DFB



OPTICAL AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_L = T_{\text{set}}$, $T_C = 25^\circ\text{C}$, BOL, unless otherwise specified)

Parameter	Symbol	Conditions	Limits			Unit
			Min.	Typ.	Max.	
Laser Set Temperature	T_{set}	-	15	-	35	$^\circ\text{C}$
Threshold Current	I_{th}	CW	3	-	40	mA
Forward Voltage	V_{FDC}	CW, $I_F = 30\text{ mA}$, pin 12-13	-	1.6	1.75	V
Series Resistance	R_s	CW, pin 12-13	22	25	28	Ω
Reverse Voltage	V_r	CW, at $I_R < 1500\mu\text{A}$	2	-	-	V
Optical Output Power	P_f	CW	2.0	-	-	mW
Slope Efficiency	η	CW, $P_f = 2.0\text{mW}$	0.035	-	-	mW/mA
Threshold Power	P_{th}	$I_F = I_{\text{th}}$, CW	-	-	50	μW
Tracking Error (Note 1)	TE	$P_f = 2.0\text{mW}$, $T_C = -20$ to 65°C	-0.5	-	+0.5	dB
Monitor Current	I_m	CW, $P_f = 2.0\text{mW}$, $V_{\text{DR}} = 5\text{V}$	0.10	-	1.0	mA
Photodiode Dark Current	I_D	$V_{\text{DR}} = 5\text{V}$	-	2	100	nA
Photodiode Capacitance	C_t	$V_{\text{DR}} = 5\text{V}$, $f = 1\text{ MHz}$	-	-	10	pF
Photodiode Cutoff Frequency	f_{cm}	$V_{\text{DR}} = 5\text{V}$, 50Ω load	100	-	-	MHz
Peak Wavelength	λ_p	Note (2)	Note (4)			nm
Wavelength Drift	-	after 20 years	-	-	0.2	nm
Wavelength Stability with Case Temperature	-	-	-	-	± 2	pm/ $^\circ\text{C}$
Side Mode Suppression	S_r	Note (2)	33	35	-	dB
Spectral Width (-20dB)	-	Note (2)	-	-	0.5	nm
Rise Time (10%-90%)	t_r	Note (2)	-	0.1	0.125	nsec
Fall Time (10%-90%)	t_f	Note (2)	-	0.1	0.125	nsec
Cutoff Frequency	f_c	$P_f = 2.0\text{mW}$, -3 dB	4.0	-	-	GHz
In-Band Ripple (Window)	S_{21}	$f = 50\text{ MHz} \sim 3\text{ GHz}$	-	-	± 1.5	dB
RF Return Loss	S_{11}	$f = 50\text{ MHz} \sim 2\text{ GHz}$	8	-	-	dB
		$f = 2\text{ GHz} \sim 3\text{ GHz}$	6	-	-	dB
		$f = 3\text{ GHz} \sim 5\text{ GHz}$	3	-	-	dB
Optical Isolation	I_s	$T_C = -20$ to 65°C	25	35	-	dB
Relative Intensity Noise	RIN	$f = 0.5\text{ GHz}$ $P_f = 2.0\text{mW}$, CRL 24 dB	-	-	-125	dB/Hz

MECANISMOS DE RECOMBINACION NO RADIATIVA:

1. RECOMBINACION EN TRAMPAS O DEFECTOS
2. RECOMBINACION DE SUPERFICIE
3. RECOMBINACION AUGER

La energia liberada durante la recombinacion electron-hueco es entregada a otro electron o hueco como energia cinetica en lugar de producir luz.

Tiempo de vida de portador (τ_c): tiempo total de recombinacion de portadores cargados en la ausencia de la recombinacion estimulada

$$R_r + R_{nr} = \frac{N}{\tau_c} \quad \text{N es la densidad de portador}$$

$$\tau_c^{-1} = A_{nr} + BN + CN^2$$

Donde: A_{nr} es el coeficiente no radiativo debido a defectos o trampas

B es el coeficiente de recombinacion radiativa espontanea

C es el coeficiente de Auger

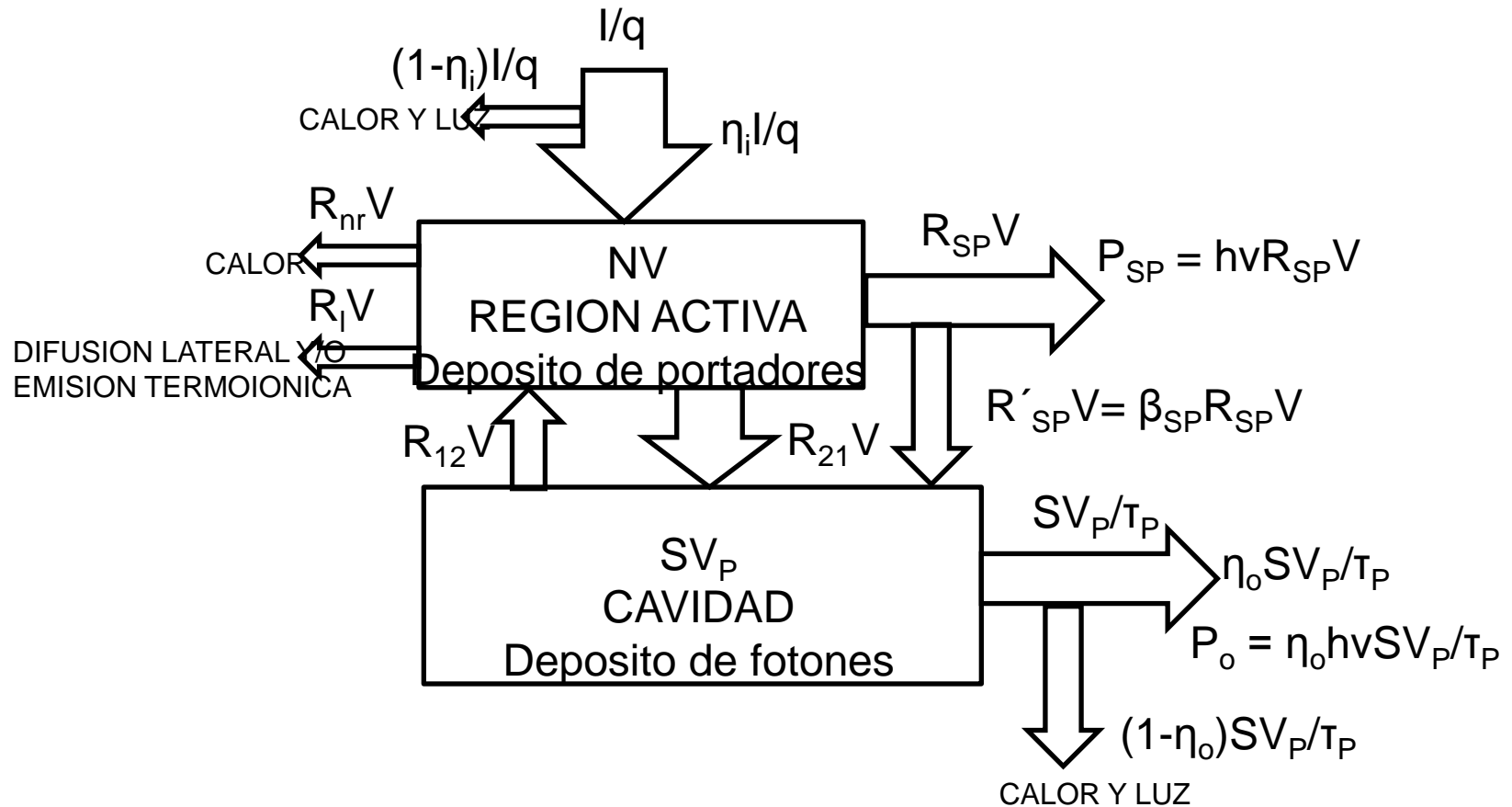
El tiempo de vida tambien se puede considerar por medio de la siguiente expresion:

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

Generalmente para semiconductores $\tau_{nr} \approx 100$ ns

Depende de la concentracion de defectos

MODELO UTILIZADO EN EL ANALISIS DE LAS ECUACIONES DE RITMO DE LOS LASERES DE SEMICONDUCTOR



$$V \frac{dN}{dt} = \frac{\eta_i I}{q} - (R_{sp} + R_{nr} + R_l)V - (R_{21} - R_{12})V$$

$$V_P \frac{dS}{dt} = (R_{21} - R_{12})V - \frac{SV_P}{\tau_P} + R'_{sp}V$$

$$R_{st} = v_g g S = R_{21} - R_{12}$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\eta_i I}{q} - (R_{sp} + R_{nr} + R_l)V - v_g g S$$

$$\frac{dS}{dt} = \left[\Gamma v_g g - \frac{1}{\tau_p} \right] S + \Gamma R'_{sp}$$