



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria de Telecomunicació de
Barcelona
Departament de Teoria del Senyal i
Comunicacions

**UPC**
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE
CATALUNYA

COMUNICACIONS ÒPTIQUES

GRUP DE COMUNICACIONS ÒPTIQUES

Joan M. Gené Bernaus

COMUNICACIONS ÒPTIQUES



TEMARI

1. INTRODUCCIÓ
2. FIBRA ÒPTICA
- ➔ 3. FONTS ÒPTIQUES
4. RECEPTORS ÒPTICS
5. AMPLIFICADORS ÒPTICS
6. SISTEMES DE TX PER F.O.

3. FONTS ÒPTIQUES

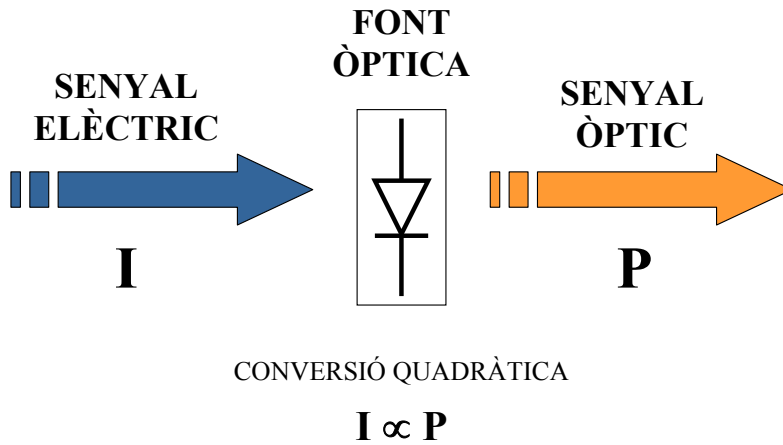
- **INTRODUCCIÓ A LES FONTS ÒPTIQUES**
 - **CARACTERÍSTIQUES, TIPUS I APLICACIONS**
 - **EMISSIÓ I ABSORCIÓ DE LLUM**
 - **PRINCIPIS FÍSICS DELS SEMICONDUCTORS**
 - **EFICIÈNCIA QUÀNTICA**

- **DIODE LED**
 - **PRINCIPI DE FUNCIONAMENT**
 - **CARACTERÍSTICA LLUM-CORRENT**
 - **ESPECTRE DE POTÈNCIA**

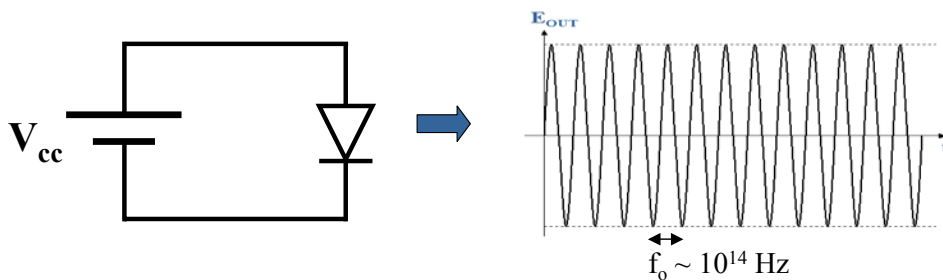
- **COMPORTAMENT DINÀMIC DEL LED**
 - **EQUACIÓ DE RITME DEL LED**
 - **MODULACIÓ DEL LED**
- **PÈRDUES EN EL LED**

- **DIODE LÀSER**
 - **PRINCIPI DE FUNCIONAMENT**
 - **MODEL EQUIVALENT**
 - **CARACTERÍSTICA LLUM-CORRENT**
 - **ESPECTRE DE POTÈNCIA**
 - **COMPORTAMENT DINÀMIC DEL LÀSER**
 - **EQUACIONS DE RITME DEL LÀSER**
 - **MODULACIÓ DEL LÀSER**
 - **ESTRUCTURES AVANÇADES**

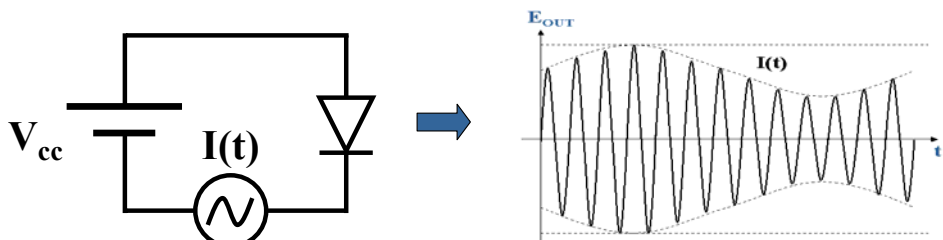
INTRODUCCIÓ A LES FONTS ÒPTIQUES



Polarització Directa



Modulació d'Intensitat (IM)



CARACTERÍSTIQUES DESITJABLES

- ✓ **ELEVADA EFICIÈNCIA DE CONVERSIÓ E/O**
- ✓ **TEMPERATURA DE TREBALL I ESTABILITAT**
- ✓ **FREQÜÈNCIA D'EMISSIÓ ADEQUADA**
- ✓ **ELEVADA VELOCITAT DE MODULACIÓ**
- ✓ **RESPOSTA LLUM – CORRENT LINEAL**
- ✓ **ELEVADA PURESA ESPECTRAL (LÀSER)**
- ✓ **COMPATIBLE AMB LA FIBRA (ACOBLAMENT)**
- ✓ **PETITA I DE BAIX CONSUM (INTEGRACIÓ)**
- ✓ **COST REDUÏT**

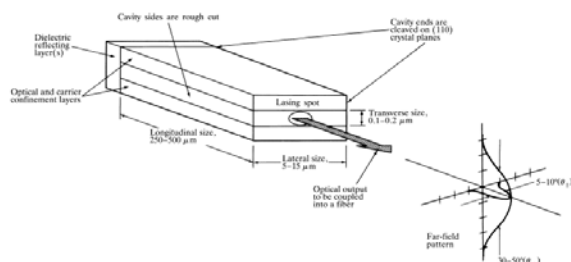
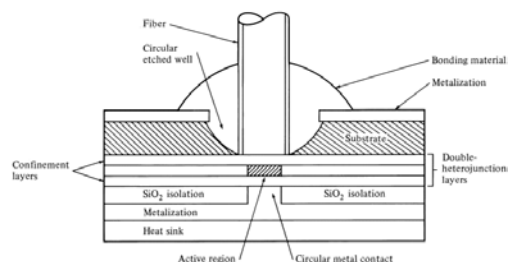
TIPUS I APLICACIONS

DIODE LED

- Visible → visualitzador
- IR proper → telecom

DIODE LÀSER

- Visible
 - indústria
 - medicina
 - telecom espacial
- IR proper → telecom



EMISSIÓ I ABSORCIÓ DE LLUM

“Tot material presenta unes característiques d’absorció de llum. A més, en circumstàncies especials, es poden donar també processos d’emissió lluminosa”.

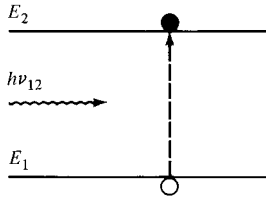
$hf \rightarrow$ energia del fotó

$hf \approx E_2 - E_1 = E_g$ (GAP directe)

h : ct. Planck ($6,63 \cdot 10^{-34}$ J·s)

f : freqüència lluminosa

ABSORCIÓ ESTIMULADA

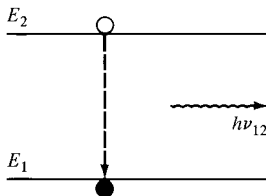


“El fotó incident és absorbit per un electró que incrementa el seu nivell d’energia”



Fotodetectors

EMISSIÓ ESPONTÀNIA



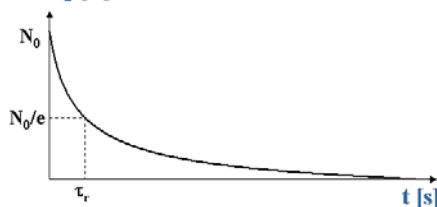
“Un electró excitat desprèn energia donant lloc a un fotó de freqüència, fase i direcció aleatòries”



Llum incoherent (LED)

Temps de vida de recombinació

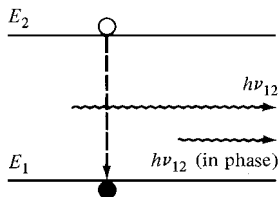
n a E_2 [N]



“Temps que triga el material a tornar a l’estat de repòs”

$$N = N_0 e^{-\frac{t}{\tau_r}}$$

EMISSIÓ ESTIMULADA



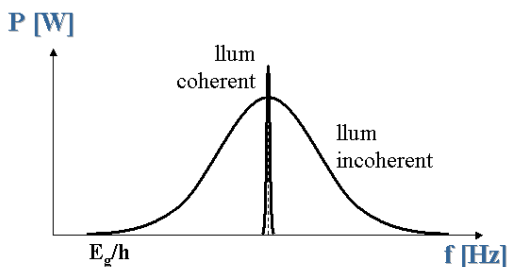
inversió de població

“Un fotó incident força un electró excitat a desprendre energia donant lloc a un nou fotó de direcció, fase i freqüència iguals al fotó excitador”



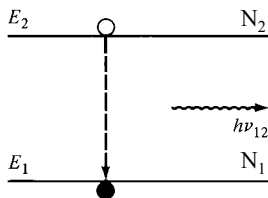
Llum coherent (LÀSER)

espectre lluminós

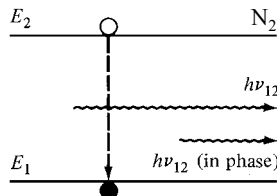


Condició d'Equilibri Tèrmic

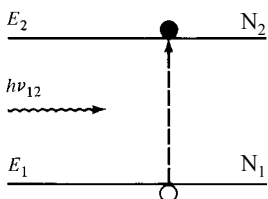
EMISSIÓ ESPONTÀNIA



EMISSIÓ ESTIMULADA



ABSORCIÓ ESTIMULADA



$$hf \gg K_B T$$

“No intercanvi d'energia amb l'exterior”

$$\text{Ritme Absorcions} = \text{Ritme Emissions}$$

E_i : Energia N_i : Densitat de portadors

Relacions d'Einstein

Ritme E. Espontània	$r_{sp} \equiv AN_2$	} Equilibri Tèrmic	$r_a = r_{sp} + r_{st} \quad [m^{-3}s^{-1}]$
Ritme A. Estimulada	$r_a \equiv B_{12}\rho N_1$		
Ritme E. Estimulada	$r_{st} \equiv B_{21}\rho N_2$		

$\frac{N_2}{N_1} = \exp(-E_g / K_B T) = \exp(-hf / K_B T)$ Estadística de Boltzmann

$B_{12}\rho N_1 = AN_2 + B_{21}\rho N_2$

$$\rho = \frac{AN_2}{B_{12}N_1 - B_{21}N_2} = \frac{A/B_{21}}{B_{12}N_1/B_{21}N_2 - 1} = \frac{A/B_{21}}{(B_{12}/B_{21})\exp(hf/K_B T) - 1}$$

A: Coef. Em. Esp.

B_{12} : Coef. Abs. Est.

B_{21} : Coef. Em. Est.

D. E. E. del Cos Negre (Fòrmula de Planck)

$$\rho \equiv \frac{8\pi h(f/v)^3}{\exp(hf/K_B T) - 1} = N \cdot hf_{21} \quad [J \cdot m^{-3}]$$

$$\rho = \frac{A/B_{21}}{(B_{12}/B_{21})\exp(hf/K_B T) - 1} = \frac{8\pi h(f/v)^3}{\exp(hf/K_B T) - 1}$$

$A = B_{21}8\pi h(f/v)^3 = 1/\tau_r$	} →	$\frac{r_{st}}{r_{sp}} = \frac{B_{21}\rho N_2}{A} = [\exp(hf/K_B T) - 1]^{-1} \ll 1$
$B_{12} = B_{21} = B$		

➔ P(Esp) >> P(Est)
No ens interessa

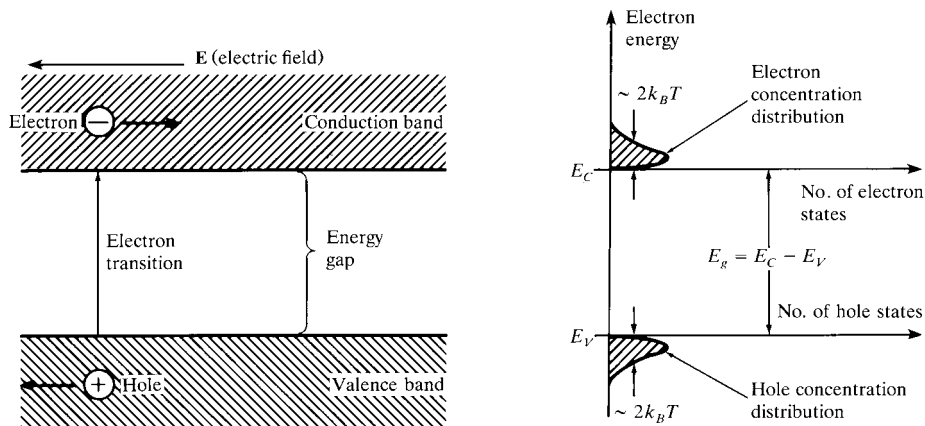
Ritme E. Estimulada Neta

$$r_e \equiv r_{st} - r_a = (N_2 - N_1)\rho \cdot B \quad [m^{-3}s^{-1}]$$

➔ $N_2 > N_1$
Inversió de Població

PRINCIPIS FÍSICS DELS SEMICONDUCTORS

1. Els electrons es troben en nivells energètics discrets i s'agrupen en bandes (BC i BV) separades per una zona prohibida (GAP)

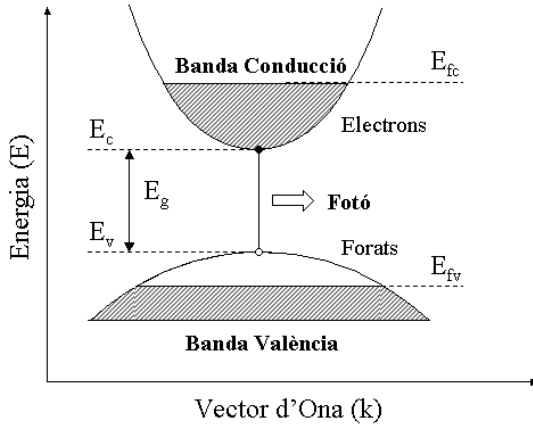


$$\text{GAP } (E_g) \left\{ \begin{array}{l} \ll 0.05 \text{ eV} \rightarrow \text{Conductors} \\ 0.1\text{-}3 \text{ eV} \rightarrow \text{Semiconductors} \\ \gg 5 \text{ eV} \rightarrow \text{Aïllants} \end{array} \right.$$

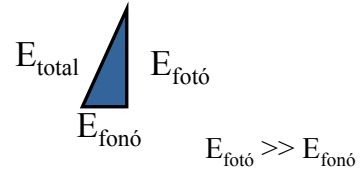
2. En la BC els electrons no estan subjectes a cap àtom en particular i es poden moure lliurement pel semiconductor

3. Quan un electró s'allibera d'un àtom passa a la BC i deixa un forat en la BV i que té llibertat de moure's per ella.

4. Un electró de la BC pot tornar a la BV ocupant un forat lliure alliberant energia que pot ser en forma de **radiació òptica**. Aquest procés és conegut com a **recombinació de parells electró-forat**.



GAP indirecte



“El mínim de la banda de conducció i el màxim de la banda de valència tenen moments diferents”

Distribucions de Fermi-Dirac

$$f_c(E_2) = \left\{ 1 + \exp \left[\frac{E_2 - E_{fc}}{K_B T} \right] \right\}^{-1}$$

$$f_v(E_1) = \left\{ 1 + \exp \left[\frac{E_1 - E_{fv}}{K_B T} \right] \right\}^{-1}$$



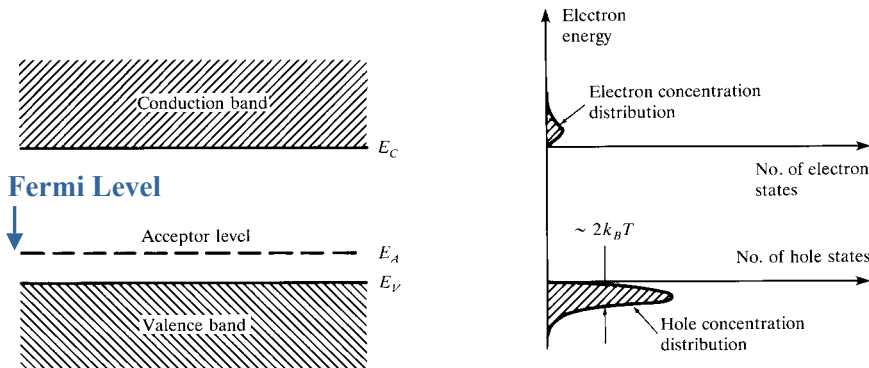
$$E_{fc} - E_{fv} > E_2 - E_1 > E_g$$

Inversió de Població

E_{fc} i E_{fv} : Nivells de Fermi

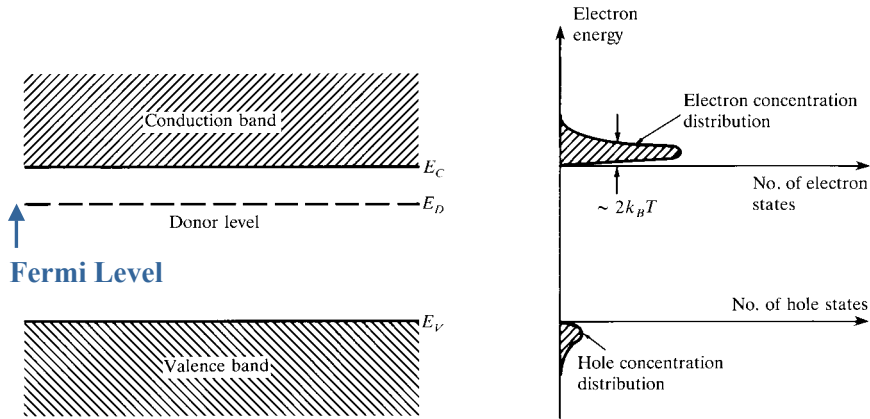
Material Semiconductor Tipus-P

S’afegeixen àtoms dopants “acceptors” que prenen electrons de la Banda de Conducció. Es produeix un flux de portadors positius.



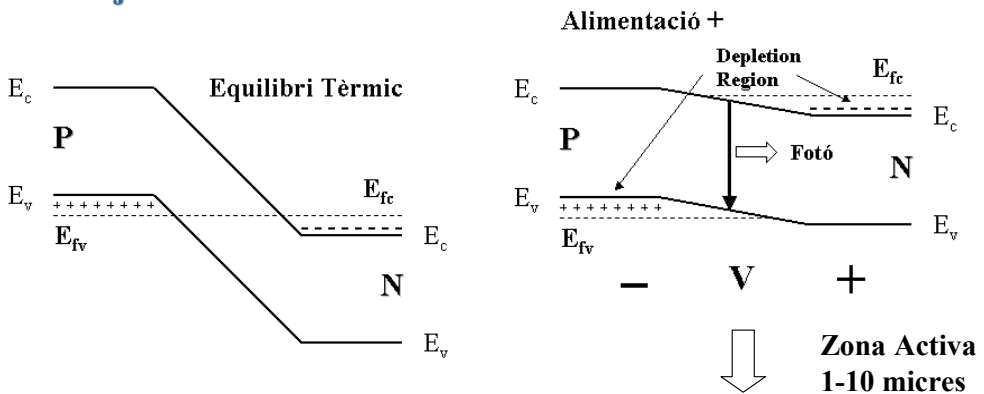
Material Semiconductor Tipus-N

S'afegeixen àtoms dopants “donadors” que lliuren electrons a la Banda de Conducció. Es produeix un flux de portadors negatius.



Unió P-N

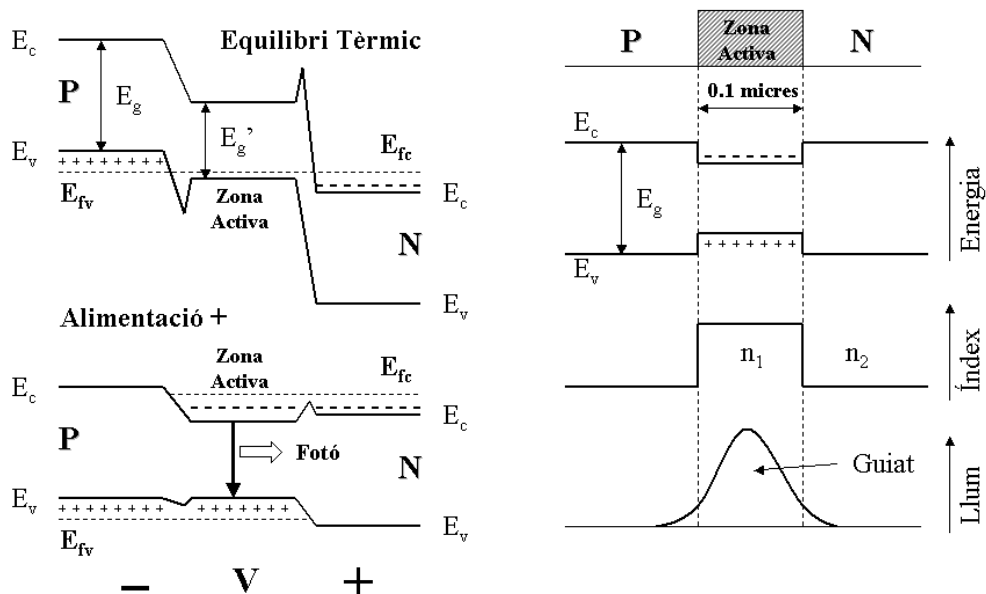
Homojunction



En Equilibri Tèrmic, el Nivell de Fermi ha de ser continu en la unió P-N

$$I = I_s [\exp(qV/K_B T) - 1]$$

Heterojunction



Materials per a la Construcció de Fonts Òptiques

ELEMENTS DELS GRUPS

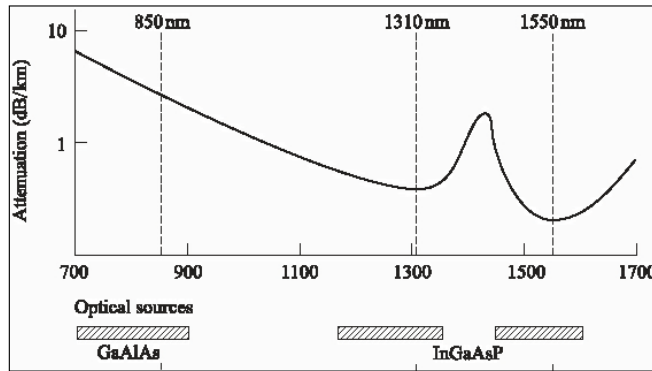
- III \rightarrow Ga, Al, In ...
- V \rightarrow As, P, N ...

COMPOSTOS (IR proper)

- Binari \rightarrow GaAs (1a finestra)
- Ternari \rightarrow $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ (1a finestra)
 \rightarrow $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ (2a finestra)
- Quaternari \rightarrow $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ (1a, 2a i 3a finestra)

COMPOSTOS (visible)

- ❑ Biaris → GaP (verd)
→ GaN (blau)
- ❑ Ternaris → GaAs_{1-x}P_x (Roig, Taronja i Groc)



EFICIÈNCIA QUÀNTICA

$$\eta \equiv \frac{\langle N^\circ \text{ fot/seg} \rangle}{\langle N^\circ e - h/\text{seg} \rangle} = \frac{P_{\text{OUT}}/hf}{I/q}$$



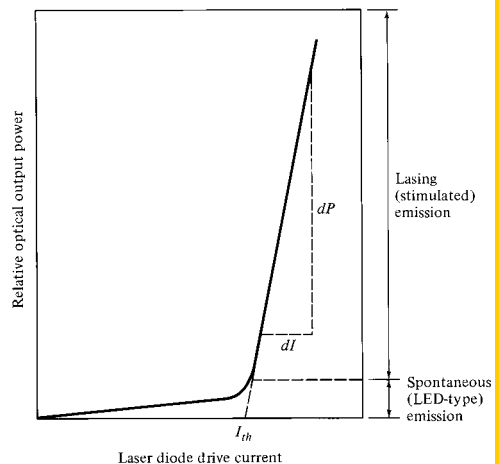
$$P_{\text{OUT}} = \eta \frac{hf}{q} I \quad [\text{W}]$$

0.8

LED → $\eta \sim 6\%$
LASER → $\eta \sim 70\%$

q: càrrega de l'electró ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C)

Característica Llum-Corrent



Eficiència quàntica interna i externa

$$\eta_i \equiv \frac{\langle N^\circ \text{ fot/seg} \rangle_{\text{generats}}}{\langle N^\circ \text{ e} - \text{h/seg} \rangle_{\text{total}}} = \frac{\langle N^\circ \text{ e} - \text{h/seg} \rangle_{\text{radiatives}}}{\langle N^\circ \text{ e} - \text{h/seg} \rangle_{\text{total}}}$$

$$\eta_e \equiv \frac{\langle N^\circ \text{ fot/seg} \rangle_{\text{out}}}{\langle N^\circ \text{ fot/seg} \rangle_{\text{generats}}}$$

$$\eta \equiv \eta_i \cdot \eta_e$$

Si $\rightarrow \eta_i \sim 10^{-5}$

AsGa $\rightarrow \eta_i \sim 0.7$

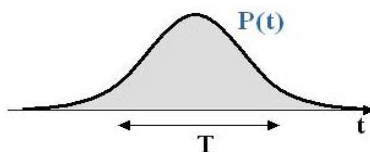
Causas d'ineficiència

- Omnidireccionalitat de la llum emesa
- Recombinacions no radiatives \rightarrow energia tèrmica
- Absorció estimulada en la zona activa
- Reflexió en el canvi de medi font-aire/fibra
- El fonó

Qualitat de la Llum Emesa

NATURALES ALEATÒRIA DE LA LLUM

Conceptes determinístics



Potència $\rightarrow P(t)$

Energia bit $\rightarrow E_{\text{bit}} = \int P(t)dt$

Energia fotó $\rightarrow hf$

Conceptes aleatoris

$$N^\circ \text{ fot/bit} \equiv \frac{E_{\text{bit}}}{hf} = m = \underbrace{\langle m \rangle}_{\text{INFO}} + \underbrace{(m - \langle m \rangle)}_{\text{FLUCTUACIÓ}}$$

m: variable aleatòria

CONCEPTE DE SNR

$$p = m + n = \underbrace{\langle m \rangle}_{\text{INFO}} + \underbrace{(m - \langle m \rangle)}_{\text{FLUCTUACIÓ}} + \underbrace{n}_{\text{SOROLL}}$$



$$\text{SNR} \equiv \frac{\langle m \rangle^2}{\langle (m - \langle m \rangle + n)^2 \rangle} = \frac{\langle m \rangle^2}{\sigma_m^2 + \sigma_n^2} < \infty$$

aleatorietat de la llum

LASER

llum coherent → estadística de Poisson

$$\sigma_m^2 = \langle m \rangle$$

$$\text{SNR} = \langle m \rangle$$

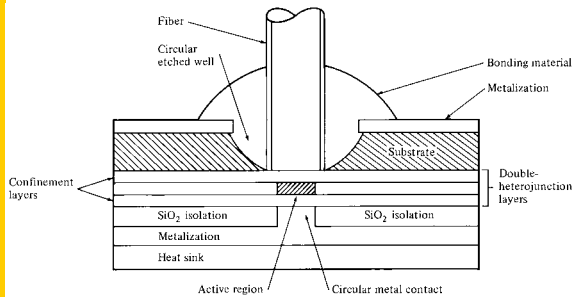
LED

llum incoherent → estadística de Bose-Einstein

$$\sigma_m^2 = \langle m \rangle (\langle m \rangle + 1)$$

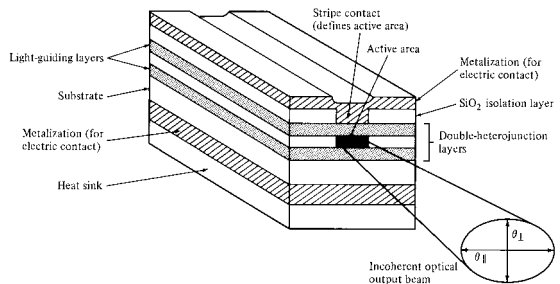
$$\text{SNR} = \frac{\langle m \rangle^2}{\langle m \rangle (\langle m \rangle + 1)} \approx 1$$

LED (Light Emitting Diode)

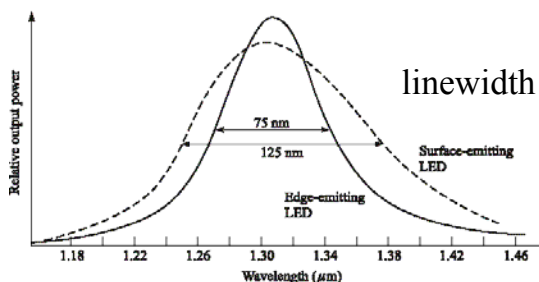


Edge-Emitting LED

Surface-Emitting LED



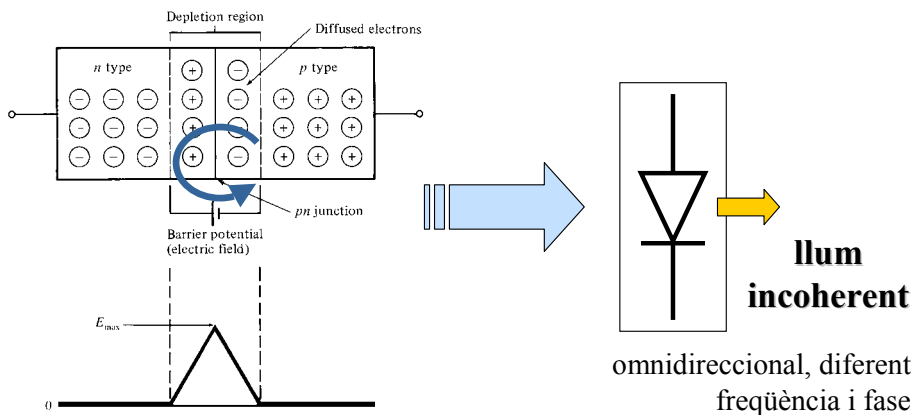
Prestacions d'un LED



- BW fins a 100 MHz → R_B fins a 100 Mb/s
- $\Delta\lambda$ molt gran → 100 nm
- P_{OUT} molt petita → -20 dBm

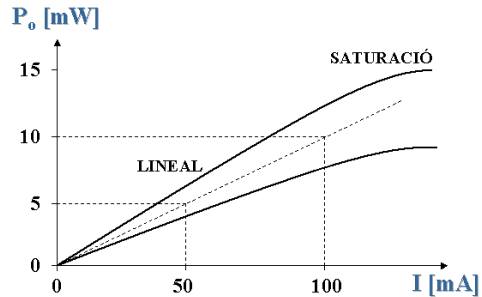
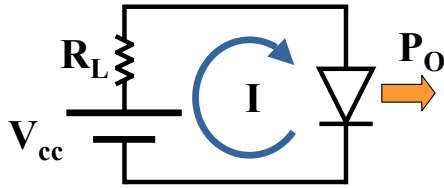
PRINCIPI DE FUNCIONAMENT

“La font LED és un diode (unió PN) polaritzat en directa que emet llum per **emissió espontània** (llum incoherent) gràcies al procés de recombinació de parells electró-forat”



Característica Llum-corrent

“És la representació de la potència òptica emesa per la font en funció de la intensitat de corrent elèctric de polarització”



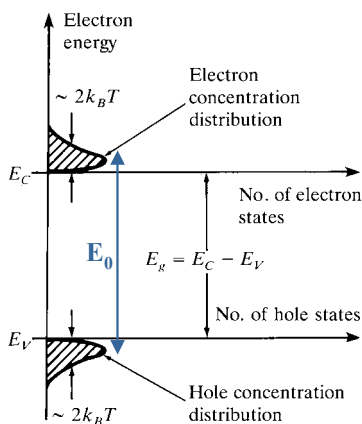
$$\eta \equiv \frac{\langle N^{\circ} \text{ fot/seg} \rangle}{\langle N^{\circ} e - h/\text{seg} \rangle} = \frac{P_{\text{OUT}}/hf}{I/q}$$

$$P_{\text{OUT}} = \eta \frac{hf}{q} I = \eta \frac{h c}{q \lambda} I = \eta \frac{1.24 \cdot 10^{-6}}{\lambda} I \quad [\text{W}]$$

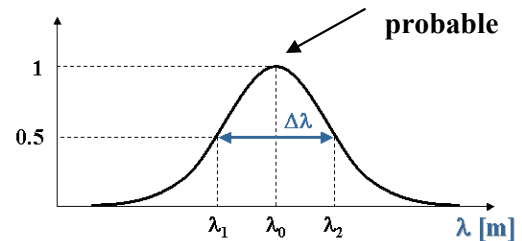
rendiment típic : 0.05 mW/mA

Espectre de Potència

“Un dels trets característics dels LEDs és la seva amplada espectral deguda a que la llum és incoherent (emissió espontània)”



Potència Relativa



Freqüència central - λ_0 (salt més probable):

$$\langle E_{ph} \rangle = E_g + \underbrace{\frac{K_B T}{q}}_{s. tèrmic} \approx E_g = \frac{hf}{q} \quad [eV] \quad \Rightarrow \quad \lambda_0 = \frac{hc}{q E_g}$$

K_B : ct de Boltzmann $1.38 \cdot 10^{-23}$ [J/°K]
T: temperatura [°K]

Increment freqüencial - $\Delta\lambda$:

$$\begin{aligned} \Delta E \equiv E_2 - E_1 &= hf_2 - hf_1 = hc \left[\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right] = -hc \left[\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_2 \lambda_1} \right] = \\ &= hc \frac{\Delta\lambda}{\left(\lambda_0 - \frac{\Delta\lambda}{2} \right) \left(\lambda_0 + \frac{\Delta\lambda}{2} \right)} = hc \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0^2 - \left(\frac{\Delta\lambda}{2} \right)^2} \approx hc \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0^2} \quad [J] \end{aligned}$$

$\Delta\lambda \ll \lambda_0$

$$\Delta\lambda \approx \frac{\Delta E}{hc} \lambda_0^2 \quad \Rightarrow \quad \Delta\lambda \approx \frac{\Delta E}{hc} q \lambda_0^2 \quad [eV]$$

$$\Delta E_{LED} \sim 3-4 K_B T/q$$

Efecte de la temperatura :

$$\langle E_{ph} \rangle = E_g(T) + \frac{K_B T}{q} \rightarrow \lambda_0(T)$$

$$\Delta\lambda(T) \propto \left(\frac{T}{T_0} \right) \lambda_0^2 \quad \Delta\lambda_{LED} \sim 0.3-0.4 \text{ nm}/^\circ\text{C}$$

Llum incoherent :

emissió espontània \rightarrow fotons amb freqüència, fase i direcció aleatòries (llum incoherent)

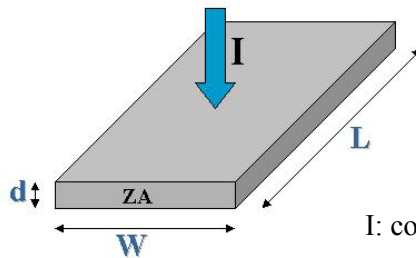
COMPORTAMENT DINÀMIC DEL LED

“La manera en que els portadors recuperen l’equilibri degut a una variació del corrent ve regida pel que es coneix com a **equació de ritme del LED**”

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{variació de} \\ \text{portadors} \\ \text{per unitat de} \\ \text{volum} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{ritme de} \\ \text{generació de} \\ \text{portadors} \\ \text{per unitat de} \\ \text{volum} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{ritme de} \\ \text{recombinació} \\ \text{de portadors} \\ \text{per unitat de} \\ \text{volum} \end{array} \right\}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} \qquad \qquad \qquad \mathbf{J} \qquad \qquad \qquad \mathbf{N}, \tau_r$$

N: densitat de portadors en la ZA J: densitat de corrent superficial



I: corrent de polarització en la ZA

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{J} \equiv \frac{\mathbf{I}}{\text{àrea}(ZA)} = \frac{\mathbf{I}}{WL} \\ \text{generació de} \\ \text{portadors} \equiv \frac{\mathbf{I}}{q \cdot V} = \frac{\mathbf{J}}{q \cdot d} \\ \text{recombinació} \\ \text{de portadors} \equiv \frac{N}{\tau_r} \end{array} \right\}$$

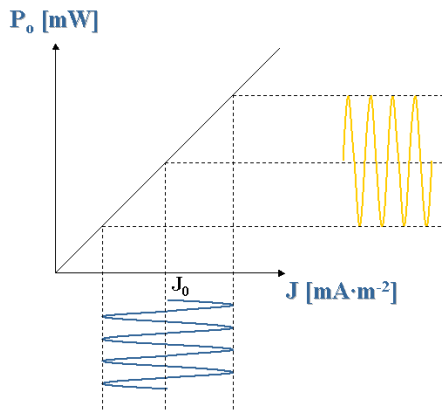
Equació de ritme del LED

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\mathbf{J}}{q \cdot d} - \frac{N}{\tau_r} \quad [m^{-3}s^{-1}]$$

$$t_0 \left\{ \begin{array}{l} N = N_0 \\ J = 0 \end{array} \right. \rightarrow \frac{\partial N}{\partial t} = -\frac{N}{\tau_r} \rightarrow N = N_0 e^{-\frac{t}{\tau_r}}$$

Comportament pas-baix

Modulació del LED - Modulació sinusoidal



J_0 : densitat de corrent constant
 N_0 : densitat de portadors en RE

Règim estacionari

$$\frac{\partial N_0}{\partial t} = 0 \rightarrow \frac{J_0}{q \cdot d} = \frac{N_0}{\tau_r}$$

$$N_0 = \frac{J_0}{q \cdot d} \tau_r$$

$$P_0 = \eta \frac{I_0}{q} hf = \eta \frac{J_0 WL}{q} hf = \eta \frac{N_0}{\tau_r} V \cdot hf$$

Règim sinusoidal

$$J(t) \equiv J_0 [1 + m_J e^{j\omega t}]$$

$$N(t) \equiv N_0 [1 + m_N e^{j(\omega t - \theta)}]$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{J}{q \cdot d} - \frac{N}{\tau_r}$$



$$N_0 m_N j\omega e^{j(\omega t - \theta)} = \frac{J_0 [1 + m_J e^{j\omega t}]}{q \cdot d} - \frac{N_0 [1 + m_N e^{j(\omega t - \theta)}]}{\tau_r}$$

$$\frac{J_0}{q \cdot d} = \frac{N_0}{\tau_r} \rightarrow m_J = m_N e^{-j\theta} (1 + j\omega\tau_r) \rightarrow m_N = \frac{m_J}{1 + j\omega\tau_r} e^{j\theta}$$

potència òptica de sortida

$$P(t) = \eta \frac{N(t)}{\tau_r} V \cdot hf = P_0 \left[1 + \frac{m_J}{1 + j\omega\tau_r} e^{j\omega t} \right]$$

$$J(t) \equiv J_0 [1 + m_J e^{j\omega t}]$$

$$N(t) \equiv N_0 [1 + m_N e^{j(\omega t - \theta)}]$$



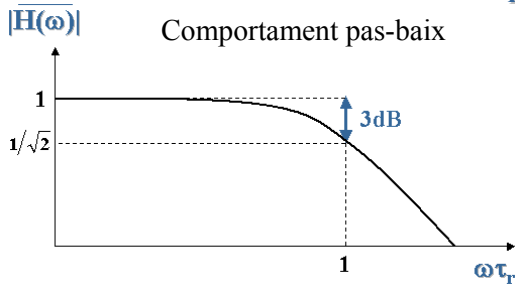
Funció de transferència

$$H(\omega) \equiv \frac{\Delta P}{\Delta I}$$

$$P(t) = P_0 \left[1 + \frac{m_J}{1 + j\omega\tau_r} e^{j\omega t} \right] \rightarrow \Delta P = P_0 \frac{m_J}{1 + j\omega\tau_r} e^{j\omega t}$$

$$I(t) = I_0 [1 + m_J e^{j\omega t}] \rightarrow \Delta I = I_0 m_J e^{j\omega t}$$

$$H(\omega) = \eta \frac{hf}{q} \frac{1}{1 + j\omega\tau_r}$$



freqüència de tall de modulació

$$|\overline{H(\omega)}| = \eta \frac{hf}{q} \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau_r)^2}}$$

$$\omega = \frac{1}{\tau_r} \rightarrow f_{3dB} = \frac{1}{2\pi\tau_r}$$

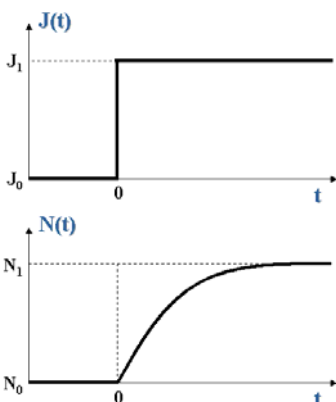
típicament: 10–100 MHz

Modulació digital

graó de corrent

$$J(t) \equiv J_0 + [J_1 - J_0] \cdot u(t) = J_0 + \Delta J$$

$$N(t) \equiv N_0 + \Delta N = \frac{J_0}{q \cdot d} \tau_r + \Delta N$$



$$\frac{\partial \Delta N(t)}{\partial t} = \frac{J_0 + \Delta J(t)}{q \cdot d} - \frac{N_0 + \Delta N(t)}{\tau_r}$$

$$\frac{\partial \Delta N(t)}{\partial t} = \frac{J_1 - J_0}{q \cdot d} u(t) - \frac{\Delta N(t)}{\tau_r}$$

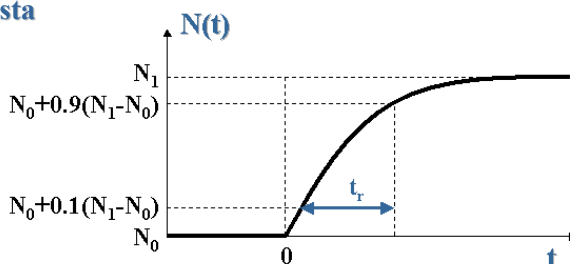
$$s \cdot \Delta N(s) - \Delta N(0) = \frac{J_1 - J_0}{q \cdot d} \frac{1}{s} - \frac{\Delta N(s)}{\tau_r}$$

$$\Delta N(s) = \frac{J_1 - J_0}{q \cdot d} \frac{1}{s} \frac{1}{(s + 1/\tau_r)}$$

$$\Delta N(s) = \frac{J_1 - J_0}{q \cdot d} \left(\frac{\tau_r}{s} - \frac{\tau_r}{s + 1/\tau_r} \right)$$

$$\Delta N(t) = \frac{J_1 - J_0}{q \cdot d} \tau_r (1 - e^{-t/\tau_r}) \cdot u(t)$$

temps de resposta



$$\Delta N(t) = \frac{J_1 - J_0}{q \cdot d} \tau_r (1 - e^{-t/\tau_r})$$

$$N(t) = N_0 + (N_1 - N_0)(1 - e^{-t/\tau_r})$$

$$N_f - N_0 = (N_1 - N_0)(1 - e^{-t/\tau_r})$$

$$e^{-t/\tau_r} = 1 - \frac{N_f - N_0}{N_1 - N_0} = \frac{N_1 - N_f}{N_1 - N_0}$$

$$t = \tau_r \ln\left(\frac{N_1 - N_0}{N_1 - N_f}\right)$$

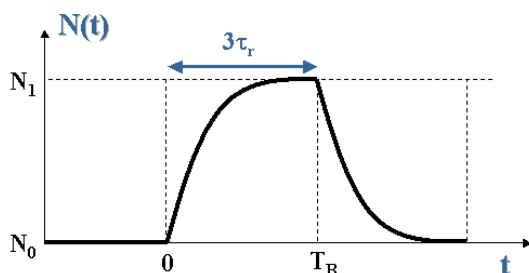
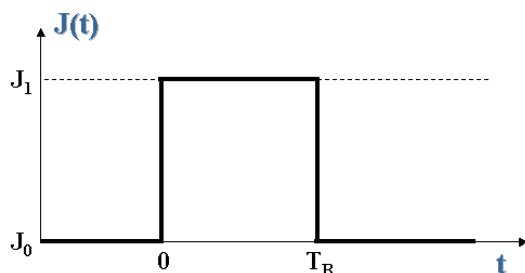
$$t_{0.1} = \tau_r \ln\left(\frac{N_1 - N_0}{N_1 - (0.1(N_1 - N_0) + N_0)}\right)$$

$$t_{0.9} = \tau_r \ln\left(\frac{N_1 - N_0}{N_1 - (0.9(N_1 - N_0) + N_0)}\right)$$

$$t_r = t_{0.9} - t_{0.1} = \tau_r \ln(0.9/0.1)$$

$$f_{3dB} = \frac{1}{2\pi\tau_r} = \frac{1}{2\pi\tau_r} \ln(0.9/0.1)$$

velocitat màxima de modulació



El temps de resposta del LED limita la velocitat de modulació

conveni

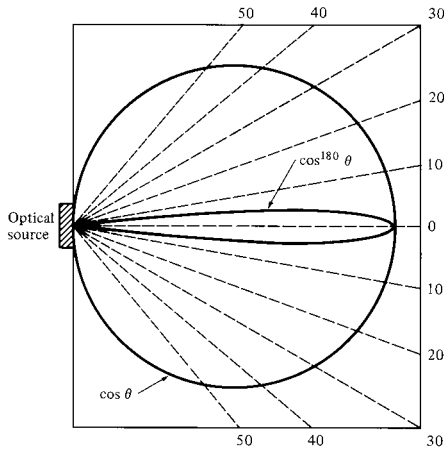
$$T_B \geq 3\tau_r$$

$$R_B \leq \frac{1}{3\tau_r}$$

típicament: $\tau_r \sim 10\text{ns}$

PÈRDUES EN EL LED

Diagrama de Radiació



Llei de Lambert

$$I(\theta) = I_0 \cos \theta$$

$$P(\theta) = P_0 \cos \theta$$



$$P_T = 2\pi \int_0^{\pi/2} P(\theta) \sin \theta \cdot \theta$$

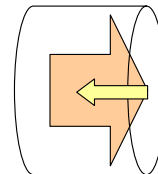
$$P_i = 2\pi \int_0^{\theta_a} P(\theta) \sin \theta \cdot \theta$$

$$\eta_c \equiv \frac{P_i}{P_T} = \sin^2 \theta_a = NA^2$$

Desadaptació d'índex de refracció (reflexió)

$$P_{IN} = 2\pi \int_0^{\theta_a} (1 - R) P(\theta) \sin \theta \cdot \theta$$

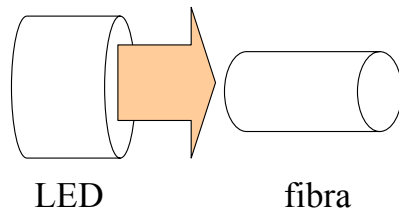
$$R = \left(\frac{n_{ZA} - n_0}{n_{ZA} + n_0} \right)^2 \leftarrow \text{Llei de Fresnel}$$



Desadaptació de superfície efectiva LED/fibra

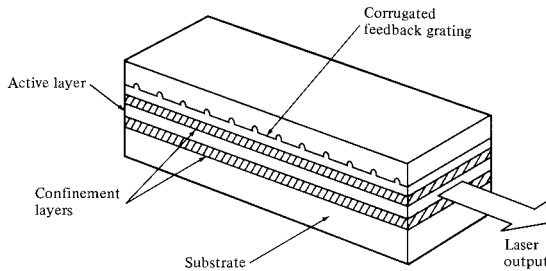
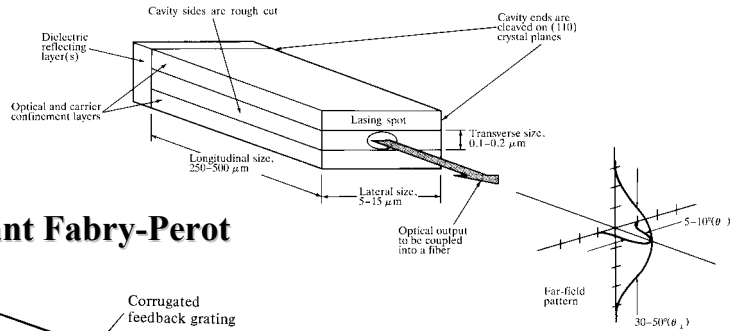
$$P_{IN} = 2\pi \int_0^{\theta_a} LP(\theta) \sin \theta \cdot \theta$$

$$L = \left(\frac{\phi_{fibra}}{\phi_{LED}} \right)^2 \leftarrow \phi_{LED} > \phi_{fibra}$$



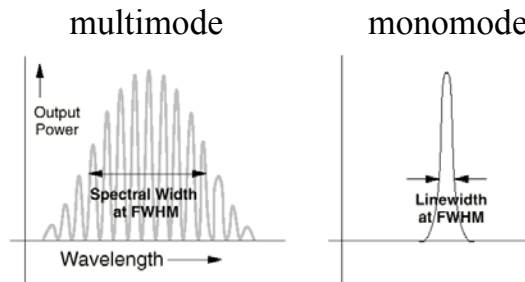
LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

cavitat ressonant Fabry-Perot



laser DFB

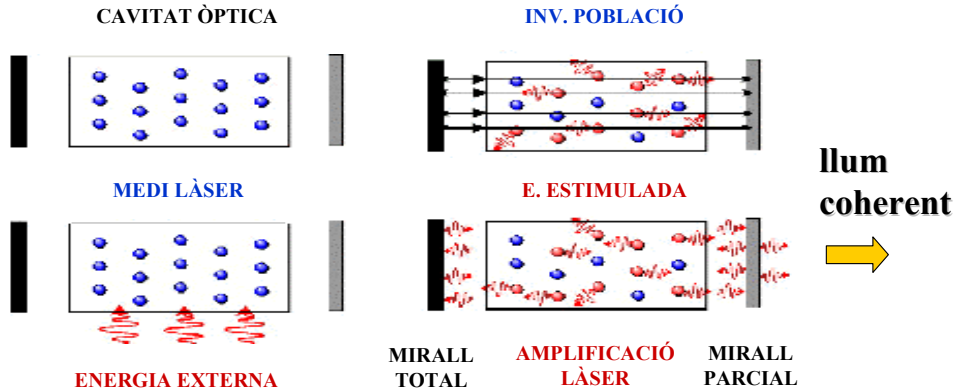
Prestacions d'un LÀSER



- BW fins a 10 GHz → R_B fins a 10 Gb/s
- $\Delta\lambda$ molt estret → 10 MHz (0.08 pm)
- P_{OUT} elevada → 3 dBm

PRINCIPI DE FUNCIONAMENT

“La font LÀSER és una cavitat òptica ressonant que es basa en el procés d’**emissió estimulada** per tal de generar llum coherent”



Expressió del Guany

Ritme E. Estimulada Neta: $r_e \equiv r_{st} - r_a = (N_2 - N_1)\rho \cdot B \quad [m^{-3}s^{-1}]$

$P = \rho \cdot v \quad [W \cdot m^{-2}]$

$\frac{\partial P}{\partial z} = r_e \cdot hf = (N_2 - N_1)\rho \cdot B \cdot hf = (N_2 - N_1)\frac{P}{v} \cdot B \cdot hf \quad [W \cdot m^{-3}]$

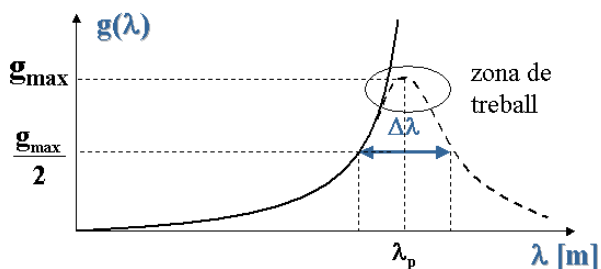
$P = P_0 \exp\left[\underbrace{(N_2 - N_1)\frac{hf}{v} \cdot B \cdot z}_G\right] \equiv P_0 \exp[gz] \quad [W \cdot m^{-2}]$

$g \equiv (N_2 - N_1)\frac{hf}{v} \cdot B = (N_2 - N_1)\frac{\lambda^2}{n^2 8\pi\tau_r} \quad [m^{-1}] \quad g \propto r_e \propto \rho$

$N_2 > N_1$ **Inversió de Població**

$g = 0 \rightarrow$ absorció = emissió

$g \propto \lambda^2$



Mecanisme de Bombeig

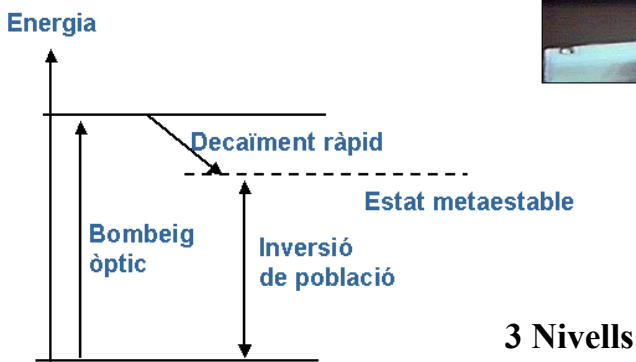
Inversió de població

↳ BOMBEIG → $N_2 \uparrow$ → emissió ↑ → $N_2 \downarrow$ $N_1 \uparrow$ tendeixen a igualar-se

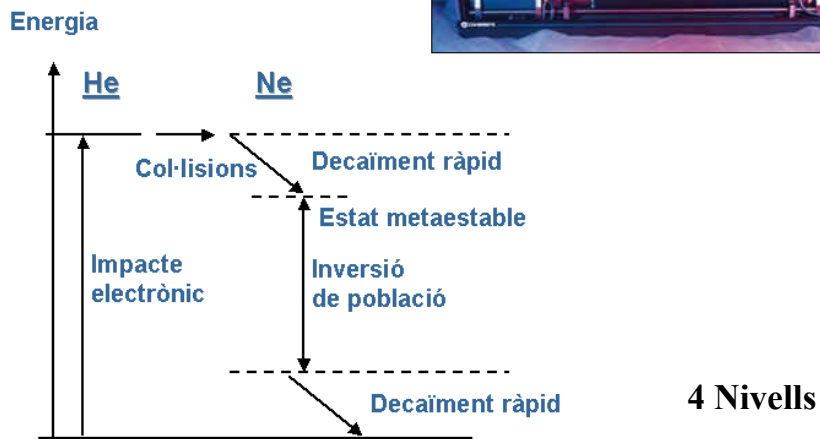
Com s'aconsegueix el guany i per tant l'efecte làser ?

↳ S'ha de considerar un sistema amb, com a mínim, 3 nivells d'energia, a un dels quals existeix una transició ràpida des de l'estat més energètic i es coneix com a "estat metaestable"

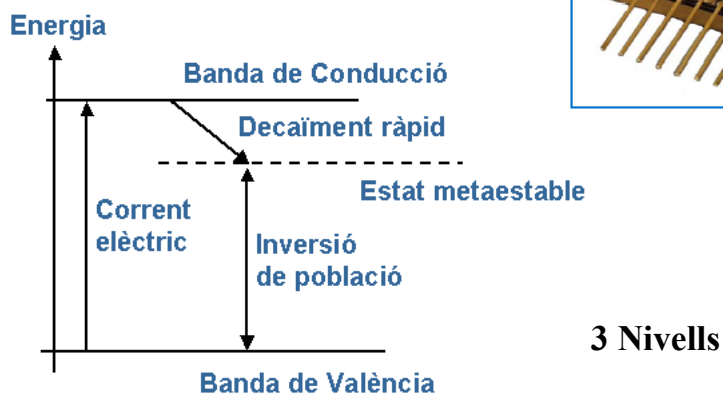
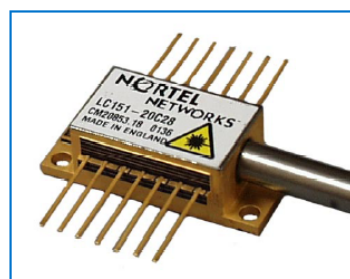
Làser d'Estat Sòlid: Ruby



Làser de Gas: He-Ne

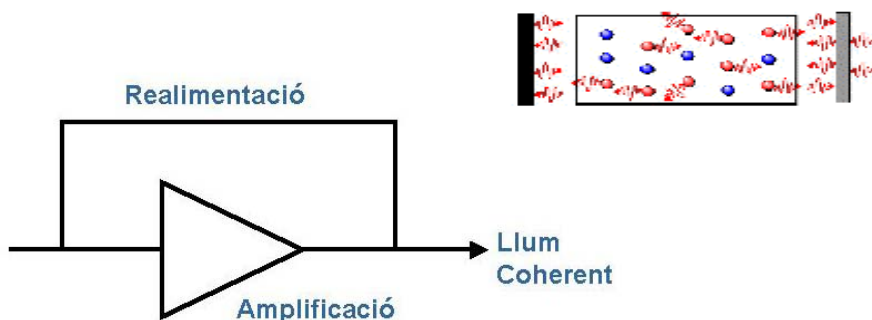


Làser semiconductor: GaAs



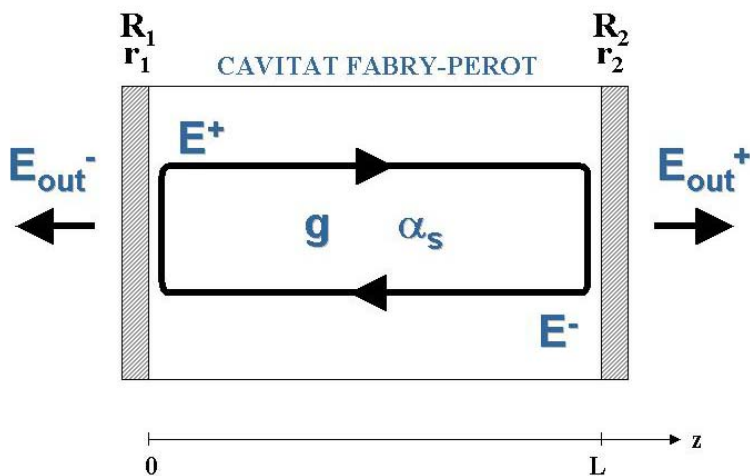
MODEL EQUIVALENT

“La font LÀSER es pot modelar com un sistema amplificador realimentat”



Guany > Pèrdues

Condicció d'Oscil·lació



R_i : Coef. Reflx. Potència
 r_i : Coef. Reflx. Camp

g : Coef. Guany Potència [m^{-1}]
 α_s : Coef. Pèrdua Scattering [m^{-1}]

Condió d'Oscil·lació

$$E^+(z) = E_0^+ e^{\frac{1}{2}(g-\alpha_s)z} e^{-j\beta z} e^{-j\omega t}$$

$$E^-(z) = E_L^- e^{\frac{1}{2}(g-\alpha_s)(L-z)} e^{-j\beta(L-z)} e^{j\omega t}$$

Equacions de Propagació

$$\left. \begin{aligned} E^+(z=0) &= r_1 E^-(z=0) \\ E^-(z=L) &= r_2 E^+(z=L) \end{aligned} \right\} \rightarrow E_0^+ = r_1 r_2 E_0^+ e^{(g-\alpha_s)L} e^{-j2\beta L}$$

Condicions de Contorn



$$g_{th} \equiv \alpha_t \leftarrow \text{Mòdul} \quad \mathbf{1 = r_1 r_2 e^{(g-\alpha_s)L}}$$

$$\text{modes d'oscil·lació} \leftarrow \text{Fase} \quad \mathbf{1 = e^{-j2\beta L}}$$

α_t : pèrdues totals

Condió d'Oscil·lació de mòdul

$$1 = r_1 r_2 e^{(g_{th}-\alpha_s)L}$$

$$\frac{1}{r_1 r_2} = e^{(g_{th}-\alpha_s)L} \rightarrow \ln\left(\frac{1}{r_1 r_2}\right) = (g_{th} - \alpha_s)L = 1$$

$$g_{th} = \alpha_s + \frac{1}{L} \ln\left(\frac{1}{r_1 r_2}\right) = \alpha_s + \underbrace{\frac{1}{2L} \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right)}_{\alpha_c} \equiv \alpha_t$$

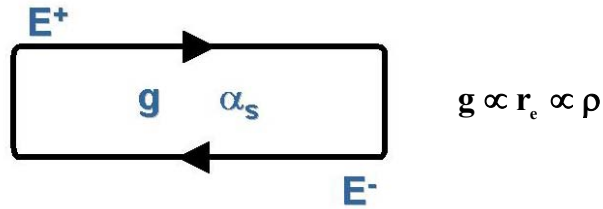
$$R_i = |r_i|^2$$

$$g \geq g_{th} = \alpha_s + \frac{1}{2L} \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right)$$

α_t : pèrdues totals

α_c : pèrdues degudes a la cavitat

[m⁻¹]



BOMBEIG $\rightarrow N_2 \uparrow \rightarrow$ **emissió \uparrow** $\rightarrow N_2 \downarrow$ **tendeixen a**
 $N_1 \uparrow$ **igualar-se**

Ritme de Bombeig Fix \rightarrow **Saturació del Guany**

- $g > \alpha_t \rightarrow$ Situació Inestable (Saturació)
- $g = \alpha_t \rightarrow$ Situació Estable (Oscil·lació)
- $g < \alpha_t \rightarrow$ Situació Inestable (No Oscil·lació)

Condicció d'Oscil·lació de fase

$$1 = e^{-j2\beta L}$$

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

$$2 \frac{2\pi}{\lambda} nL = m \cdot 2\pi \rightarrow L = m \frac{\lambda_m}{2n} = m \frac{c}{2nf_m}$$

$$f_m = m \frac{c}{2nL}$$

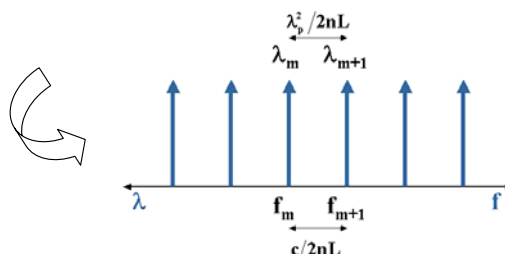
Freq. Ressonància Cavitat

Modes longitudinals

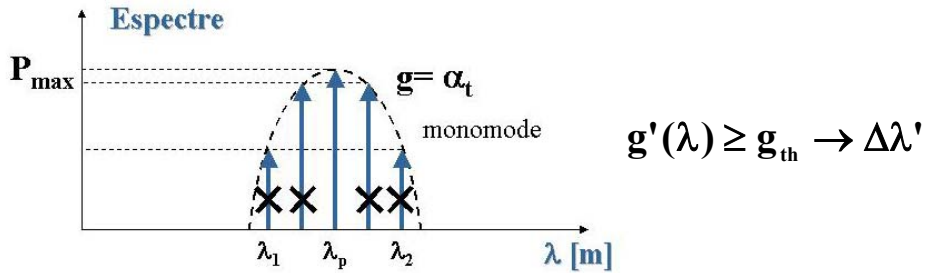
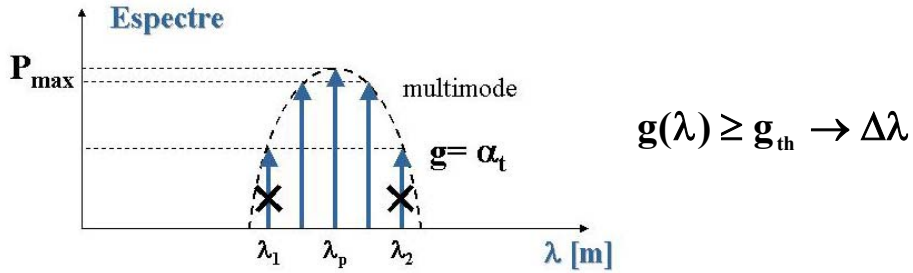
$$\Delta f = \frac{c}{2nL}$$

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda_p} \approx \frac{\Delta f}{f_p}$$

$$\Delta \lambda \approx \Delta f \cdot \frac{\lambda_p^2}{c} = \frac{\lambda_p^2}{2nL}$$



Efecte combinat



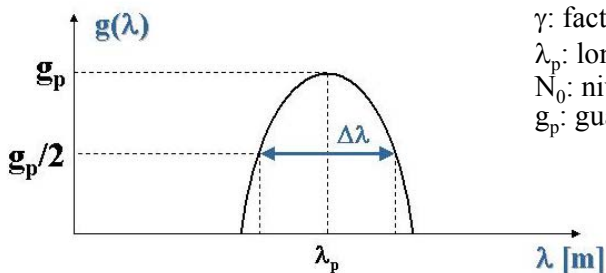
Guany del material per unitat de longitud

$$g \equiv g(\lambda) \equiv g(E_g) \propto r_c(E_g) \propto \lambda^2$$

model matemàtic



$$g_m(N, \lambda) \equiv a(N - N_0) - \gamma(\lambda - \lambda_p)^2 \quad [m^{-1}]$$



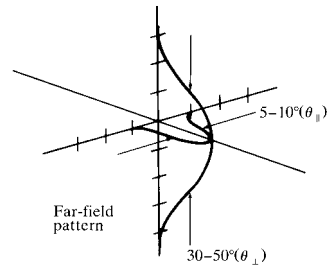
- a: coeficient de guany
- γ : factor de curvatura
- λ_p : longitud d'ona de pic
- N_0 : nivell de transparència
- g_p : guany màxim

Factor de Confinament

“Percentatge d’energia que cau dins la zona activa ”

$$\Gamma \equiv \frac{E|_{ZA}}{E|_{\text{Total}}} \leq 1$$

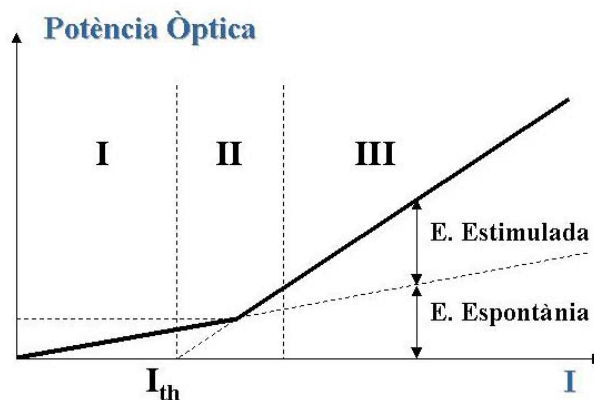
$$g(\lambda) \equiv \Gamma g_m(\lambda) = \Gamma a(N - N_0) - \Gamma \gamma(\lambda - \lambda_p)^2$$



Guany Net de la llum en el medi

$$g_n(\lambda) \equiv \Gamma g_m(\lambda) - \alpha_s = \Gamma a(N - N_0) - \Gamma \gamma(\lambda - \lambda_p)^2 - \alpha_s$$

CARACTERÍSTICA LLUM-CORRENT

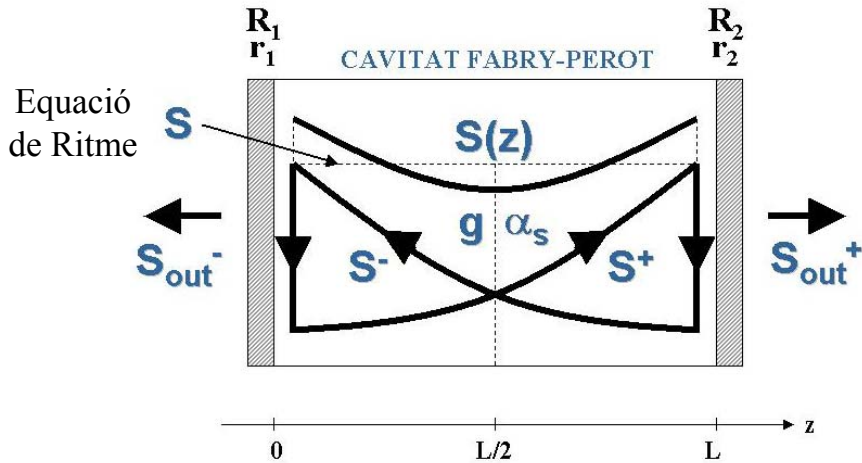


I → Llum com la d’un LED, E. Espontània

II → Llum com la d’un LED amplificada

III → Efecte Làser , Llum Coherent, E. Estimulada

Potència Òptica



$$R_1 = R_2 = R \quad g = \Gamma g_m \quad 1 = r_1 r_2 e^{(g-\alpha_s)L} = \text{Re}^{(g-\alpha_s)L}$$

$$S^+(L/2) = S^-(L/2)$$

S: densitat de fotons en la ZA [m⁻³]

$$S(z) = S^+(z) + S^-(z) = S^+(0)e^{(g-\alpha_s)z} + S^-(z)e^{(g-\alpha_s)(L-z)}$$

$$S_{out} = (1-R)S^+(L) = (1-R)S^+(0)e^{(g-\alpha_s)L} = (1-R)S^+(L/2)e^{(g-\alpha_s)L/2}$$

$$S(L/2) = S^+(L/2) + S^-(L/2) = 2 \cdot S^+(L/2)$$

$$S_{out} = \left((1-R)/\sqrt{R} \right) S^+(L/2) = \left((1-R)/2\sqrt{R} \right) S(L/2)$$

$$P \equiv S \cdot v \cdot W \cdot d \cdot h \cdot f \quad \uparrow \quad 1 = r_1 r_2 e^{(g-\alpha_s)L} = \text{Re}^{(g-\alpha_s)L}$$

$$P_{out} = \left((1-R)/2\sqrt{R} \right) S(L/2) v \cdot W \cdot d \cdot h \cdot f \quad S^+(L/2) = S^-(L/2)$$

$$S(L/2) \approx S$$

$$P_m = \left((1-R)/2\sqrt{R} \right) S_m v \cdot W \cdot d \cdot h \cdot f_m \quad \downarrow$$

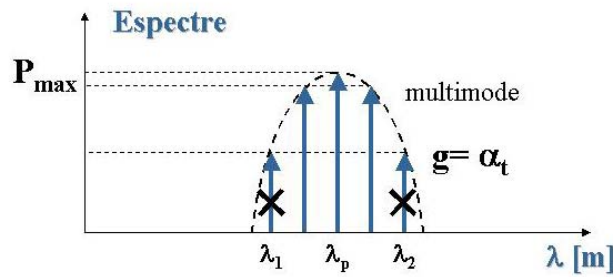
$$f_m \approx f_p$$

$$P_{out} = \sum_m P_m \quad \Rightarrow \quad P_{out} \approx \sum_m \left((1-R)/2\sqrt{R} \right) \cdot S_m v \cdot W \cdot d \cdot h \cdot f_p$$

Potència Òptica Total

[W]

ESPECTRE DE POTÈNCIA



1. $\Delta f = \frac{c}{2nL}$ $\Delta \lambda \approx \frac{\lambda_p^2}{2nL}$ freqüències de ressonància
2. $g \geq g_{th} = \alpha_s + \frac{1}{2L} \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right)$ condició de guany

COMPORTAMENT DINÀMIC DEL LÀSER

“Per al cas del Làser s’han de tractar les dues partícules, portadors i fotons, per separat degut a l’efecte d’estimulació ”

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{variació de} \\ \text{portadors} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{ritme de} \\ \text{gen. de} \\ \text{portadors} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{ritme d' } \\ \text{em. esp.} \\ \text{portadors} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{ritme d' } \\ \text{em. est.} \\ \text{portadors} \end{array} \right\}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{variació de} \\ \text{fotons} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{ritme d' } \\ \text{em. est.} \\ \text{fotons} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{ritme d' } \\ \text{absorció} \\ \text{fotons} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{ritme d' } \\ \text{em. esp.} \\ \text{fotons} \end{array} \right\}$$

EQUACIONS DE RITME DEL LÀSER

Portadors $\Rightarrow \frac{\partial N}{\partial t} = \frac{J}{q \cdot d} - \frac{N}{\tau_r} - v \sum_i g_i S_i$ $[m^{-3}s^{-1}]$

Fotons $\Rightarrow \frac{\partial S_i}{\partial t} = v \cdot g_i S_i - v \cdot \alpha_t S_i + \beta \frac{N}{\tau_r}$ $[m^{-3}s^{-1}]$

valors mitjos

N: densitat de portadors en la ZA J: densitat de corrent superficial
 S: densitat de fotons en la ZA τ_r : temps de vida del portador
 g: guany per em. est. neta β : coef. d'emissió espontània
 sub-índex i: mode i-èssim α_t : pèrdues totals en la cavitat

temps mitjà de permanència d'un fotó en la cavitat $\Rightarrow \tau_p \equiv \frac{1}{v \cdot \alpha_t}$ [s]

Comportament Estàtic

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} &= \frac{J}{q \cdot d} - \frac{N}{\tau_r} - v \cdot g S = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial t} &= v \cdot g S - v \cdot \alpha_t S + \beta \frac{N}{\tau_r} = 0 \\ \frac{J}{q \cdot d} - \frac{N}{\tau_r} (1 - \beta) - v \cdot \alpha_t S &= 0 \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{Cavitat Monomode} \\ \text{R. Estacionari } \frac{\partial}{\partial t} = 0 \end{array}$$

$$S = \frac{J}{v \cdot \alpha_t q \cdot d} - \frac{N}{v \cdot \alpha_t \tau_r} (1 - \beta) = \frac{J}{q \cdot d} \tau_p - \frac{\tau_p}{\tau_r} N (1 - \beta)$$

$$\lambda = \lambda_p \rightarrow g = \Gamma g_m(\lambda_p) = \Gamma a(N - N_0) \quad \leftarrow \lambda_{\text{emissió}} = \lambda_p$$

$$v \Gamma a(N - N_0) S - v \cdot \alpha_t S + \beta \frac{N}{\tau_r} = 0$$

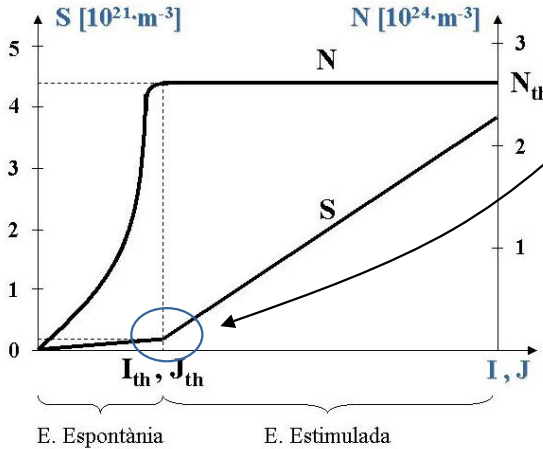


Constant amb J

Lineal amb J

$$N = \frac{1}{v\Gamma a \cdot \tau_p} \frac{1 + N_0 v\Gamma a \cdot \tau_p}{1 + \beta/S \cdot v\Gamma a \cdot \tau_r}$$

$$S = J \frac{\tau_p}{q \cdot d} - \frac{(1-\beta)}{v\Gamma a \cdot \tau_r} \left[\frac{1 + N_0 v\Gamma a \cdot \tau_p}{1 + \beta/S \cdot v\Gamma a \cdot \tau_r} \right]$$



$$\frac{\partial}{\partial t} = 0$$

$$S = 0$$

$$J_{th} = \frac{q \cdot d}{\tau_r} N_{th}$$

$$\beta \ll 1$$

I_{th}, J_{th} : Corrent Llindar
 N_{th} : Dens. Port. Llindar

Condicció d'arrancada del Làser

$$\frac{\partial S}{\partial t} > 0 \rightarrow \frac{\partial S}{\partial t} = v \cdot gS - v \cdot \alpha_t S + \beta \frac{N}{\tau_r} > 0$$

$$v \cdot \Gamma a N \cdot S - v \cdot \Gamma a N_0 \cdot S - v \cdot \alpha_t S + \beta \frac{N}{\tau_r} > 0$$

$$N > \frac{N_0 + \frac{1}{\tau_p v \cdot \Gamma a}}{1 + \frac{\beta}{\tau_r v \cdot \Gamma a \cdot S}} \approx N_0 + \frac{1}{\tau_p v \cdot \Gamma a} = N_0 + \frac{\alpha_t}{\Gamma a} \equiv N_{th}$$

La concentració de fotons, i per tant la potència òptica, creix quan $N > N_{th}$.

$$J_{th} = \frac{q \cdot d}{\tau_r} N_{th} = \frac{q \cdot d}{\tau_r} \left(N_0 + \frac{\alpha_t}{\Gamma a} \right) = \underbrace{\frac{q \cdot d}{\tau_r} N_0}_{T.Medi} + \underbrace{\frac{q \cdot d}{\tau_r} \frac{\alpha_t}{\Gamma a}}_{P.Totals}$$

El corrent mínim ha de compensar la Transparència del Medi i les Pèrdues Totals.

Potència Òptica de sortida

$$\left. \begin{aligned} J \geq J_{th} \\ \frac{\beta}{\tau_r \nu \cdot \Gamma a \cdot S} \ll 1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{cases} S \approx \frac{\tau_p}{q \cdot d} (J - J_{th}) & \text{Lineal amb } J \\ N = N_{th} & \text{Constant amb } J \end{cases}$$

$$P_{out} = \left((1-R)/2\sqrt{R} \right) \cdot S \cdot \nu \cdot W \cdot d \cdot hf$$

$$P_{out} = \left((1-R)/2\sqrt{R} \right) \frac{\tau_p}{q \cdot d} (J - J_{th}) \cdot \nu \cdot W \cdot d \cdot hf$$

$$P_{out} = \left((1-R)/2\sqrt{R} \right) \frac{W \cdot hf}{q\alpha_t} (J - J_{th})$$



$$P_{out} = \left((1-R)/2\sqrt{R} \right) \frac{W \cdot hf}{q\alpha_t} (J - J_{th})$$

$$P_{out} = \left((1-R)/2\sqrt{R} \right) \frac{hf}{q\alpha_t L} (I - I_{th})$$

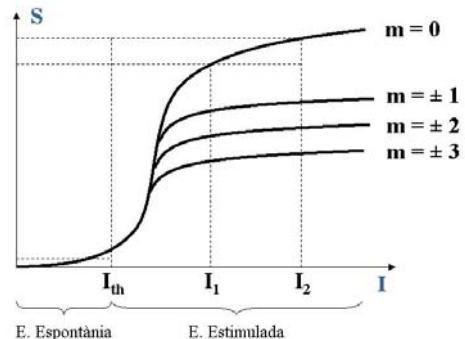
Condicó modal d'un diode Làser

1. freqüència del mode

$$g_m(\lambda) \equiv a(N - N_0) - \gamma(\lambda - \lambda_p)^2$$

$$|\lambda - \lambda_p| \uparrow \Rightarrow g_m(\lambda) \downarrow \Rightarrow S_m \downarrow$$

“A major separació del mode fonamental menor guany”

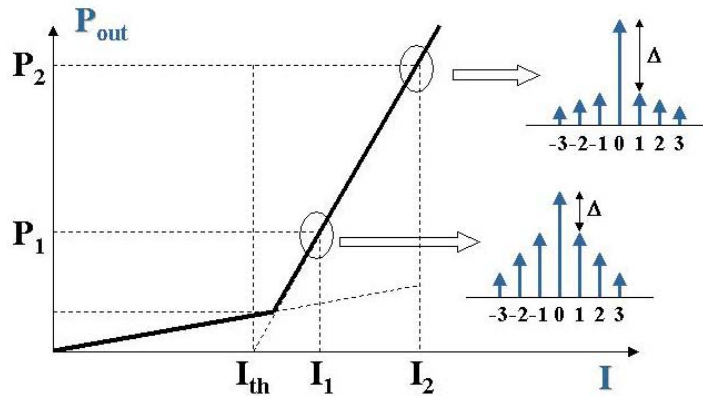


2. corrent de polarització

$I < I_{th} \Rightarrow$ E. Espontània (efecte LED)

$I > I_{th} \Rightarrow$ L'eficiència depèn del mode (efecte LÀSER)

“La relació mode principal – modes secundaris depèn fortament del corrent d’alimentació. Per tant la condició mono-mode també”



CONDICIÓ MONO-MODE PRÀCTICA \Rightarrow $SMSR \equiv 10 \log \frac{P_o}{p_1} \begin{cases} \geq 20\text{dB} \leftarrow 3a \\ \geq 13\text{dB} \leftarrow 2a \end{cases}$

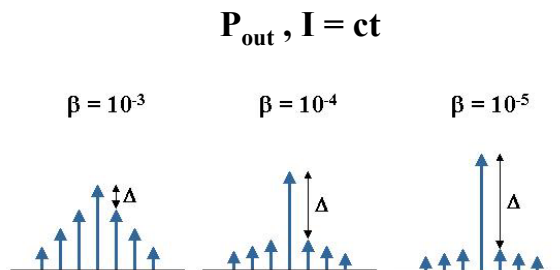
3. paràmetre β

“Determina la fracció d’emissió espontània que s’acobla en un DL”

$$\frac{\partial S_i}{\partial t} = v \cdot g_i S_i - v \cdot \alpha_i S_i + \beta \frac{N}{\tau_r}$$

$$S_{SAT}, P_{SAT} \propto \beta$$

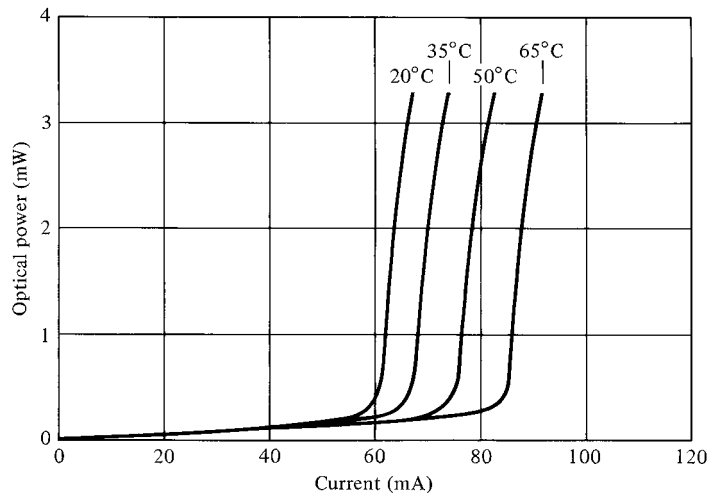
$\beta \downarrow \rightarrow$ mono-modalitat \uparrow



4. longitud de la cavitat

$$\Delta\lambda \approx \frac{\lambda_p^2}{2nL} \Rightarrow L \downarrow \rightarrow \text{mono-modalitat } \uparrow$$

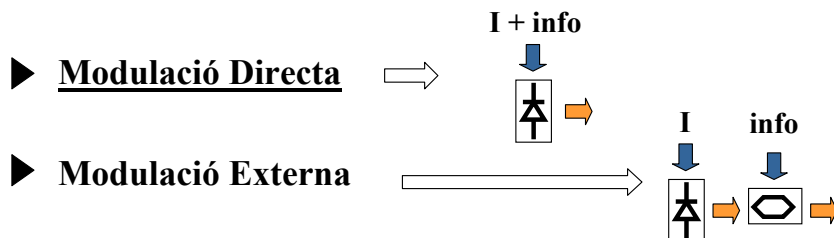
Efecte de la Temperatura



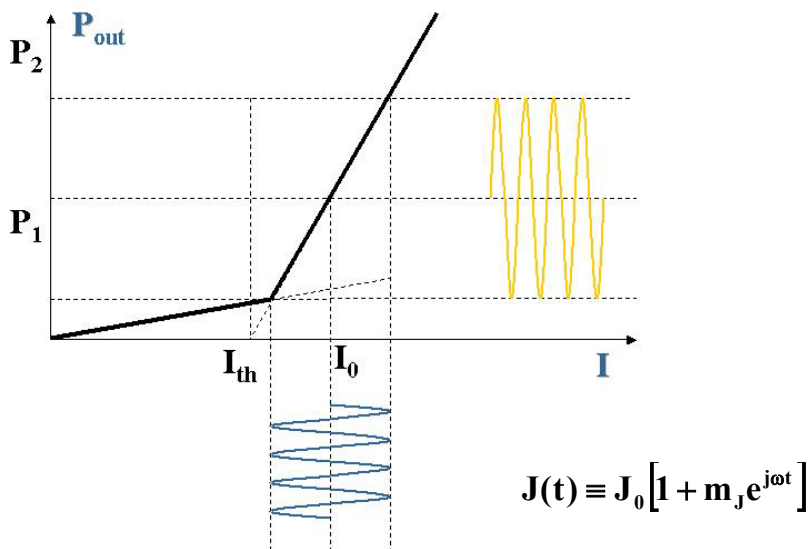
MODULACIÓ DEL LÀSER

Tipus de Modulació

- ▶ **Modulació d'Intensitat** \Rightarrow potència òptica (IM)
- ▶ **Modulació Coherent** (portadora òptica) \Rightarrow
 - amplitud (ASK)
 - freqüència (FSK)
 - fase (PSK)



Modulació Sinusoïdal



$J(t) \equiv J_0 [1 + m_j e^{j\omega t}] \equiv J_0 + \Delta J(t)$ Corrent de modulació

Règim estacionari

$\omega \rightarrow 0$

$J \equiv J_0 [1 + m_j]$

$S = \frac{\tau_p}{q \cdot d} (J - J_{th}) = \underbrace{\frac{\tau_p}{q \cdot d} (J_0 - J_{th})}_{S_0} + \underbrace{\frac{\tau_p}{q \cdot d} m_j J_0}_{\Delta S(0)}$

$$\begin{cases} S = \frac{\tau_p}{q \cdot d} (J - J_{th}) \\ N = N_{th} \end{cases}$$

Règim sinusoïdal

$S \equiv S_0 + \Delta S(t)$
 $N \equiv N_{th} + \Delta N(t)$

S_0 : densitat de fotons de la component contínua
 N_{th} : densitat de portadors de la component contínua

Variació sinusoïdal

Equació de Ritme de Portadors

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{J}{q \cdot d} - \frac{N}{\tau_r} - v g S \leftarrow g(N) = g(N_{th} + \Delta N(t)) = \underbrace{g(N_{th})}_{\alpha_t} + \Gamma a \cdot \Delta N(t)$$

$$\frac{\partial \Delta N}{\partial t} = \frac{J_0 + \Delta J}{q \cdot d} - \frac{N_{th} + \Delta N}{\tau_r} - v [\alpha_t + \Gamma a \cdot \Delta N] \cdot (S_0 + \Delta S)$$

$$N_{th} = J_{th} \frac{\tau_r}{q \cdot d} \quad S = \frac{\tau_p}{q \cdot d} (J - J_{th}) \leftarrow \tau_p \equiv \frac{1}{v \cdot \alpha_t}$$

$$\frac{\partial \Delta N}{\partial t} = \underbrace{\frac{J_0 - J_{th}}{q \cdot d}}_{S_0/\tau_p} - \frac{\Delta N}{\tau_r} - v [\alpha_t + \Gamma a \cdot \Delta N] \cdot (S_0 + \Delta S) + \frac{\Delta J}{q \cdot d}$$

$$\frac{\partial \Delta N}{\partial t} = \frac{S_0}{\tau_p} - \frac{\Delta N}{\tau_r} - \left[\frac{S_0}{\tau_p} + \frac{\Delta S}{\tau_p} + v \Gamma a \cdot \Delta N \cdot S_0 + \underbrace{v \Gamma a \cdot \Delta N \cdot \Delta S}_{\text{despreciable}} \right] + \frac{\Delta J}{q \cdot d}$$

$$\frac{\partial \Delta N}{\partial t} = -\Delta N \left(\frac{1}{\tau_r} + v \cdot \Gamma a \cdot S_0 \right) - \frac{\Delta S}{\tau_p} + \frac{\Delta J}{q \cdot d} \quad (1)$$

Equació de Ritme de Portadors

$$\frac{\partial S}{\partial t} = v \cdot g \cdot S - v \cdot \alpha_t S + \beta \frac{N}{\tau_r} = \frac{S}{\tau_p} \left(\frac{g}{\alpha_t} - 1 \right) + \underbrace{\beta \frac{N}{\tau_r}}_{\beta \ll 1}$$

$$\frac{\partial \Delta S}{\partial t} = \frac{(S_0 + \Delta S)}{\tau_p} \left(\frac{g(N_{th}) + \Gamma a \cdot \Delta N}{\alpha_t} - 1 \right) = v \Gamma a \cdot S_0 \Delta N + \underbrace{v \Gamma a \cdot \Delta S \cdot \Delta N}_{\text{despreciable}}$$

$$\frac{\partial \Delta S}{\partial t} = v \Gamma a \cdot S_0 \Delta N \quad (2)$$

Derivant (1) i substituint en (2)

$$\frac{\partial^2 \Delta N}{\partial t^2} + \frac{\partial \Delta N}{\partial t} \underbrace{\left(\frac{1}{\tau_r} + \mathbf{v} \cdot \Gamma \mathbf{a} \cdot S_0 \right)}_{2\alpha} + \underbrace{\frac{\mathbf{v} \Gamma \mathbf{a} \cdot S_0}{\tau_p}}_{\omega_0^2} \Delta N = \frac{1}{\mathbf{q} \cdot \mathbf{d}} \frac{\partial \Delta J}{\partial t}$$

α : constant de decaïment del làser $\rightarrow \sim 10^9$

ω_0 : freqüència de ressonància de relaxació del làser $\rightarrow \sim 10^{12}$

Resolució de l'equació. Equació homogènia.

$$\frac{\partial^2 \Delta N}{\partial t^2} + 2\alpha \frac{\partial \Delta N}{\partial t} + \omega_0^2 \Delta N = 0 \quad \Rightarrow \quad \Delta J = ct$$

$\alpha \ll \omega_0$

$$\Delta N|_H = D e^{-\alpha t} \sin(\Omega t) + C e^{-\alpha t} \cos(\Omega t) \quad \text{Forma de la solució}$$

$$\Omega \equiv \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} \approx \omega_0$$

$$t = 0 \rightarrow \begin{matrix} N = N_{th} & \rightarrow & \Delta N = 0 & \rightarrow & C = 0 \\ S = 0 & & \rightarrow & \Delta S = -S_0 \end{matrix} \quad \text{Condicions inicials}$$

$$\Delta N|_H = D e^{-\alpha t} \sin(\Omega t)$$

$$(2) \quad \frac{\partial \Delta S}{\partial t} = \mathbf{v} \Gamma \mathbf{a} \cdot S_0 \Delta N \rightarrow \Delta S|_H \approx -\frac{\mathbf{v} \Gamma \mathbf{a}}{\Omega} S_0 D e^{-\alpha t} \cos(\Omega t)$$

$\Downarrow \quad D = \frac{\Omega}{\mathbf{v} \Gamma \mathbf{a}}$



Solució de l'equació homogènia

$$\Delta S|_H = -S_0 e^{-\alpha t} \cos(\Omega t)$$

$$\Delta N|_H = \frac{\Omega}{\mathbf{v} \Gamma \mathbf{a}} e^{-\alpha t} \sin(\Omega t)$$

Oscil·lacions esmorteïdes desfasades $\pi/2$

Equació particular.

$$J(t) \equiv J_0 [1 + m_J e^{j\omega t}] \equiv J_0 + \Delta J(t)$$

$$\frac{\partial J}{\partial t} = j\omega m_J J_0 e^{j\omega t} \rightarrow \frac{\partial^2 \Delta N}{\partial t^2} + 2\alpha \frac{\partial \Delta N}{\partial t} + \omega_0^2 \Delta N = \frac{j\omega m_J J_0}{qd} e^{j\omega t}$$

$$\Delta N|_p = A e^{j\omega t} \equiv m_N N_{th} e^{j\omega t} \quad \text{Forma de la solució}$$

$$[-\omega^2 + 2j\alpha\omega + \omega_0^2] m_N N_{th} = j \frac{\omega m_J J_0}{qd}$$

$$m_N = j \frac{\omega m_J J_0}{qd \cdot N_{th}} \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2) + 2j\alpha\omega}$$

Índex de modulació de portadors

$$N = N_{th} + \Delta N|_H + \Delta N|_P \approx N_{th} + \Delta N|_P$$

$$\frac{\partial \Delta S}{\partial t} = v\Gamma a \cdot S_0 \Delta N \quad (2)$$

$$\Delta S|_p = -\frac{v\Gamma a \cdot m_J J_0}{\omega_0^2 \cdot qd} S_0 \frac{1}{1 - (\omega/\omega_0)^2 + j \frac{2\alpha\omega}{\omega_0^2}} e^{j\omega t}$$

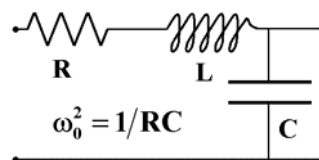
$$\Delta S|_p = \Delta S(0) M(\omega) e^{j\omega t} = \frac{\tau_p}{qd} \Delta J \cdot M(\omega)$$

$$\Delta S(0) = \frac{\tau_p}{qd} m_J J_0$$

$$S = S_0 + \Delta S|_H + \Delta S|_P \approx S_0 + \Delta S|_P$$

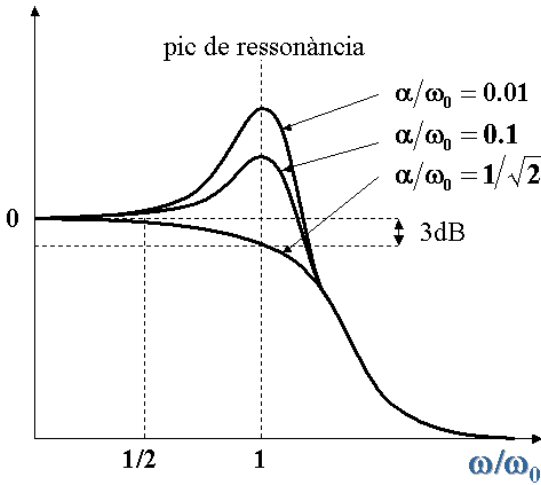
Filtre passa-baixes de 2n. Ordre

$$M(\omega) \equiv \frac{1}{1 - (\omega/\omega_0)^2 + j \frac{2\alpha\omega}{\omega_0^2}}$$



Funció de Transferència del Làser

20log |M(ω)|



Ample de Banda

$$BW|_{NO_RES} = \omega_0$$

$$BW|_{RES} \approx \omega_0/2$$

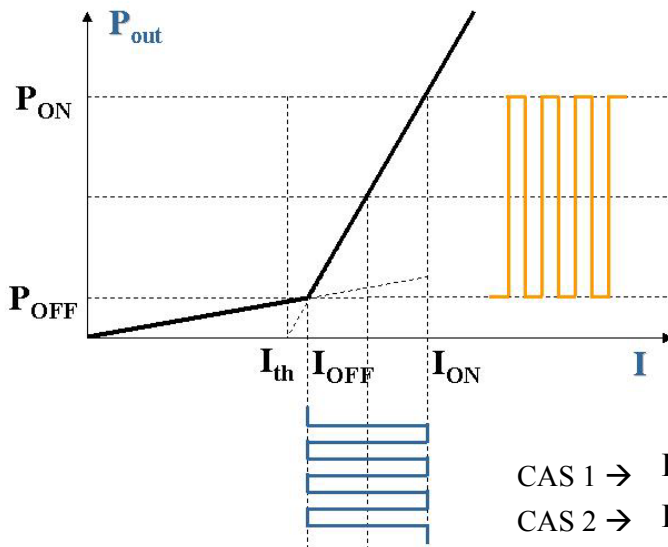


$$|M(\omega)|^2 \equiv \frac{1}{\left(1 - (\omega/\omega_0)^2\right)^2 + \left(\frac{2\alpha\omega}{\omega_0^2}\right)^2}$$

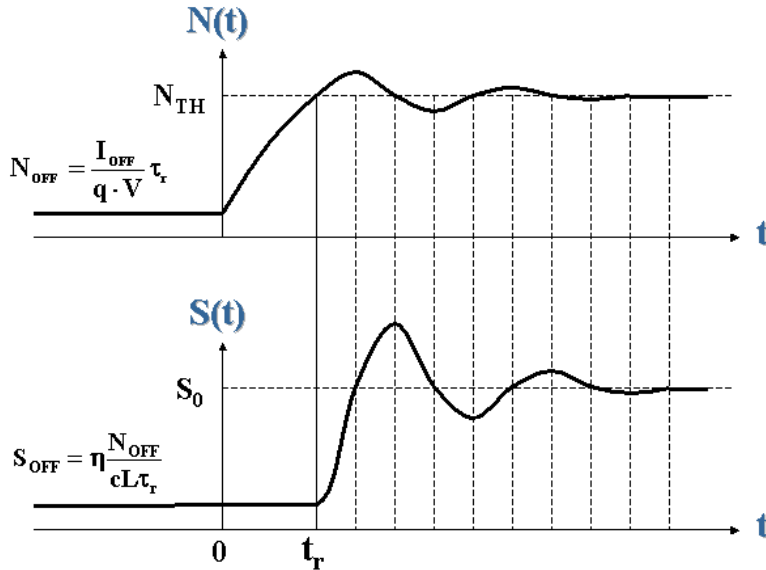
$$\omega_0 \equiv \sqrt{\frac{c\Gamma a \cdot S_0}{\tau_p}}$$

COMPROMÍS $\Rightarrow S_0 \uparrow \rightarrow BW \uparrow$
 $P_{OUT} \downarrow$

Modulació Digital



$$I_{OFF} < I_{TH} < I_{ON}$$



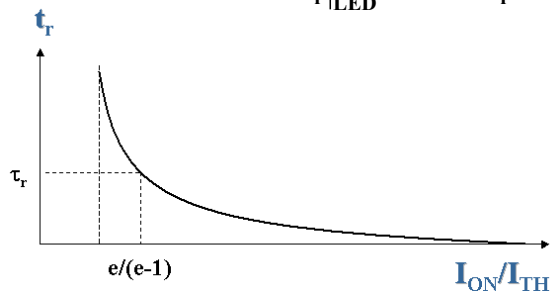
Només emissió espontània (LED)

$$N(t) = -\frac{\tau_r}{q \cdot V} [I_{ON} - I_{OFF}] e^{-t/\tau_r} + \frac{I_{ON} \tau_r}{q \cdot V} \quad 0 \leq t \leq t_r$$

$$t_r = \tau_r \ln \frac{I_{ON} - I_{OFF}}{I_{ON} - I_{TH}} \quad I_{OFF} = 0 \rightarrow \quad t_r = \tau_r \ln \frac{I_{ON}/I_{TH}}{I_{ON}/I_{TH} - 1}$$

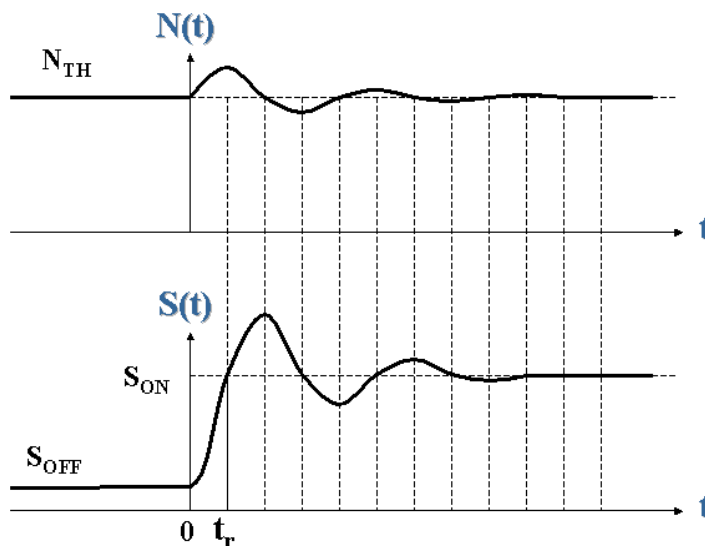
$$N_0 = \frac{J_0}{qd} \tau_r = \frac{J_0}{qV} \tau_r$$

$$t_r|_{LED} = 2.19\tau_r$$



En aquest cas no tenim un t_r fixat com en el LED

$$I_{TH} < I_{OFF} < I_{ON}$$



Sempre emissió estimulada (LÀSER)

$$N(t) \approx N_{TH} - \frac{I_{ON} - I_{OFF}}{q \cdot V} t \quad 0 \leq t \leq t_r$$

$$S(t) \approx S_{OFF} \exp\left[\frac{c\Gamma a}{2qV} (I_{ON} - I_{OFF}) t^2\right]$$

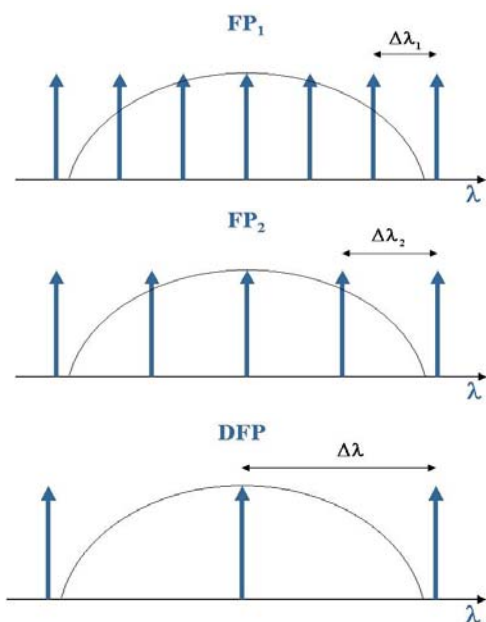
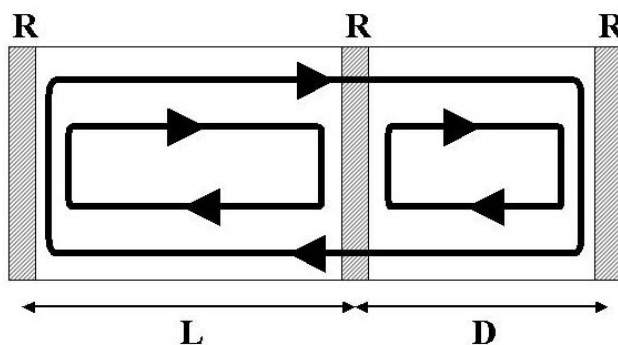
$$t_r \approx \left[\frac{2qV \ln\left(\frac{I_{ON} - I_{TH}}{I_{OFF} - I_{TH}}\right)}{c\Gamma a (I_{ON} - I_{TH})} \right]^{1/2} \quad \leftarrow \text{No depèn de } \tau_r$$

Aquest cas dona molt millors prestacions però té un consum molt elevat. El cas anterior és just el contrari.

ESTRUCTURES LÀSER AVANÇADES

Cavitats Acoblades

CAVITATS FABRY-PEROT ACOBLADES



$$\Delta\lambda_1 = \frac{\lambda^2}{2Ln_1}$$

$$\Delta\lambda_2 = \frac{\lambda^2}{2Dn_2}$$



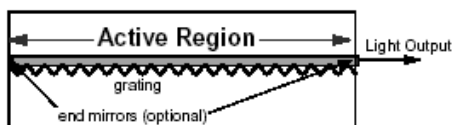
$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2|Dn_2 - Ln_1|} = \frac{\lambda^2}{2n|D - L|}$$

$$n_2 = n_1 = n$$

$\partial\lambda \approx 30\text{MHz}$

tunning $\sim 10\text{ nm}$

Distributed Feed-Back (DFB)

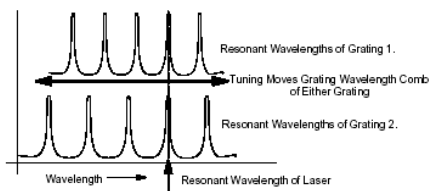
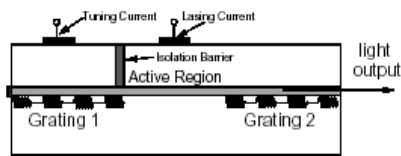


suma constructiva

$$\Delta L = m \frac{\lambda}{2n}$$

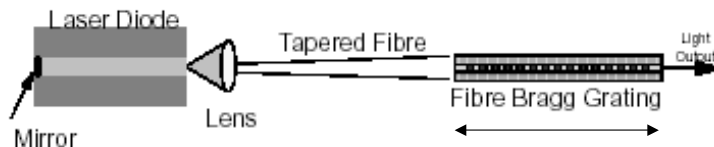
$$\partial \lambda \approx 10 \text{MHz}$$

Distributed Bragg Reflection (DBR)



$\partial \lambda \approx 30 \text{MHz}$ **tunning ~ 30 nm**

Làzers de Cavitat Externa



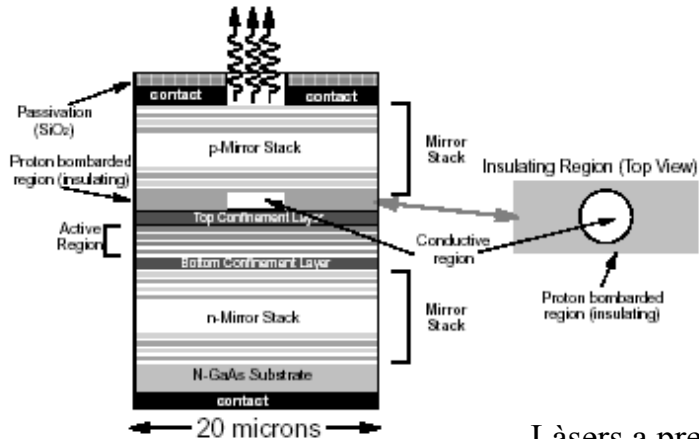
$\partial \lambda \approx 50 \text{KHz}$
tunning ~10 nm

Làzers de Fibra (no semi-conductors)



Potència ~10 W

Vertical Surface Emitting Lasers (VCSELs) *



Làsers a preu de LEDs
multimode a 1^a i 2^a
finestra