Las comunicaciones ópticas por fibra en el presenta.

Ventajas de la fibra óptica:

* BW $\simeq 10^2$ GHz.Km
* $\alpha \simeq 0.1 \rightarrow 0,2$ dB/Km (3ª ventana, 1.55 μm)

Técnicas de modulación:

* IM–DD
* Coherentes $\Rightarrow$ FSK, DPSK (heterodinación)

$\longrightarrow$ aplicación a sistemas WDM.

Principales aplicaciones:

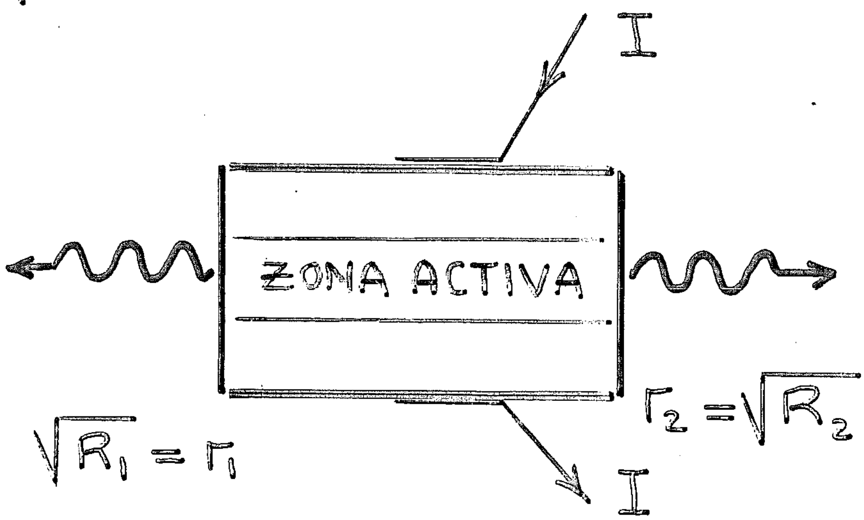
* Enlaces de gran capacidad y a larga distancia.
* Redes de distribución a abonados.

DIODO LASER

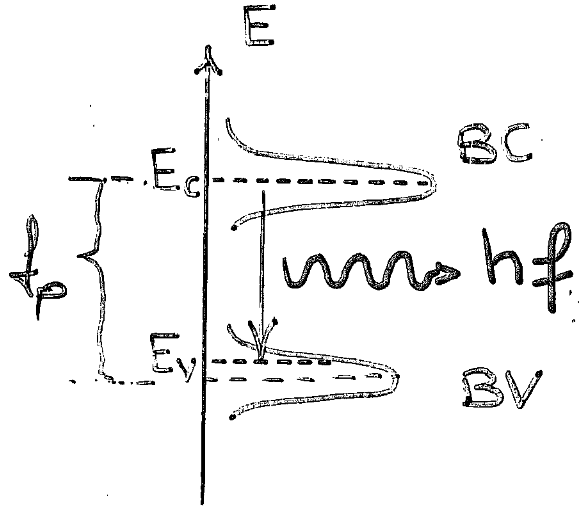
* LIGHT AMPLIFICATION BY STIMULATED EMISSION OF RADIATION

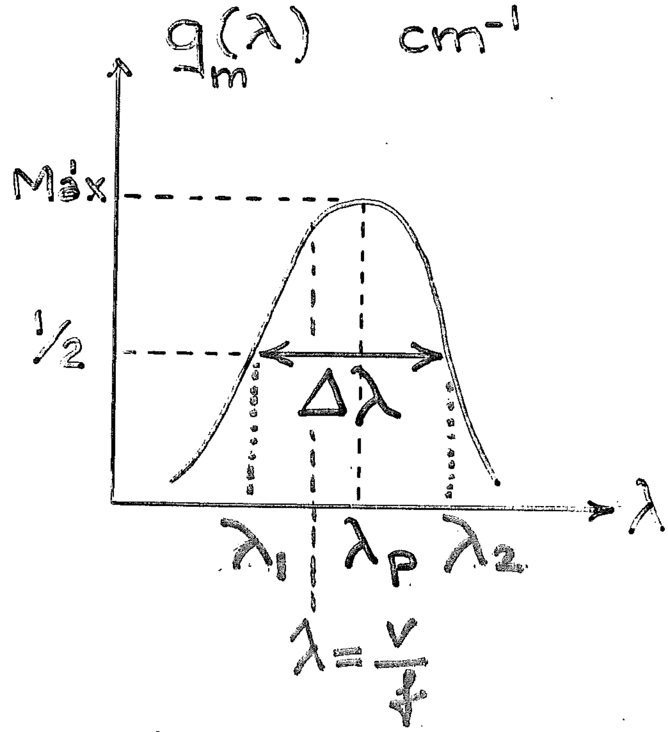
* Dos Mecanismos fundamentales:
  1. Medio con ganancia (en Z.A.)
  2. Realimentación (con reflec.)

* Esquema:

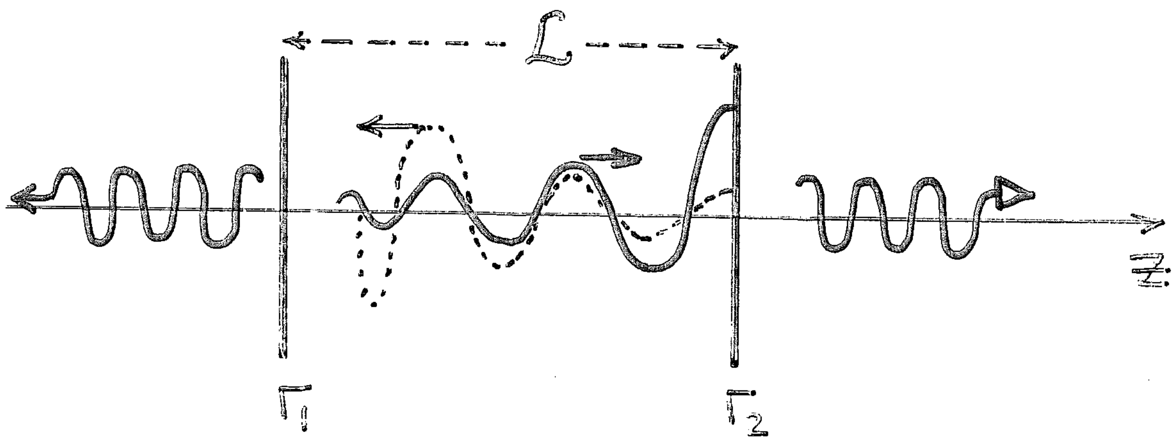


Mecanismo de ganancia

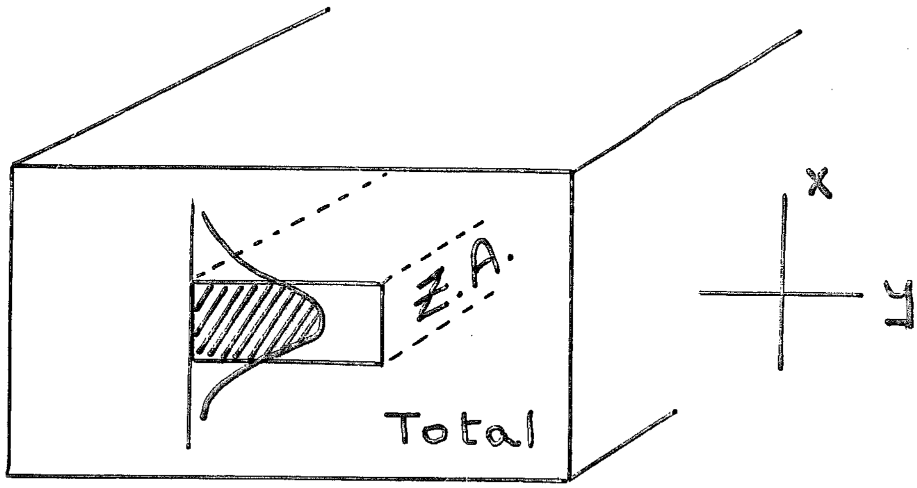




Mecanismo de realimentación



FACTOR DE CONFINAMIENTO



$$\Gamma \equiv \frac{\int_{ZA} |E(x,y)|^2 dx\,dy}{\int_T |E(x,y)|^2 dx\,dy}$$

$$\Gamma = \Gamma(\lambda)$$

Ganancia neta máxima (m^{-1}):

$$g = \Gamma \cdot g_m - \alpha_s$$

con: α_s = pérdidas de scattering

$g_m = a(N - N_t) \qquad (\lambda = \lambda_p)$

PRINCIPIO FISICO

* Bombeo ⇒ Inversión de población

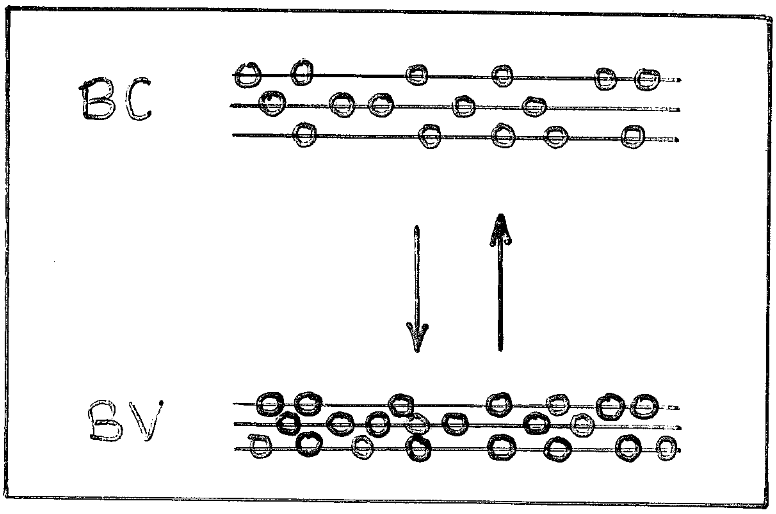
* Emisión estimulada (~ Energía , N)

* Emisión espontánea (~ N)

* Absorción :

  1) Estimulada (~ Energía , N_t)

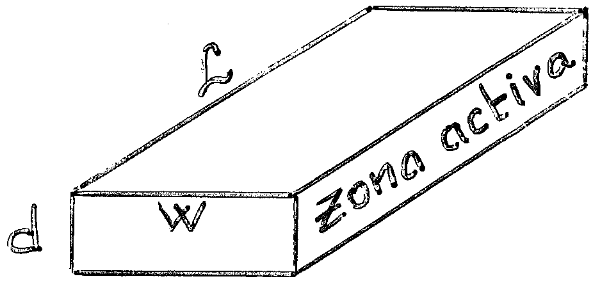
  2) Pérdidas (~ α_s)



● = ELECTRON

● = HUECO

Modos longitudinales



W, d muy pequeñas
(Sólo modos longitud.)

* Separación en frecuencia :

$$\delta f = \frac{v}{2L} \quad \begin{cases} v = c/n = \text{vel. de la luz} \\ 2L = \lambda_{máx} \text{ en el medio} \end{cases}$$

* Frecuencias modales :

$$f_m = m\frac{v}{2L} \Rightarrow \lambda_m = \frac{2L}{m} \text{ (dentro)}$$

* Separación en long. de onda :

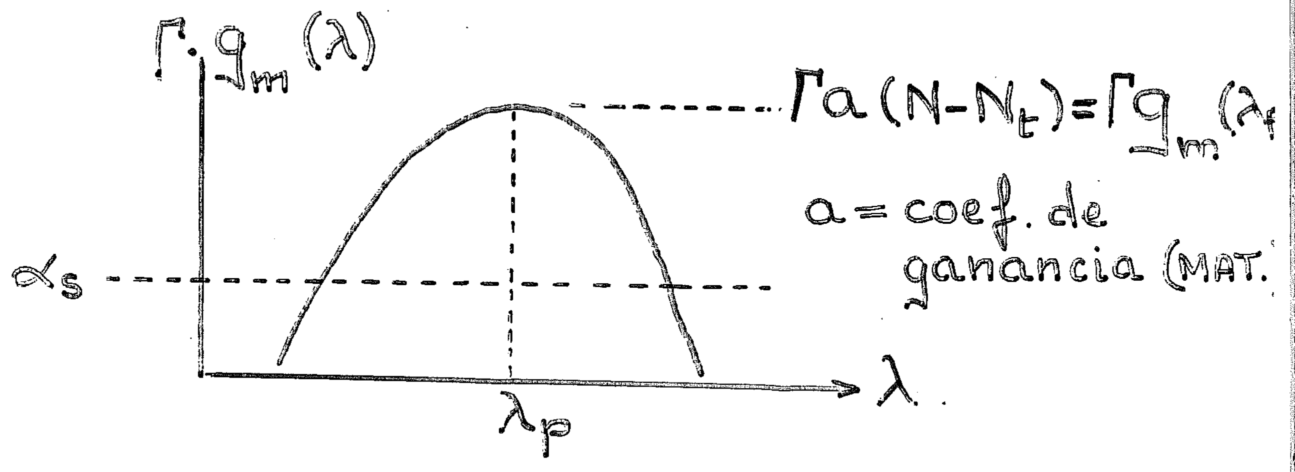
$$\boxed{\delta\lambda \approx \frac{\lambda_p^2}{2L}} \approx \text{cte} \quad \text{(dentro)}$$

Expresión general de $g(\lambda)$

$$g(\lambda) = \Gamma g_m(\lambda) - \alpha_s$$

* $g_m(\lambda)$ varía en la forma

$$g_m(\lambda) = a(N - N_t) - \gamma(\lambda - \lambda_p)^2$$



* La expresión completa de $g(\lambda)$ será

$$g(\lambda) = \Gamma g_m(\lambda_p) - \Gamma\gamma(\lambda - \lambda_p)^2 - \alpha_s$$

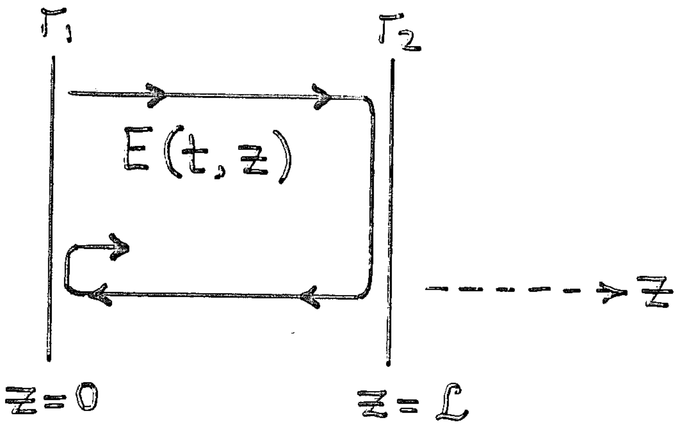
(en unidades de long.^{-1})

* Recordar que deberá cumplirse

$$\lambda = \lambda_m = \frac{2L}{m} \quad \text{(resonancias)}$$

LA CAVIDAD OPTICA (RESONANTE)

- Condición de oscilación -



$E(t,z)$

E_0 en $\begin{cases} t=0 \\ z=0 \end{cases}$

¿Cuánto vale $E(t,0^+)$ al dar una vuelta?

* $$E(t,0^+) = \underbrace{\Gamma_1\Gamma_2}_{\text{Reflexión}} E_0 \underbrace{e^{\frac{g}{2}2\mathcal{L}}}_{\text{Ganancia neta}} \cdot \underbrace{e^{-j2\beta\mathcal{L}}}_{\text{fase}} \cdot \underbrace{e^{j\omega t}}_{\text{frec. instant.}}$$

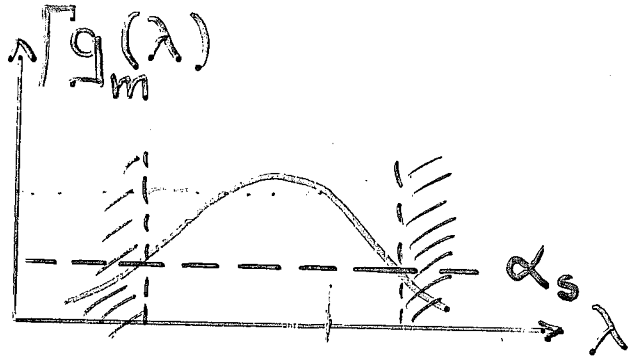
* Amplitud compleja:

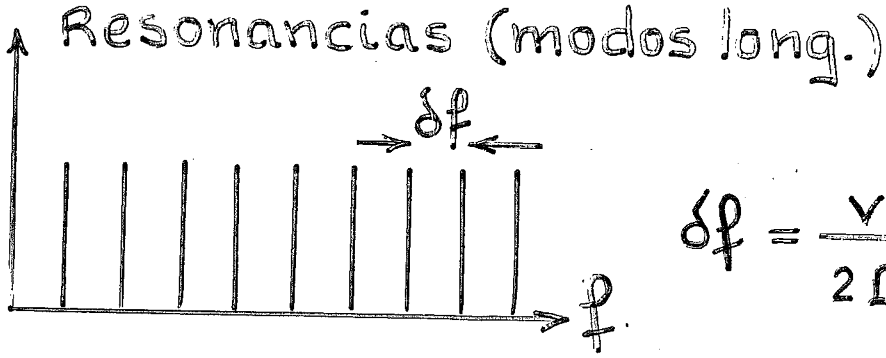
$$E^* \equiv \underbrace{E_0\sqrt{R_1R_2}\, e^{g\mathcal{L}}}_{\text{Módulo}} \cdot \underbrace{e^{-j2\beta\mathcal{L}}}_{\text{fase}}$$

* Condición de oscilación $(t\to\infty)$:

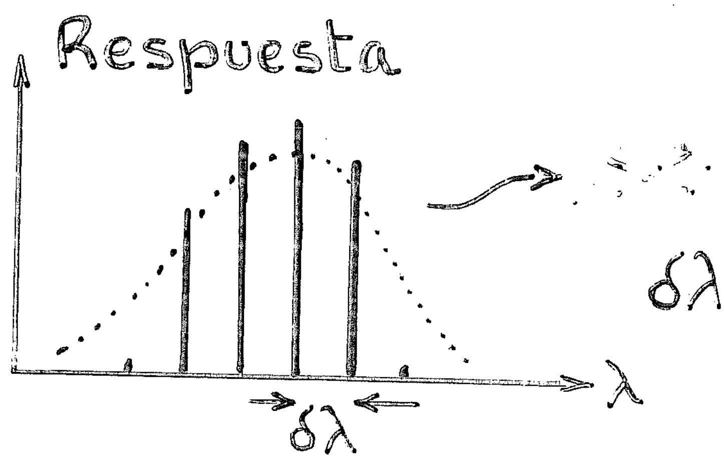
$$E^* = E_0 \Rightarrow \begin{cases} \sqrt{R_1R_2}\, e^{g\mathcal{L}} = 1 \\ e^{-j2\beta\mathcal{L}} = 1 \end{cases}$$

Efecto combinado





$$\delta f = \frac{v}{2L}$$



dentro

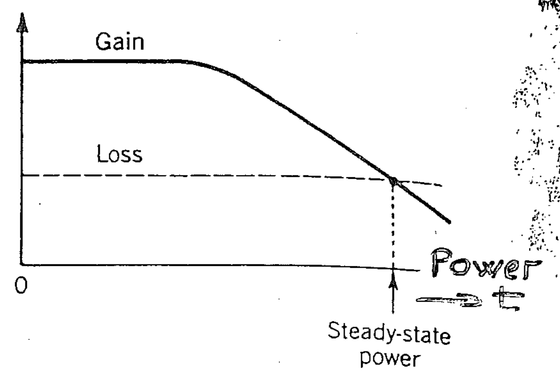
$$\delta\lambda \approx \frac{\lambda_p^2}{2L}$$

* ganancia ⇒ emisión estimulada

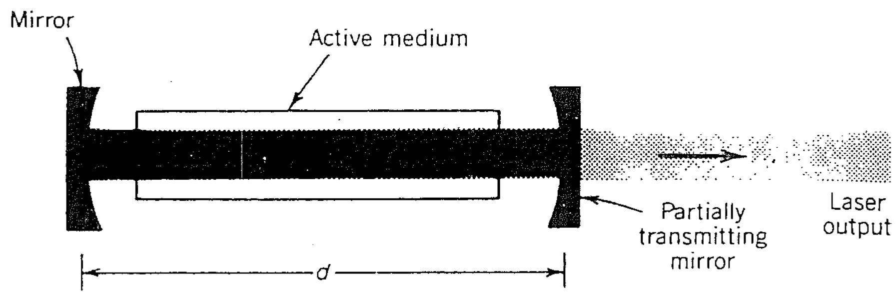
* realimentación ⇒ modos resonantes

Gain saturation

$$g_m(P) = \frac{g_m^0}{1 + P/P_{sat}}$$



If the initial amplifier gain is greater than the loss, oscillation may initiate. The amplifier then saturates whereupon its gain decreases. A steady-state condition is reached when the gain just equals the loss.

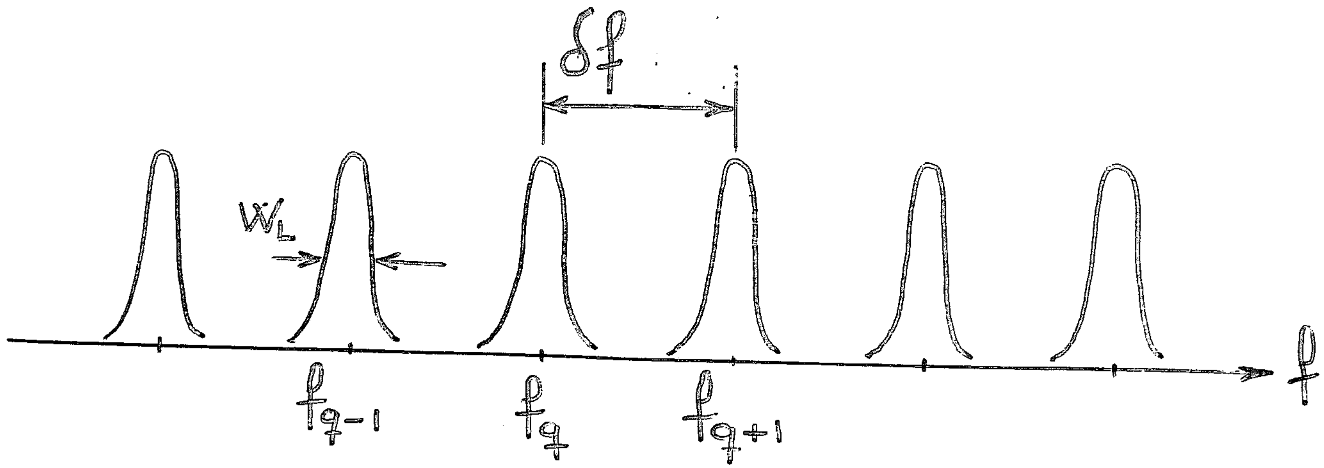


A laser consists of an optical amplifier (employing an active medium) placed within an optical resonator. The output is extracted through a partially transmitting mirror.

Separación modal y anchura de línea

* Separación entre modos consecutivos $\delta f = \dfrac{v}{2\mathcal{L}}$.

* Anchura de línea $W_L = \dfrac{\delta f}{F}$



* Nota : si $F \gg 1$, entonces $F \approx \pi/\alpha_t \mathcal{L}$,

con lo cual

$$W_L \approx \frac{v/2\mathcal{L}}{\pi/\alpha_t \mathcal{L}} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\tau_{ph}} \quad (\mathrm{Hz})$$

Concepto de nº de fotones / volumen

* Dens. volumétrica de energía electromagnética almacenada en una cavidad :

$$\frac{dW}{d\mathcal{V}} = \frac{\epsilon}{2}|E|^2 = \frac{\epsilon}{2}|E\eta H| = \frac{1}{2}\sqrt{\mu\epsilon}\,|EH|$$

$$\frac{dW}{d\mathcal{V}} = \frac{\mathcal{P}_{og}}{v} \qquad \text{con} \begin{cases} \mathcal{V} = w\ell d \\ v = (\mu\epsilon)^{-1/2} \end{cases}$$

* Definimos

$$S = \frac{1}{hf}\frac{dW}{d\mathcal{V}} \Rightarrow S = \frac{\mathcal{P}}{hfvWd},$$

que es el nº de fot/Vol

Las ecuaciones de ritmo (laser)

Carga: $$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{I(t)}{qV} - \frac{N(t)}{\tau_{sp}} - v\Gamma \sum_{k} g_m(\lambda_k) \cdot S_k(t)$$

Energía: $$\frac{dS_k(t)}{dt} = v\left\{\Gamma g_m(\lambda_k) - \alpha_t\right\} S_k(t) + \beta \frac{N(t)}{\tau_{sp}}$$

Siendo:

* $$g_m(\lambda_k) = a(N - N_t) - \gamma(\lambda_k - \lambda_p)^2$$
* S_k = dens. vol. de fotones en el modo nº k
* β = factor de emis. esp. acoplada al modo
* $N(t)$ = dens. vol. de electrones en B.C.
* α_t = pérdidas totales en la cavidad

Nota: sólo se contempla d/dt (aproximación adiabát.) $d/dz \equiv 0$

Son no lineales y acopladas!

LAS ECUACIONES DE RITMO

(para un sólo modo dominante)

ECUACION DE PORTADORES:

$$\frac{dN}{dt} = R - \frac{N}{\tau_{sp}} - v\Gamma g_m(\lambda)\cdot S(\lambda) \quad ,$$

* Bombeo $= R = I/qV = N^{o}/\tau_{sp}$ $\quad (s^{-1}\cdot m^{-3})$
* N^{o} = dens. portadores en pequeña señal (m^{-3})
* $V = WLd$ $\quad (m^{-3})$; v = veloc. en Z.A. $(m\cdot s^{-1})$
* $S(\lambda)$ = Dens. volumét. de fotones (m^{-3}) en el modo λ

ECUACION DE LA DENSIDAD DE FOTONES:

$$\frac{dS(\lambda)}{dt} = v\left\{\Gamma g_m(\lambda) - \alpha_t\right\} S(\lambda) + \beta\frac{N}{\tau_{sp}}$$

* β = factor de emisión espontánea acoplada
* $\alpha_t = \alpha_s + \frac{1}{2L}\ln\frac{1}{R_1R_2}$ = pérdidas totales (m^{-1})
* τ_{sp} = tiempo de vida del portador (s)
* Γ = factor de confinamiento

¡Son no-lineales y acopladas!

MODO FUNDAMENTAL (REGIMEN ESTACIONARIO)

1ª Ecuación de Ritmo

$$\frac{J}{qd} = \left(1/\tau_{sp} + \overbrace{v\Gamma a S}^{A}\right) N - \overbrace{v\Gamma a S}^{A} N_t$$

BOMBEO = VACIAM. $\left\{\begin{array}{l}\text{ESPONTANEA}\\ \text{ESTIMULADA}\end{array}\right\}$ − LLENADO

2ª Ecuación de Ritmo

$$\beta \frac{N}{\tau_{sp}} + v\Gamma a N S = v\Gamma a N_t S + v\alpha_t S$$

EM. ESP. + EM. EST. = ABS. EST. + "PERDIDAS"

ECUACIONES DE RITMO EN REGIMEN ESTACIONARIO

HIPOTESIS : $\frac{\partial}{\partial t} = 0$; $\beta \approx 0$; Un modo dominante

2ª) $0 = v\{\Gamma g_m - \alpha_t\} S \Rightarrow \boxed{\Gamma g_m(\lambda) = \alpha_t} \Rightarrow$

$\Rightarrow N = N_t + \frac{\alpha_t}{\Gamma a} \equiv N_{Th}$ = nivel umbral de portadores

Concepto de corriente umbral :

$$I_{th} = \frac{qV}{\tau_{sp}} N_{th} \Rightarrow J_{th} = \frac{qd}{\tau_{sp}} \cdot N_{th} = f(\mathcal{L}^{-1}) \ !$$

" Es la corriente a partir de la cual se produce oscilación laser "

$$\boxed{I_{Th} = \frac{qWd}{\tau_{sp}} \left\{ \left(N_t + \frac{\alpha_s}{\Gamma a}\right) \mathcal{L} + \frac{1}{2\Gamma a} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \right\}}$$

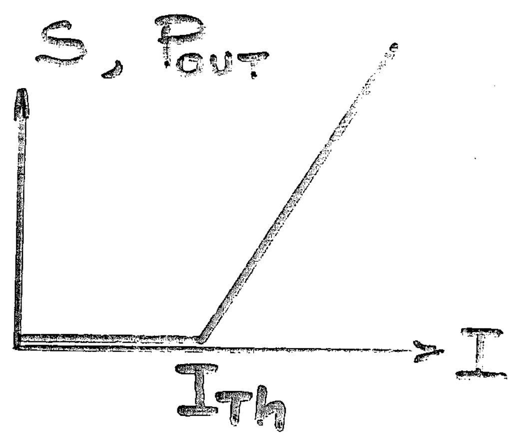
1ª Ecuación (régimen estacionario) :

$$\frac{I}{qV} = \frac{\overset{\dashrightarrow N_{Th}}{N}}{\tau_{sp}} + v\Gamma g_m(\lambda) \cdot S(\lambda) \quad , \quad \text{con} \quad R = \frac{I}{qV} = \frac{N^o}{\tau_{sp}}$$

$$\hookrightarrow S = \frac{R - N/\tau_{sp}}{v\Gamma g_m} \Rightarrow \underset{(\Gamma g_m = \alpha_t)}{(\text{de la } 2^a)} \Rightarrow \boxed{S = (N^o - N_{Th}) \frac{\tau_{ph}}{\tau_{sp}}}$$

* CONCLUSION : $\text{fotones/Vol} = (\text{exceso } \bar{e}/\text{Vol}) \cdot \left(\frac{\tau_{ph}}{\tau_{sp}}\right)$
* por lo tanto, $\text{Eficiencia} \equiv \tau_{ph}/\tau_{sp}$ (ideal)
* De otra forma

$(I > I_{Th})$ $\quad \boxed{S = (I - I_{Th}) \frac{\tau_{ph}}{qV}}$ $\dashrightarrow$



$$P_{OUT} \sim S, f(R_1, R_2) \sim (I - I_{Th})$$

POTENCIA DE SALIDA

Hemos visto que, para $\beta \approx 0$,

$$S = \frac{\tau_{ph}}{qV}(I - I_{Th}) \quad , \quad \tau_{ph} = \frac{1}{v\alpha_t}$$

Por otra parte,

$$P = hf\, v\, W d\, S$$

Resulta

$$P = \frac{hf}{q\mathcal{L}\alpha_t}(I - I_{Th}) \quad \neq P_{OUT} \; !$$

Teniendo en cuenta las Ec. de Ritmo,

$$P_{OUT} = \frac{1}{2}\frac{1-R}{\sqrt{R}}P$$

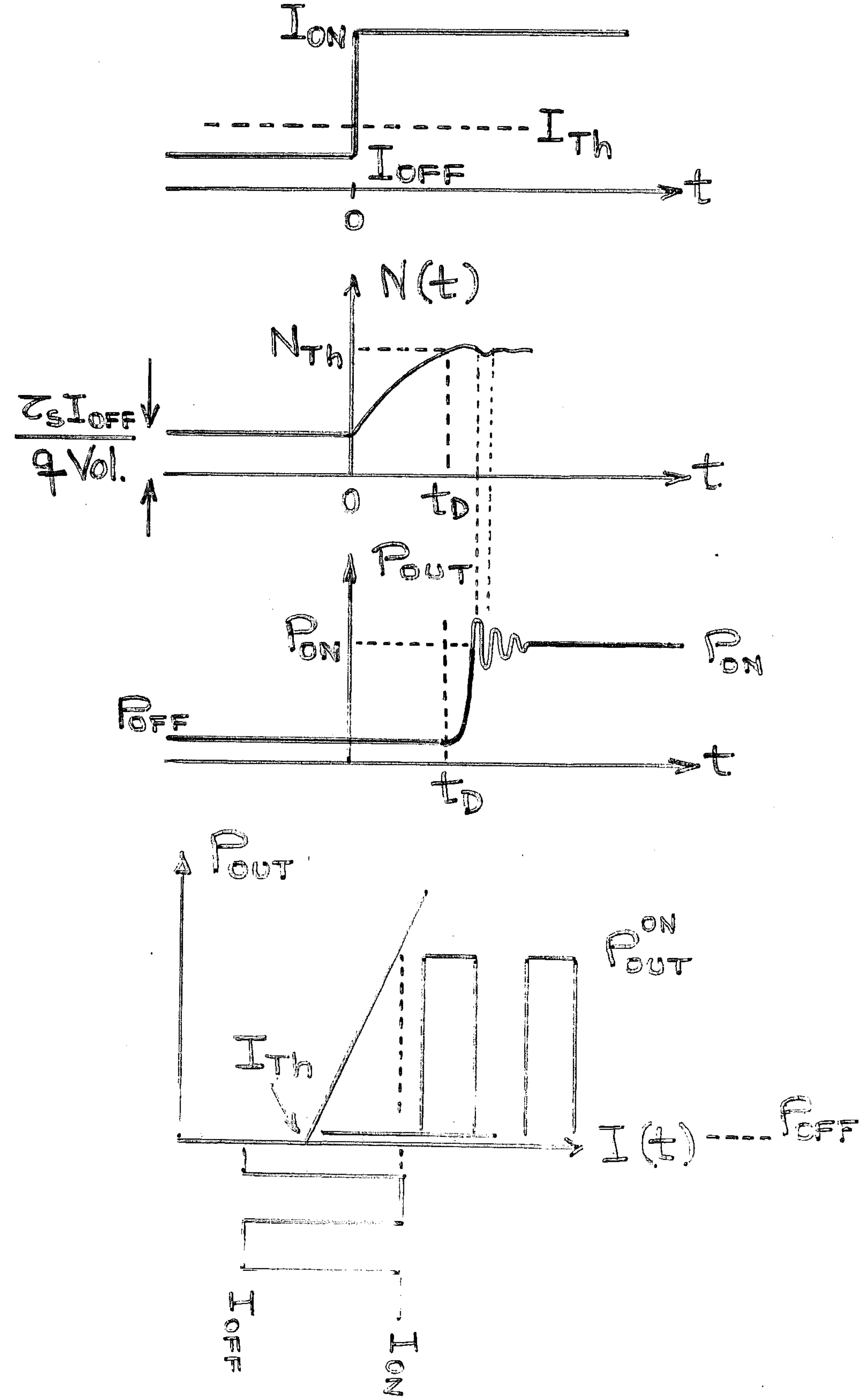
Con lo cual,

$$\boxed{P_{OUT} = \frac{1}{2}\frac{1-R}{\sqrt{R}}\frac{hf}{q}\frac{I - I_{Th}}{\alpha_s\mathcal{L} + \ln(1/R)}}$$

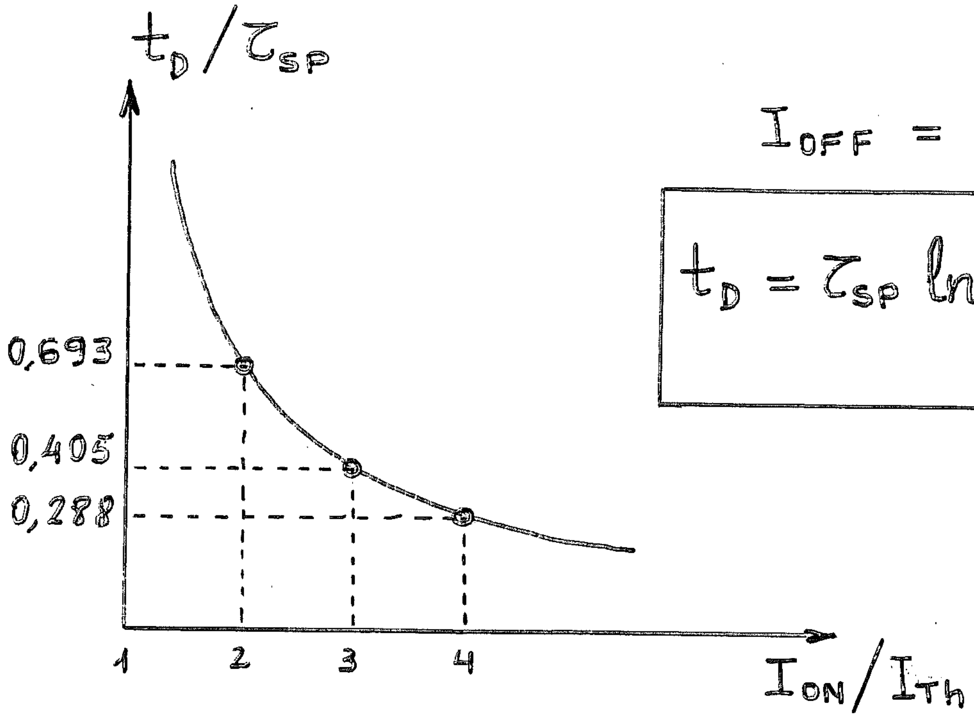
CONCLUSION : $\quad$ Si $\mathcal{L}\downarrow \Rightarrow \begin{cases} I_{Th}\downarrow & (J_{MAX}!) \\ P_{OUT}\uparrow \end{cases}$

MODULACION DIGITAL DEL LASER

1er Caso $I_{OFF} < I_{Th} < I_{ON}$



Tiempo de retardo de un diodo laser

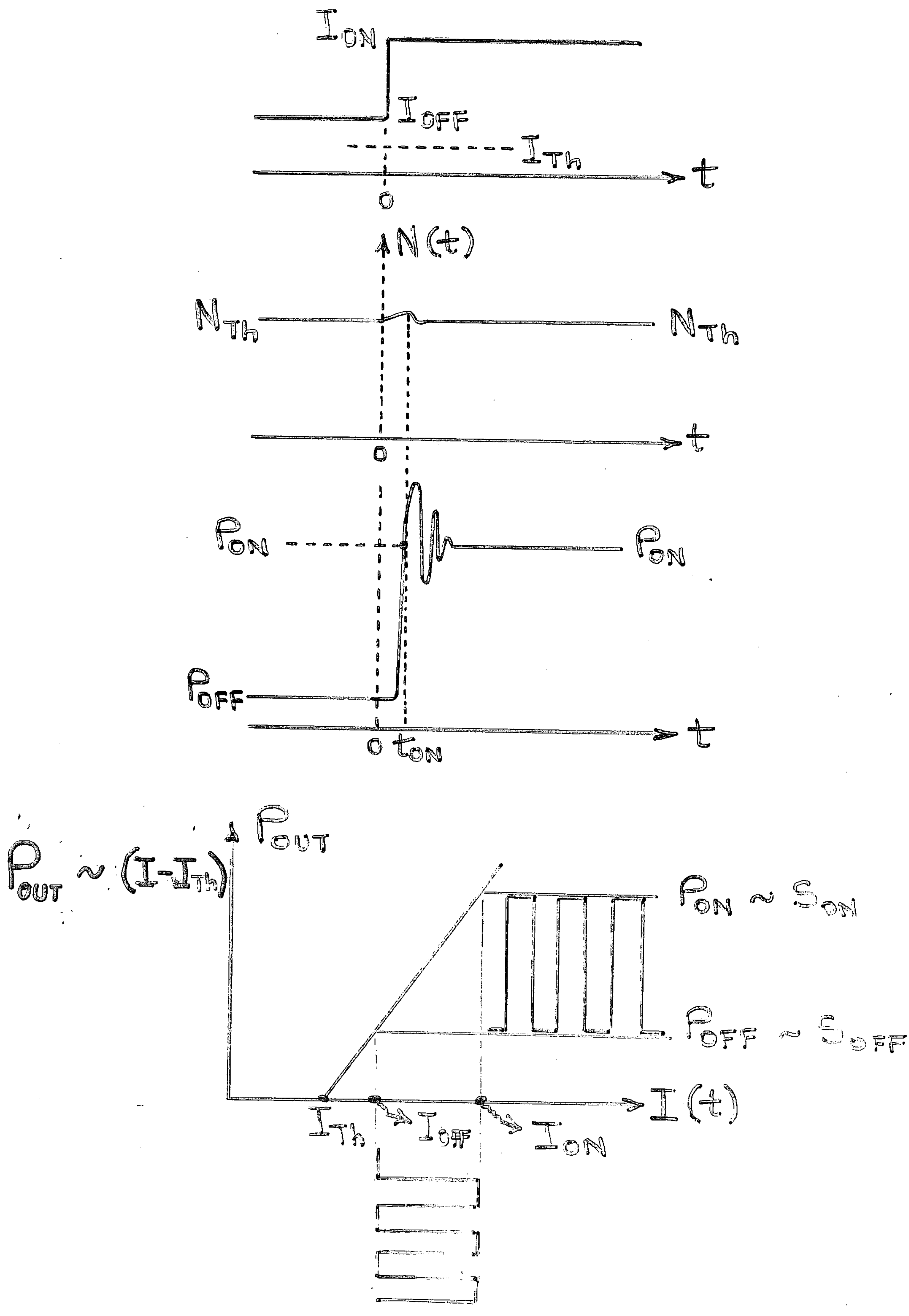


$I_{OFF} = 0 \Rightarrow$

$$\boxed{t_D = \tau_{SP} \ln \frac{I_{ON}/I_{Th}}{(I_{ON}/I_{Th}) - 1}}$$

CONCLUSION
$$\begin{cases} I_{ON} \uparrow \Rightarrow t_D \downarrow \\ I_{Th} \uparrow \Rightarrow t_D \uparrow \end{cases}$$

2º Caso $\quad I_{Th} < I_{OFF} < I_{ON}$



1^er Caso : $I_{OFF} < I_{Th}$

$$N(t) = -\frac{\tau_{SP}}{qV}(I_{ON} - I_{OFF})\, e^{-\frac{t}{\tau_{SP}}} + \frac{I_{ON}\tau_{SP}}{qV} \quad ; \quad 0 \leq t \leq t_D$$

$$\boxed{t_D = \tau_{SP} \ln \frac{I_{ON} - I_{OFF}}{I_{ON} - I_{Th}}}$$

2º Caso : $I_{Th} < I_{OFF}$ Si $0 \leq t \leq t_{ON}$

$$N(t) \simeq N_{Th} + \frac{I_{ON} - I_{OFF}}{qV}\, t$$

$$S(t) \simeq S_{OFF} \cdot \exp\left\{\frac{v\Gamma A}{2qV}(I_{ON} - I_{OFF})\, t^2\right\}$$

$$\boxed{t_{ON}^2 \simeq \frac{2qV}{v\Gamma A} \frac{\ln (P_{ON}/P_{OFF})}{I_{ON} - I_{OFF}}}$$

$$P(t) \simeq P_{OFF}\, e^{cte\,(I_{ON} - I_{OFF})\, t^2}$$

$$0 \leq t \leq t_{ON}$$