

## 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 (3<sup>a</sup> ventana,  $1.55 \mu\text{m}$ )

Técnicas de modulación:

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

 aplicación a sistemas WDM.

Principales aplicaciones:

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

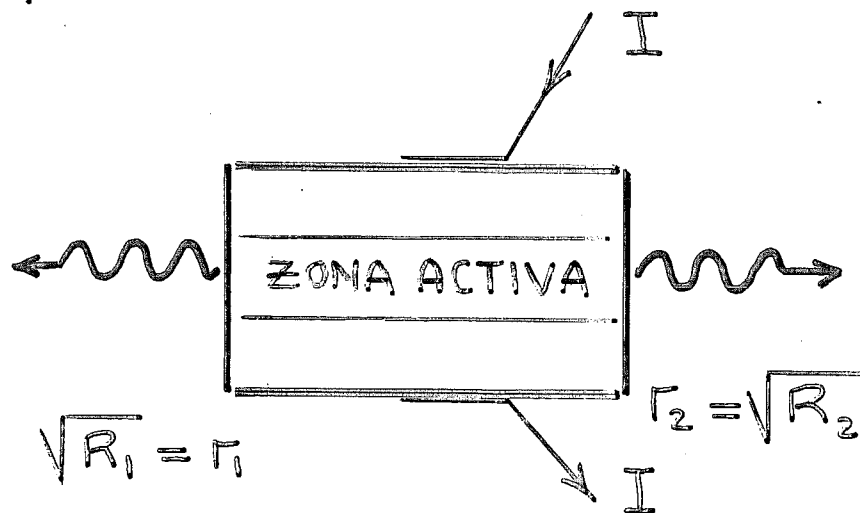
# DIODO LASER

\* LIGHT AMPLIFICATION BY  
STIMLATED EMISSION OF RADIATION

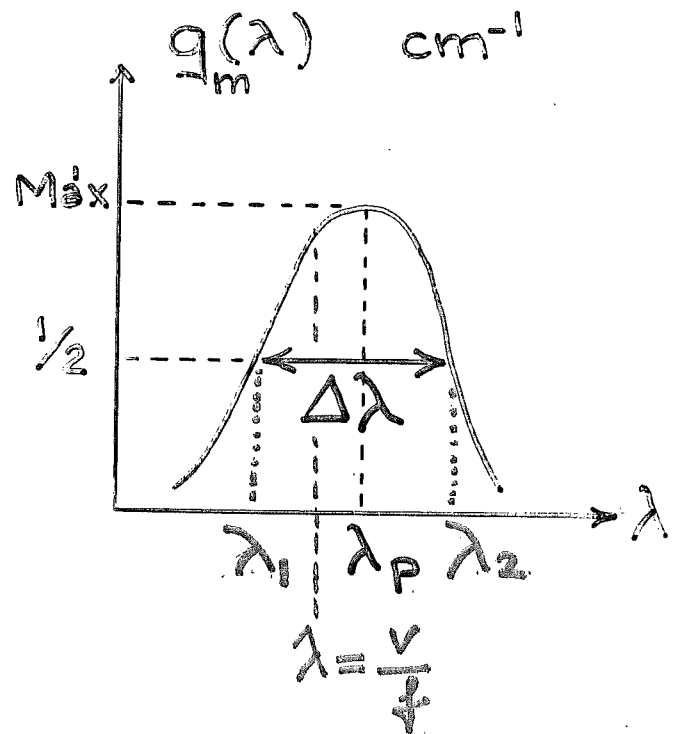
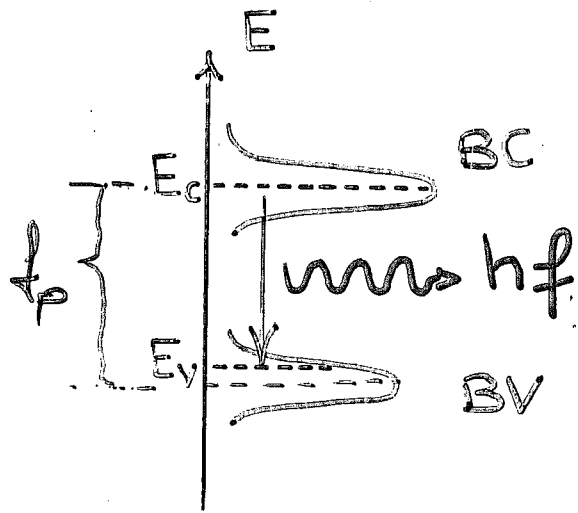
\* Dos Mecanismos fundamentales:

1. Medio con ganancia (en Z.A.)
2. Realimentación (con reflex.)

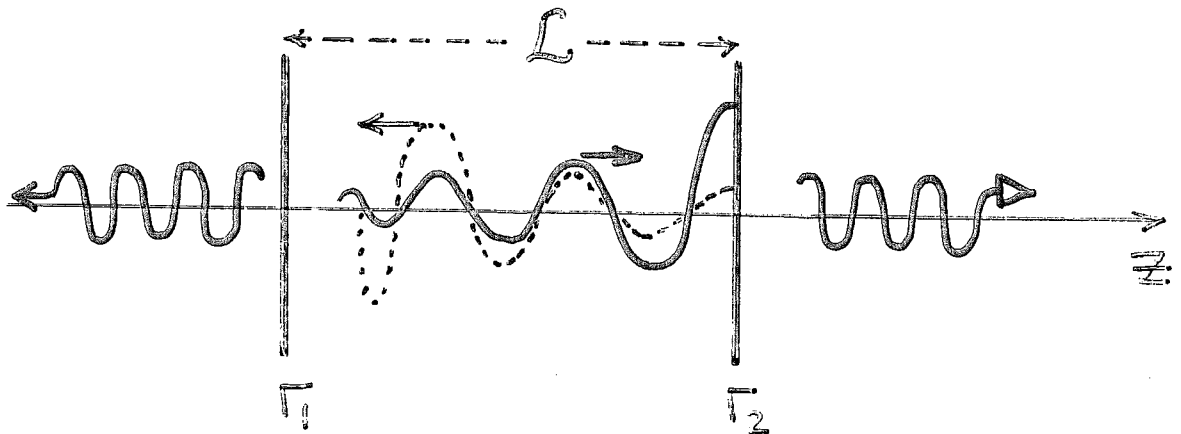
\* Esquema:



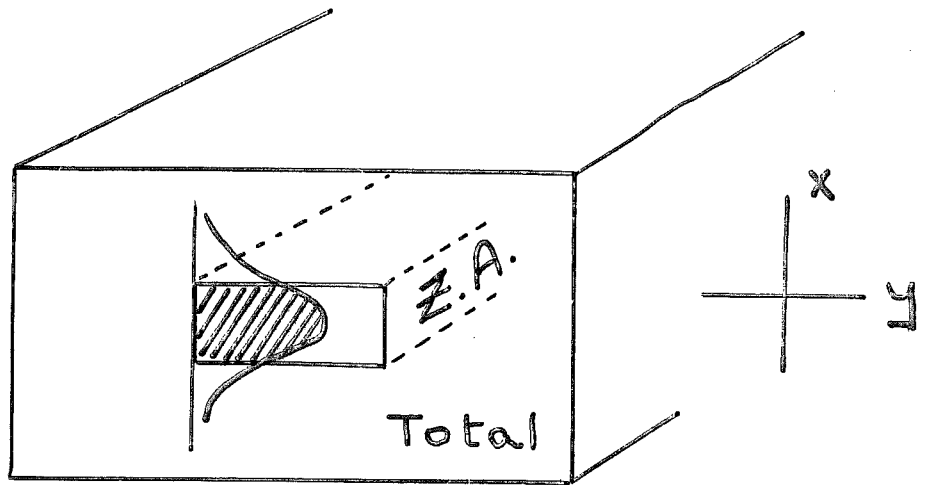
# Mecanismo de ganancia



# Mecanismo de realimentación



# FACTOR DE CONFINAMIENTO



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

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

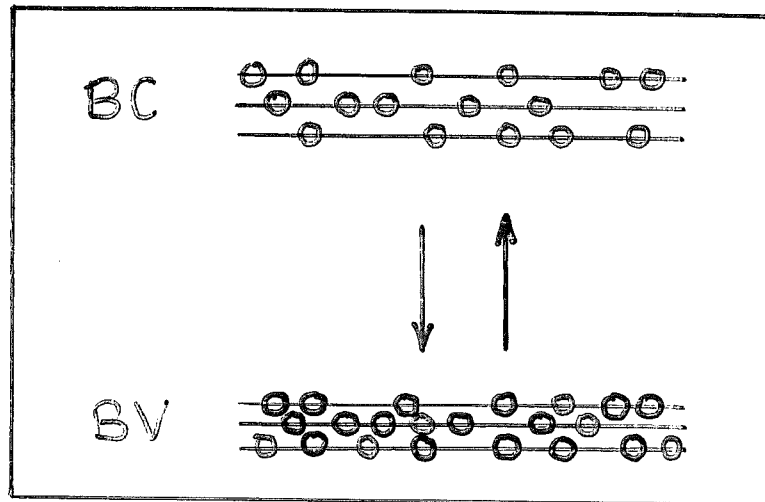
Ganancia neta máxima ( $m^{-1}$ ):

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

con:  $\alpha_s =$  pérdidas de scattering  
 $g_m = a(N - N_t) \quad (\lambda = \lambda_p)$

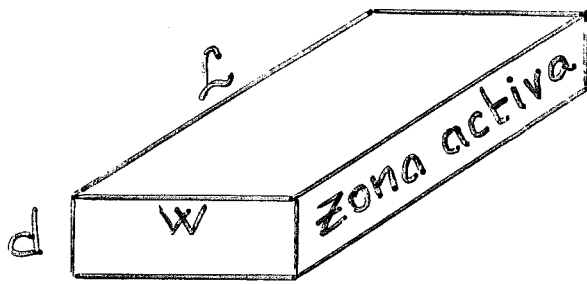
# PRINCIPIO FISICO

- \* Bombeo  $\Rightarrow$  Inversión de población
- \* Emisión estimulada ( $\sim$  Energía,  $N$ )
- \* Emisión espontánea ( $\sim N$ )
- \* Absorción :
  - 1) Estimulada ( $\sim$  Energía,  $N_t$ )
  - 2) Pérdidas ( $\sim \alpha_s$ )



- = ELECTRON
- = HUECO

## Modos longitudinales



$W, d$  muy pequeñas:  
(Sólo modos longitud.)

\* Separación en frecuencia :

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

\* Frecuencias modales :

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

\* Separación en long. de onda :

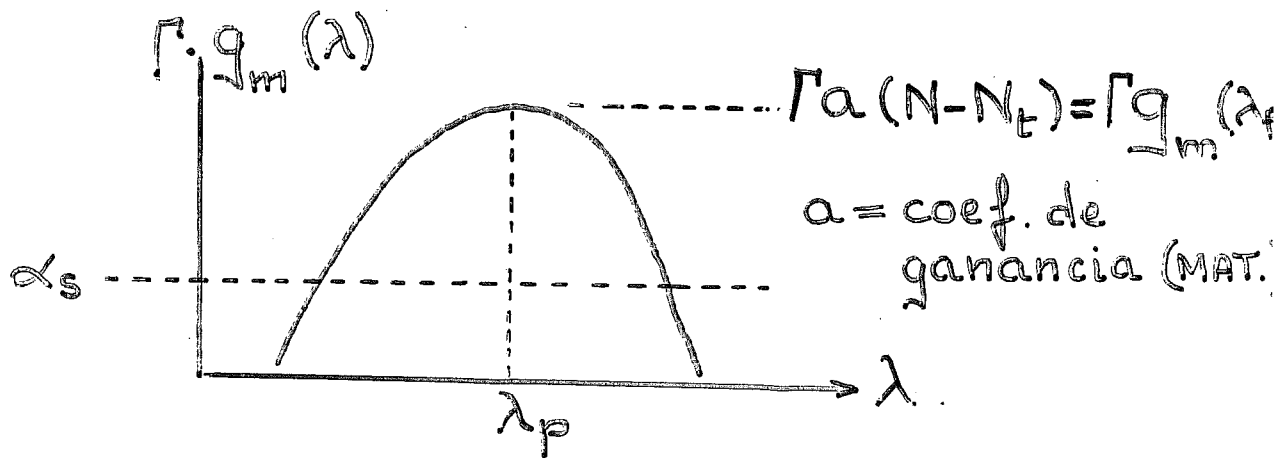
$$\boxed{\delta \lambda \approx \frac{\lambda_p^2}{2L}} \approx \text{cte} \quad (\text{dentro})$$

## 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

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

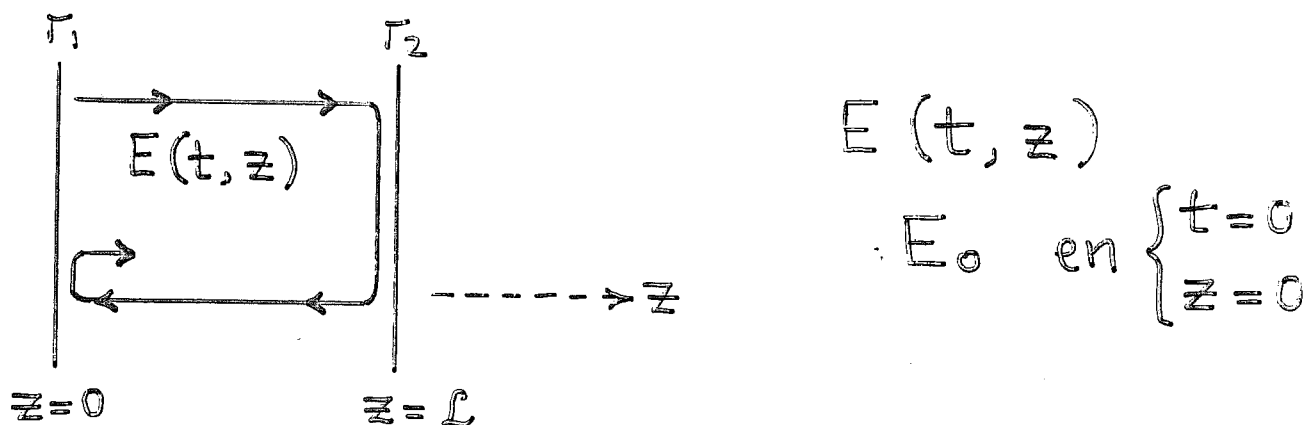
(en unidades de  $\text{long.}^{-1}$ )

\* Recordar que deberá cumplirse

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

# LA CAVIDAD OPTICA (RESONANTE)

- Condición de oscilación -



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

$$* E(t, 0^+) = \underbrace{r_1 r_2}_{\text{Reflexión}} E_0 \underbrace{e^{\frac{g}{2} 2L}}_{\text{Ganancia neta}} \cdot \underbrace{e^{-i2\beta L}}_{\text{fase}} \cdot \underbrace{e^{j\omega t}}_{\text{frec. instant.}}$$

\* Amplitud compleja :

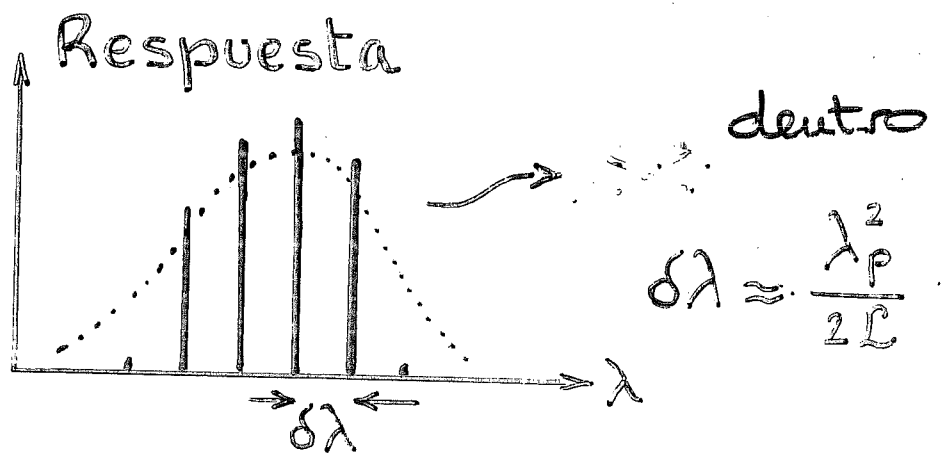
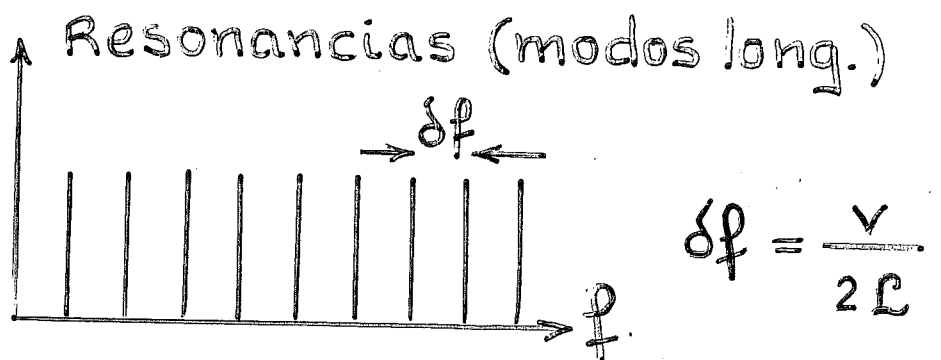
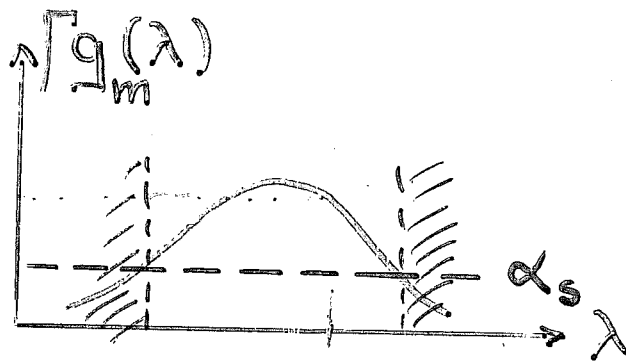
$$E^* = \underbrace{E_0 \sqrt{R_1 R_2}}_{\text{Módulo}} e^{gL} \cdot \underbrace{e^{-i2\beta L}}_{\text{fase}}$$

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

$$E^* = E_0 \Rightarrow \begin{cases} \sqrt{R_1 R_2} e^{gL} = 1 \\ e^{-i2\beta L} = 1 \end{cases}$$



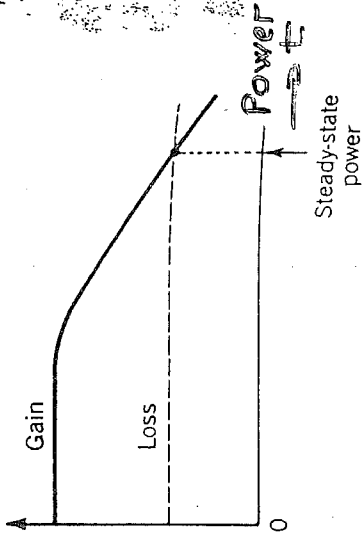
# Efecto combinado



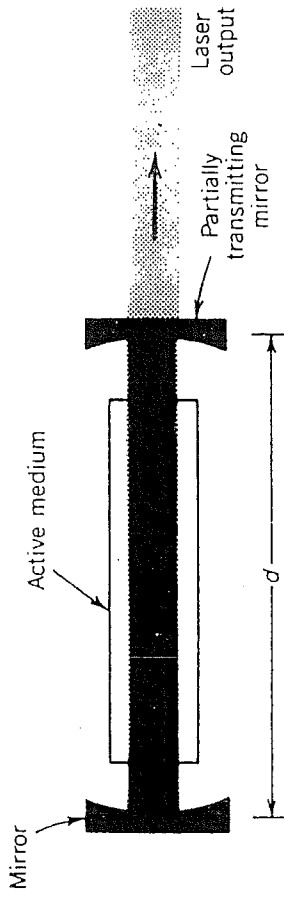
- \* ganancia  $\Rightarrow$  emisión estimulada
- \* realimentación  $\Rightarrow$  modos resonantes

# 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.

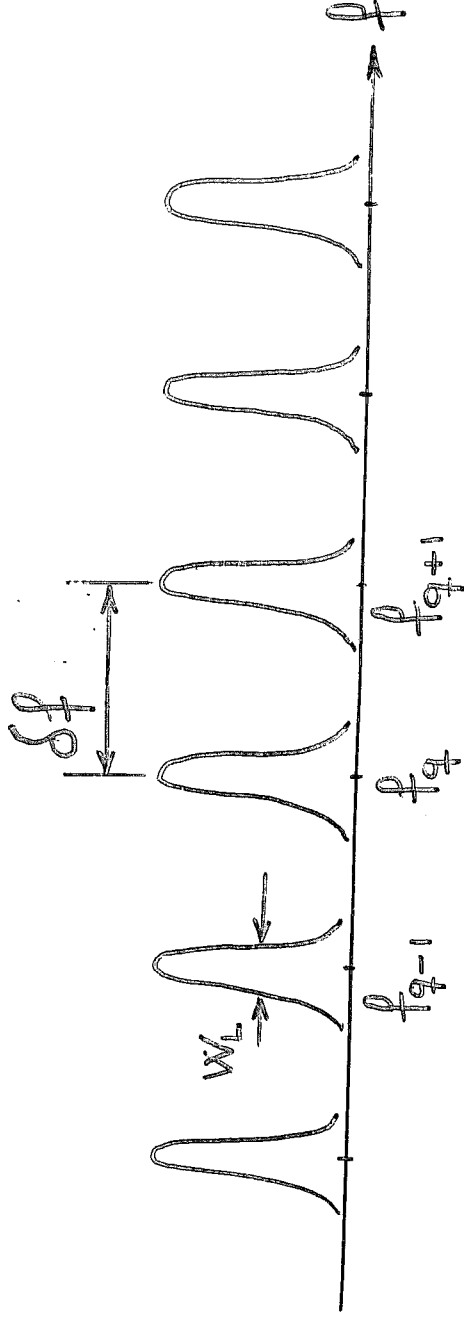


A laser consists of an optical amplifier (employing an active medium) placed within an optical resonator. The output is extracted through a partially transmitting mirror.

## Separación modal y anchura de línea

\* Separación entre modos consecutivos  $\delta f = \frac{v}{2L}$

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



\* Nota: si  $F \gg 1$ , entonces  $F \approx \pi / \alpha f L$ ,  
con lo cual

$$W_L \approx \frac{v / 2L}{\pi / \alpha f L} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\alpha f h} \quad (\text{Hz})$$

## Concepto de $n_0$ de fotones / volumen

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

$$\frac{dW}{dV} = \frac{\epsilon}{2} |E|^2 = \frac{\epsilon}{2} |E \eta H| = \frac{1}{2} \sqrt{\mu\epsilon} |EH|$$

$$\frac{dW}{dV} = \frac{P_{\text{avg}}}{v} \quad \text{con} \quad \begin{cases} V = wLd \\ v = (\mu\epsilon)^{-1/2} \end{cases}$$

- \* Definimos

$$S = \frac{1}{hf} \frac{dW}{dV} \Rightarrow S = \frac{P}{hf v w d},$$

que es el  $n_0$  de fot / Vol

## Las ecuaciones de ritmo (laser)

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

Energía: 
$$\frac{dS_k(t)}{dt} = \nu \{ \Gamma g_m(\lambda_k) - \alpha_f \} S_k(t) + \beta \frac{N(t)}{\tau_{sp}}$$

Siendo:

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

\*  $S_k$  = dens. vol. de fotones en el modo  $m$  o  $k$

\*  $\beta$  = factor de emis. esp. acoplada al modo

\*  $N(t)$  = dens. vol. de electrones en B.C.

\*  $\alpha_f$  = pérdidas totales en la cavidad

Nota: sólo se contempla  $d/dt$  (aproximación adiabát.)

Son no lineales y acopladas!

$$d/dz \approx 0$$

# 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 =  $R = I/qV = N^0/\tau_{sp}$  ( $s^{-1} \cdot m^{-3}$ )
- \*  $N^0$  = dens. portadores en pequeña señal ( $m^{-3}$ )
- \*  $V = WLd$  ( $m^{-3}$ ) ;  $v$  = veloc. en Z.A. ( $m \cdot s^{-1}$ )
- \*  $S(\lambda)$  = Dens. volumét. de fotones ( $m^{-3}$ ) en el modo  $\lambda$

## ECUACION DE LA DENSIDAD DE FOTONES :

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

- \*  $\beta$  = factor de emisión espontánea acoplada
  - \*  $\alpha_t = \alpha_s + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2}$  = pérdidas totales ( $m^{-1}$ )
  - \*  $\tau_{sp}$  = tiempo de vida del portador (**s**)
  - \*  $\Gamma$  = factor de confinamiento
- ! Son no-lineales y acopladas !



## ECUACIONES DE RITMO EN REGIMEN ESTACIONARIO

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

$$2.4) \quad 0 = v \{ \Gamma g_m - \alpha_t \} S \Rightarrow \boxed{\Gamma g_m(\lambda) = \alpha_t} \Rightarrow$$

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

Concepto de corriente umbral :

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

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

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



1ª Ecuación (régimen estacionario):

$N \rightarrow N_{th}$

$$\frac{I}{qV} = \frac{N}{\tau_{sp}} + v \Gamma g_m(\lambda) \cdot S(\lambda)$$

$$R = \frac{I}{qV} = \frac{N^o}{\tau_{sp}}$$

con

$$\hookrightarrow S = \frac{R - N / \tau_{sp}}{v \Gamma g_m}$$

$\Rightarrow$  (de la 2ª)  $\rightarrow$   
 $(\Gamma g_m = \alpha_f)$

$$S = (N^o - N_{th}) \frac{\tau_{ph}}{\tau_{sp}}$$

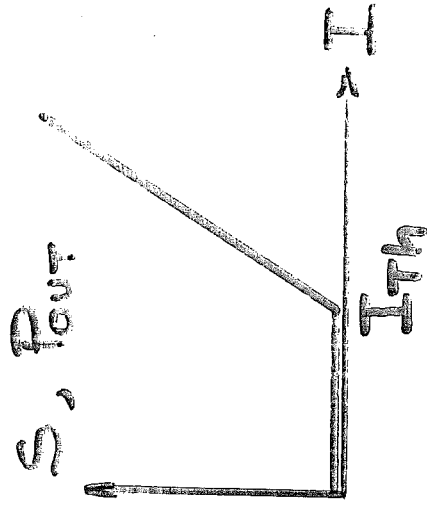
\* Conclusion: fotones/vol = (exceso  $\bar{e}/Vol$ )  $\cdot \left( \frac{\tau_{ph}}{\tau_{sp}} \right)$

\* por lo tanto, Eficiencia  $\equiv \tau_{ph} / \tau_{sp}$  (ideal)

\* De otra forma

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

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



## POTENCIA DE SALIDA

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

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

Por otra parte,

$$P = h\nu w d S$$

Resulta

$$P = \frac{h\nu}{qL\alpha_t} (I - I_{Th}) \neq P_{OUT} !$$

Teniendo en cuenta las Ec. de Ritmo,

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

Con lo cual,

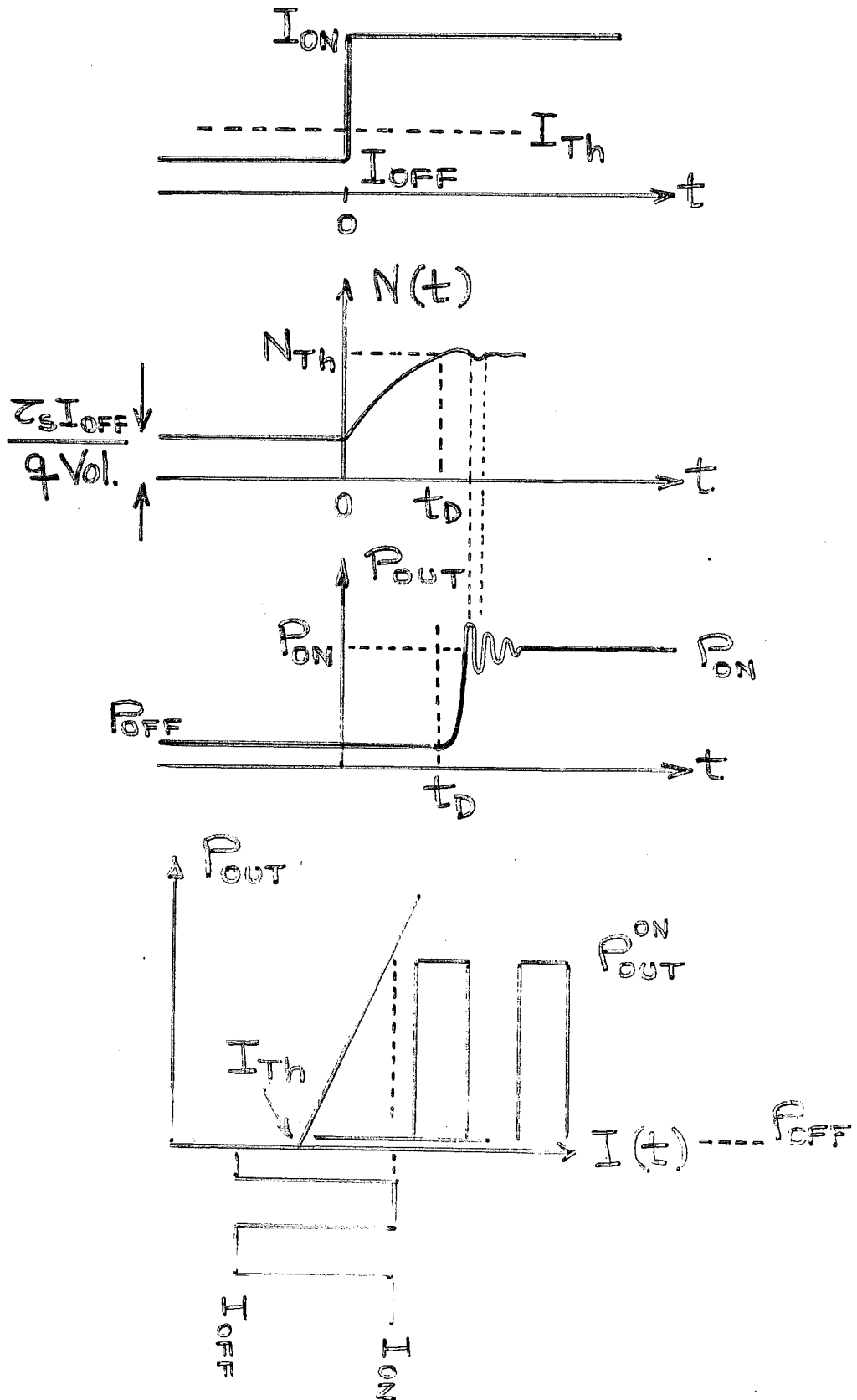
$$P_{OUT} = \frac{1}{2} \frac{1-R}{\sqrt{R}} \frac{h\nu}{q} \frac{I - I_{Th}}{\alpha_s L + \ln(1/R)}$$

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

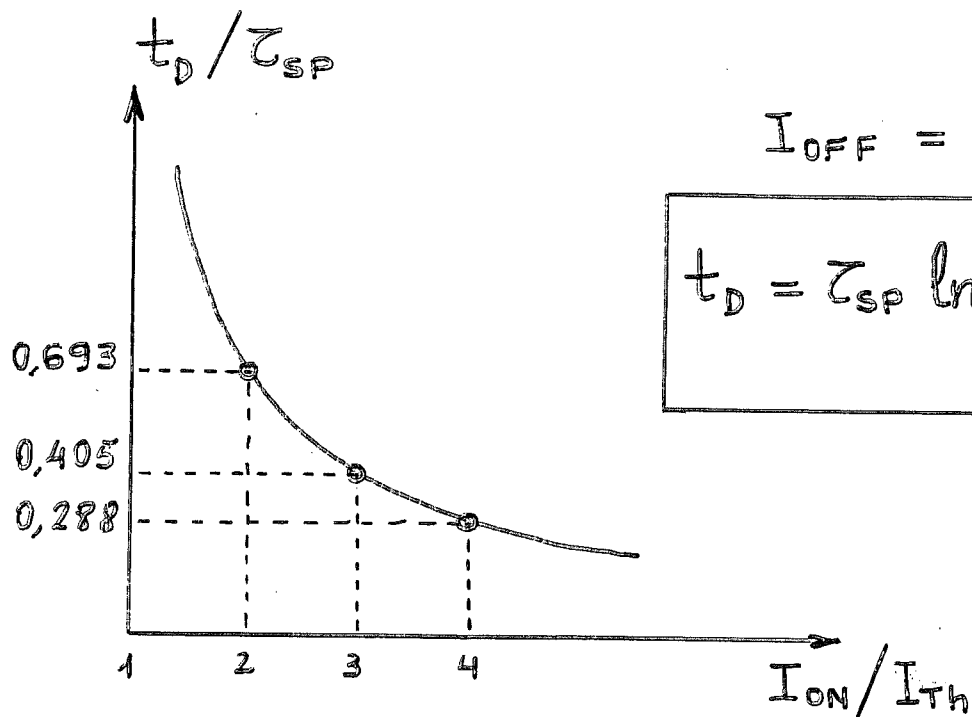
# MODULACION DIGITAL DEL LASER

1er Caso

$$I_{OFF} < I_{Th} < I_{ON}$$



# Tiempo de retardo de un diodo laser



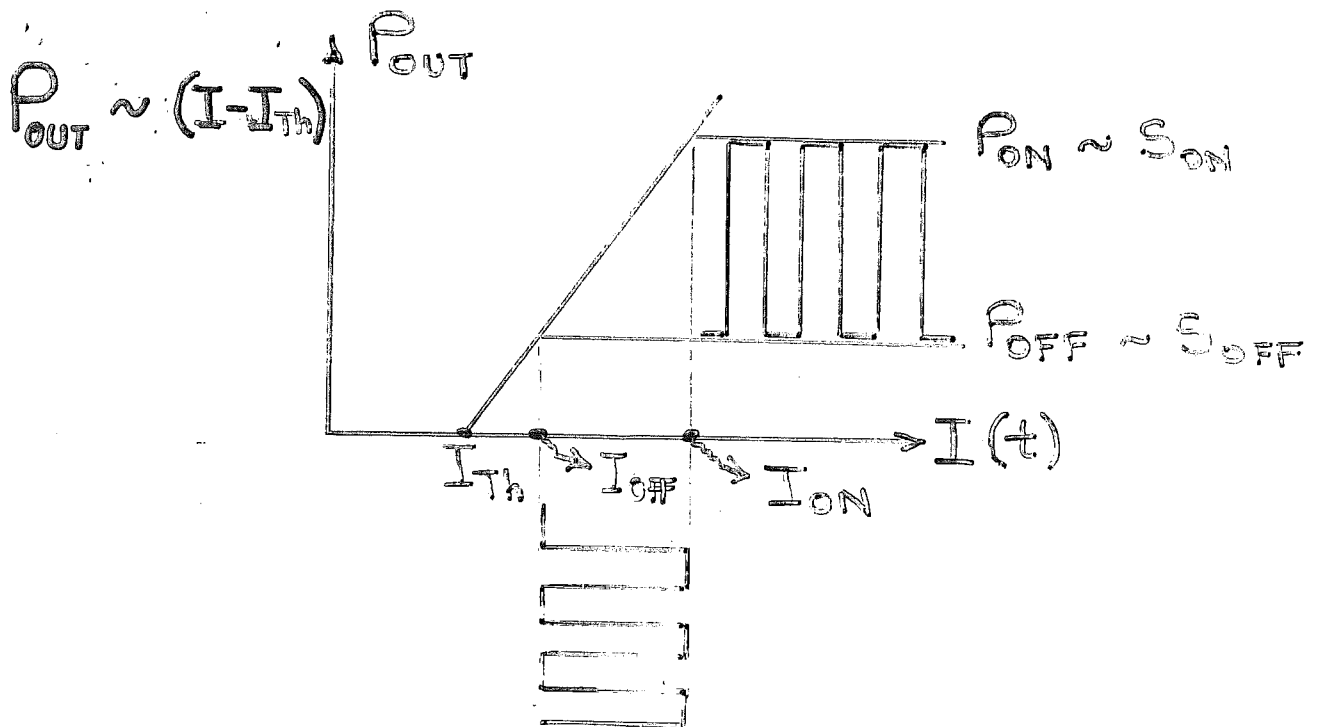
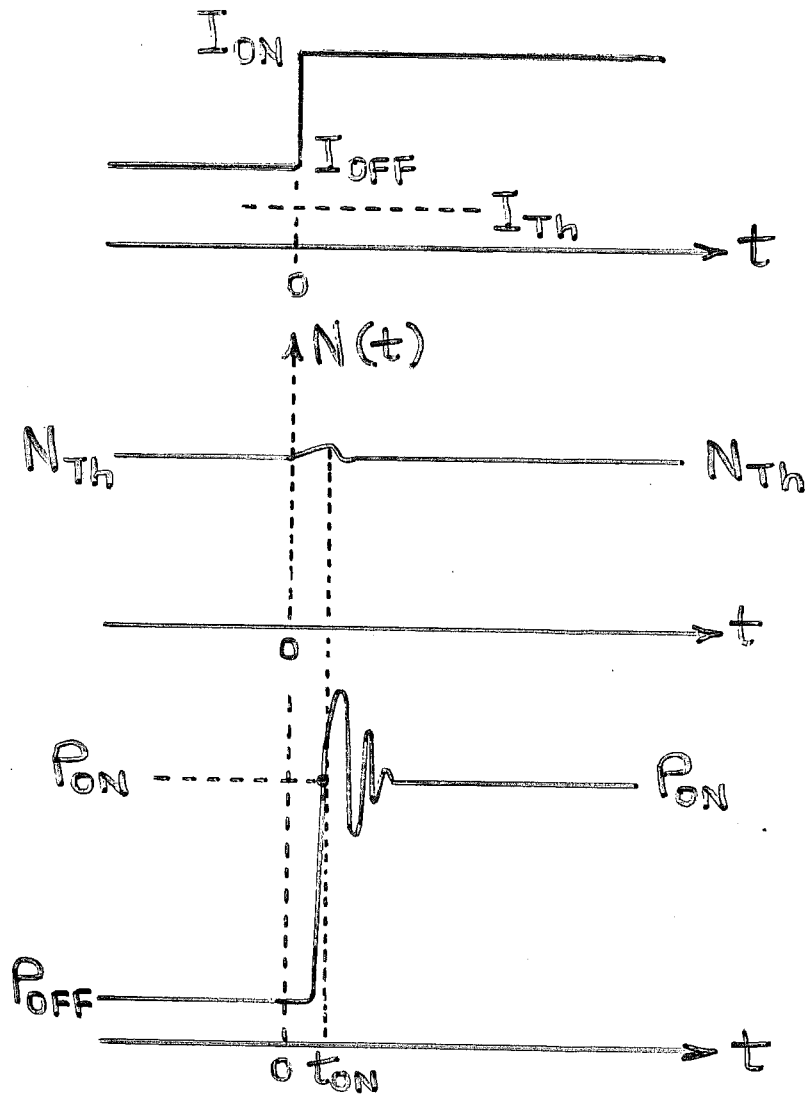
$$I_{OFF} = 0 \Rightarrow$$

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

CONCLUSION  $\left\{ \begin{array}{l} I_{ON} \uparrow \Rightarrow t_D \downarrow \\ I_{TH} \uparrow \Rightarrow t_D \uparrow \end{array} \right.$

2<sup>e</sup> Case

$$I_{Th} < I_{OFF} < I_{ON}$$



1º caso:  $I_{OFF} < I_{Th}$

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

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

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

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

$$S(t) \approx S_{OFF} \cdot \exp \left\{ \frac{vFA}{2qV} (I_{ON} - I_{OFF}) t^2 \right\}$$

$$t_{ON}^2 \approx \frac{2qV}{vFA} \frac{\ln(P_{ON}/P_{OFF})}{I_{ON} - I_{OFF}}$$

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

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