



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



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE  
CATALUNYA

# COMUNICACIONS ÒPTIQUES



GRUP DE COMUNICACIONS ÒPTIQUES

## TEMARI

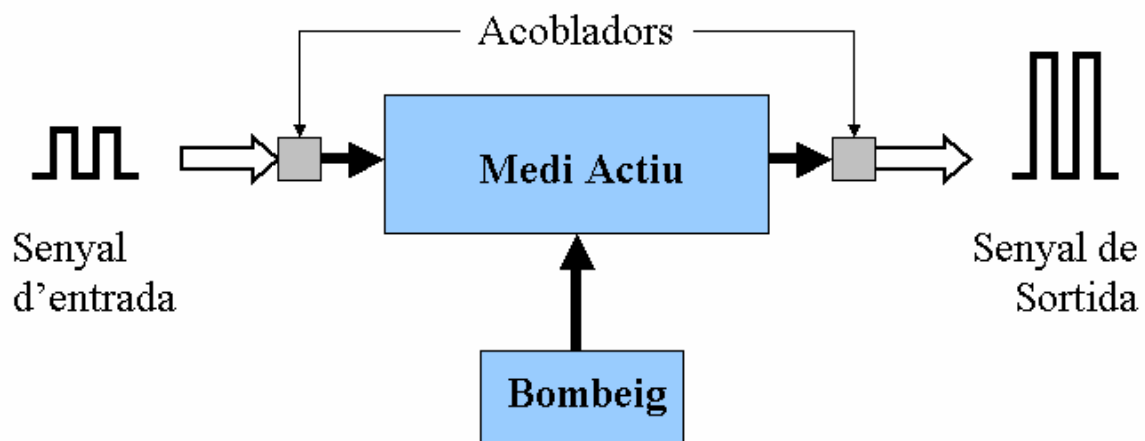
1. INTRODUCCIÓ
2. FIBRA ÒPTICA
3. FONTS ÒPTIQUES
4. RECEPTORS ÒPTICS
- ➔ 5. AMPLIFICADORS ÒPTICS
6. SISTEMES DE TX PER F.O.

## 5. AMPLIFICADORS ÒPTICS

- CONCEPTES BÀSICS
- AMPLIFICADOR SEMICONDUCTOR
- AMPLIFICADOR DE FIBRA DOPADA
- SOROLL EN AMPLIFICACIÓ ÒPTICA

## CONCEPTES BÀSICS

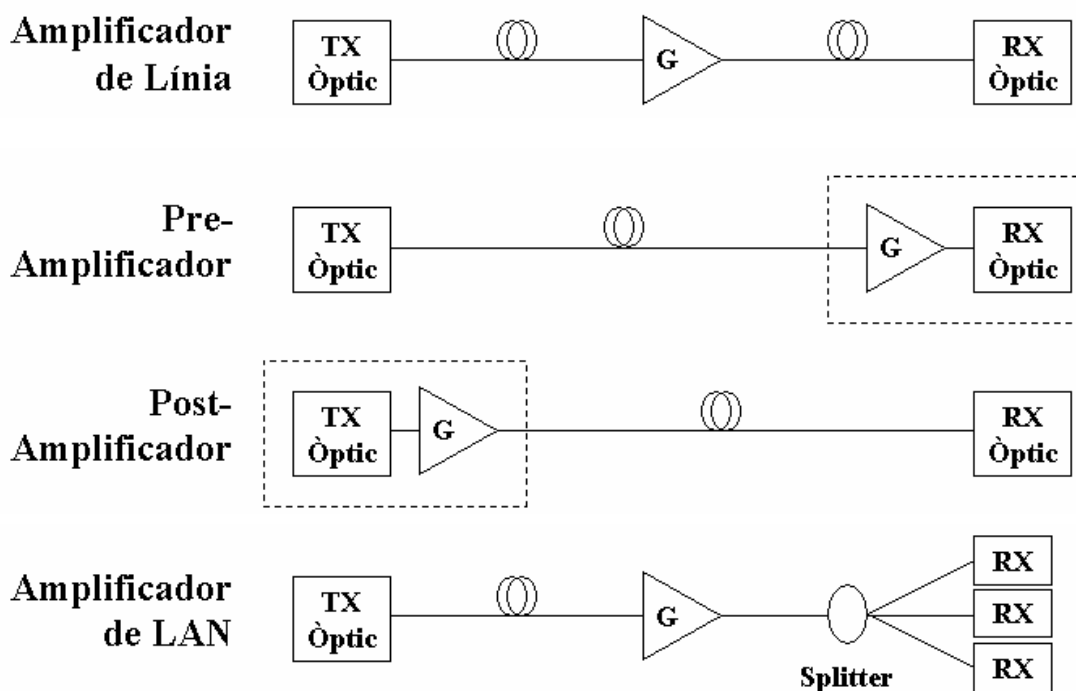
### Amplificador Òptic Genèric



## Paràmetres Característics

- Ample de Banda d'Amplificació
- Guany
- Factor de Soroll
- Freqüència de Treball
- Potència de Saturació
- Rapidesa ON/OFF
- Dimensions
- Cost

## Aplicacions generals de l'amplificador òptic

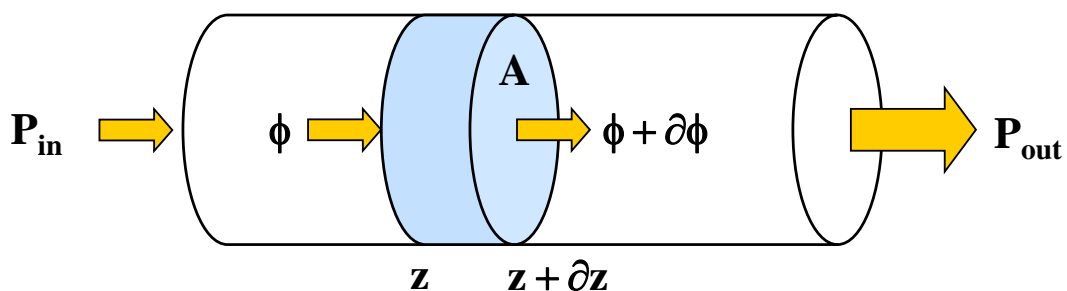


## Tipus d'amplificadors òptics

- Amplificador Òptic Semiconductor
- Amplificador Òptic de Fibra
  - Fibra Dopada (EDFA)
  - No Lineal (Raman)



## Guany de l'Amplificador



$$\phi = \frac{P}{hf \cdot A} \quad \text{Fluxe de fotons [s}^{-1}\text{m}^{-2}\text{]}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = g_0 \phi \rightarrow \frac{\partial P}{\partial z} = g_0 P \quad [\text{s}^{-1}\text{m}^{-3}]$$

Guany en  
petita senyal

$$P_{\text{out}} = P_{\text{in}} \underbrace{e^{g_0 L}}_{G_0}$$



$$G_0 \equiv \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = e^{g_0 L}$$

## Saturació del Guany

$$\frac{\partial P}{\partial z} = g(P) \cdot P$$

$$g(P) = \frac{g_0}{1 + P/P_{sat}}$$

$$\partial P = g(P) \cdot P \cdot \partial z = \frac{g_0}{1 + \frac{P}{P_{sat}}} P \cdot \partial z = \frac{1}{\frac{1}{P} + \frac{1}{P_{sat}}} g_0 \partial z$$

$$g_0 \partial z = \left( \frac{1}{P} + \frac{1}{P_{sat}} \right) \partial P \quad \rightarrow \quad \int_0^L g_0 \partial z = \int_{P_{in}}^{P_{out}} \left( \frac{1}{P} + \frac{1}{P_{sat}} \right) \partial P$$

$$g_0 L = \left( \ln[P] + \frac{1}{P_{sat}} P \right) \Big|_{P_{in}}^{P_{out}} = \ln \left[ \frac{P_{out}}{P_{in}} \right] + \frac{P_{out} - P_{in}}{P_{sat}} = \ln[G] + \frac{P_{in}}{P_{sat}} (G - 1)$$

$$G = e^{g_0 L - \frac{P_{in}}{P_{sat}} (G-1)} = \underbrace{e^{g_0 L}}_{G_0} e^{-\frac{P_{in}}{P_{sat}} (G-1)} \quad \Rightarrow \quad G = G_0 e^{-\frac{P_{in}}{P_{sat}} (G-1)}$$

## Saturació del Guany

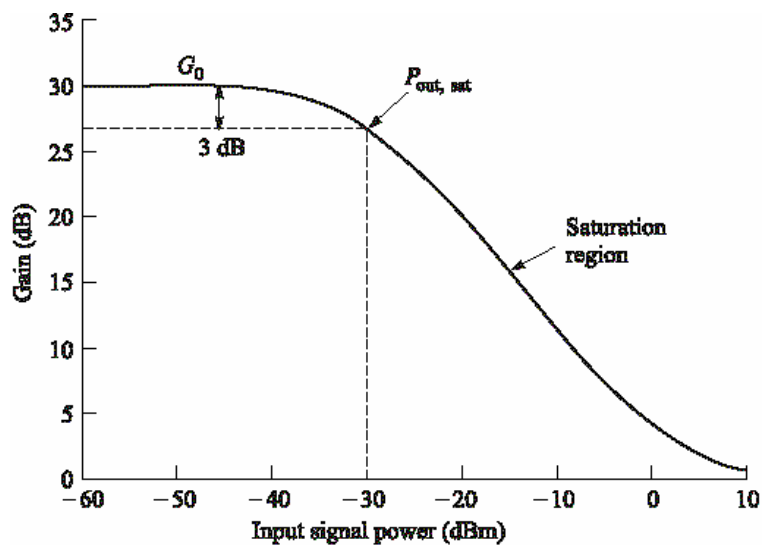
$$G = G_0 e^{-\frac{P_{in}}{P_{sat}} (G-1)}$$

### Saturació 3dB

$$G = \frac{G_0}{2}$$

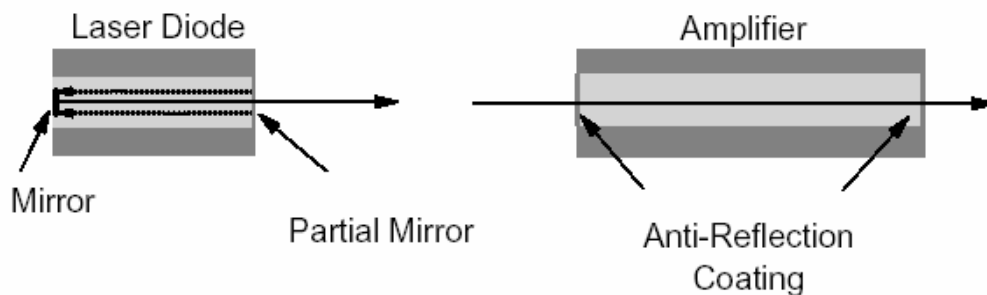
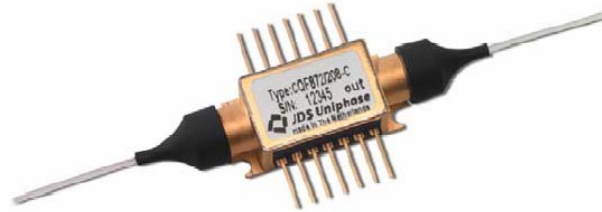
$$\frac{G_0}{2} = G_0 e^{-\frac{P_{in}}{P_{sat}} \left( \frac{G_0}{2} - 1 \right)}$$

$$\ln 2 = \frac{P_{in}}{P_{sat}} \left( \frac{G_0}{2} - 1 \right) \approx \frac{P_{in}}{P_{sat}} \frac{G_0}{2} \quad \Rightarrow \quad P_{in} = \frac{P_{sat}}{G_0} 2 \ln 2$$



# AMPLIFICADOR SEMICONDUCTOR

## Principi de Funcionament del SOA



## Tipus de SOA

- **Fabry-Perot (FPOA)**
    - **Reflectivitat 30%**
    - **BW petit (10 nm)**
    - **Guany moderat (15 dB)**
    - **Sensible Temperatura**
  - **Ona Progressiva (TWOA)**
    - **Reflectivitat  $10^{-4}$ ,  $10^{-5}$**
    - **BW elevat (40 nm)**
    - **Guany elevat (25 dB)**
    - **Poc Sensible Temperatura**
- Làser per sota del  
llindar

## Equació de Ritme (passada única)

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{I}{qV} - R_s - \frac{N}{\tau_r}$$

$$R_s \equiv g v S = \Gamma a v (N - N_0) S$$

$$S = \frac{P}{v h f W d} \left[ \frac{\text{fotons}}{\text{m}^3} \right] \text{ densitat de fotons incident}$$

Règim Estacionari

$$\frac{\partial N}{\partial t} = 0 \rightarrow \frac{I}{qV} = R_s + \frac{N}{\tau_r} = g \frac{P}{h f \cdot W d} + \frac{1}{\tau_r} \left( \frac{g}{\Gamma a} + N_0 \right)$$

$$\rightarrow g = \frac{\frac{I}{qV} - \frac{N_0}{\tau_r}}{\frac{P}{h f \cdot W d} + \frac{1}{\Gamma a \tau_r}} = \frac{\Gamma a \tau_r \left( \frac{I}{qV} - \frac{N_0}{\tau_r} \right)}{1 + \Gamma a \tau_r \frac{P}{h f \cdot W d}} \quad \text{guany unitari}$$

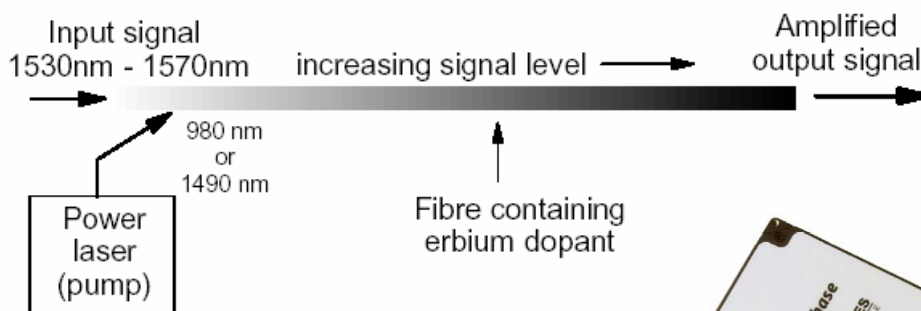
$$g = \frac{g_0}{1 + P/P_{\text{sat}}}$$

$$g_0 \equiv \Gamma a \tau_r \left( \frac{I}{qV} - \frac{N_0}{\tau_r} \right) \text{ guany unitari en petita senyal}$$

$$P_{\text{sat}} \equiv \frac{h f \cdot W d}{\Gamma a \tau_r} \text{ potència de saturació}$$

## AMPLIFICADOR DE FIBRA DOPADA

### Esquema del DFA



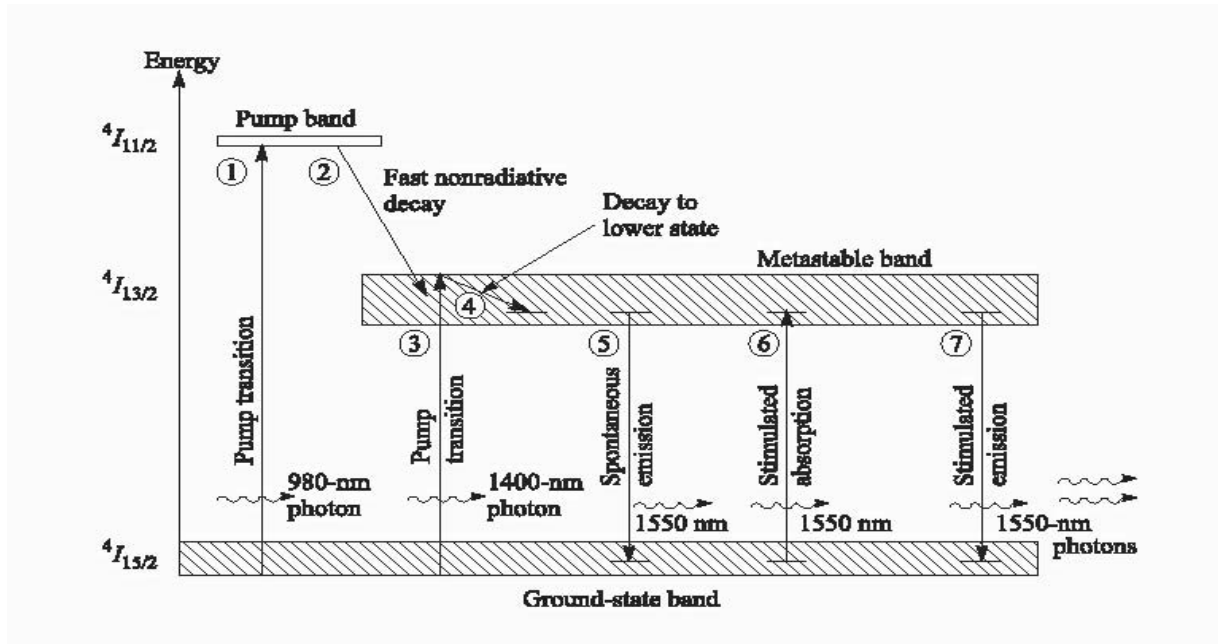
### Tipus de Dopants

- Erbi** → 3a Finestra
- Neodimi** → 2a Finestra
- Praseodimi** → 2a Finestra



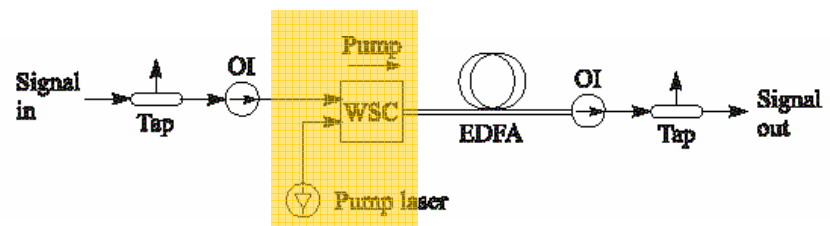
# Mecanisme d'Amplificació

## Erbium energy-level diagram

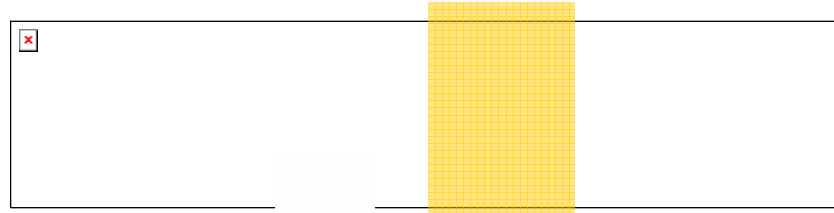


# Arquitectures del EDFA

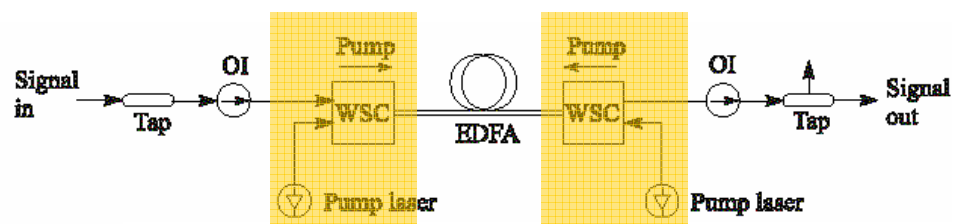
Codirectional Pumping



Counterdirectional Pumping



Dual Pumping



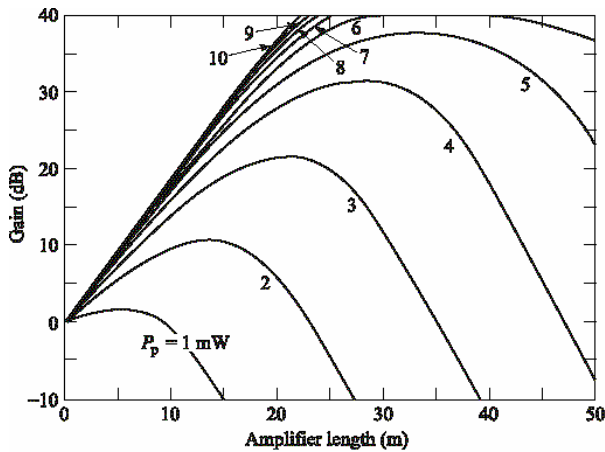
OI: Optical isolator  
WSC: Wavelength-selective coupler

## Eficiència de Conversió i Guany

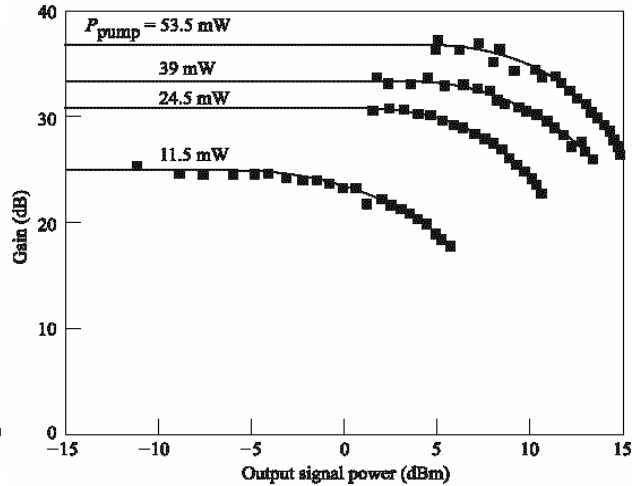
$$g_0 = \rho \sigma_e \rightarrow G_0 = \exp[\rho \sigma_e L]$$

$\sigma_e$ : paràmetre d'emissió de l'Erbi  
 $\rho$ : Concentració d'Erbi

Gain vs EDFA length



Gain vs Output Power



## EDFA vs SOA

### SOA

- Guany → 15-20 dB
- P. Saturació → 8-10 dBm
- Soroll → Elevat
- Polarització → Sensible
- Crosstalk → Elevat
- Velocitat → Ràpid
- Tamany → Petit
- Cost → Moderat

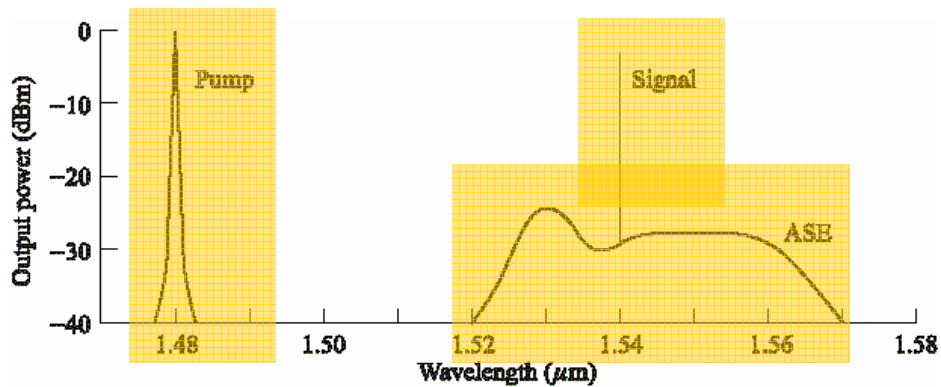
### EDFA

- Guany → 30-40 dB
- P. Saturació → 20 dBm
- Soroll → Reduït
- Polarització → Indep.
- Crosstalk → Reduït
- Velocitat → Lent
- Tamany → Gran
- Cost → Elevat

# SOROLL EN AMPLIFICACIÓ ÒPTICA

## Amplified Spontaneous Emission (ASE)

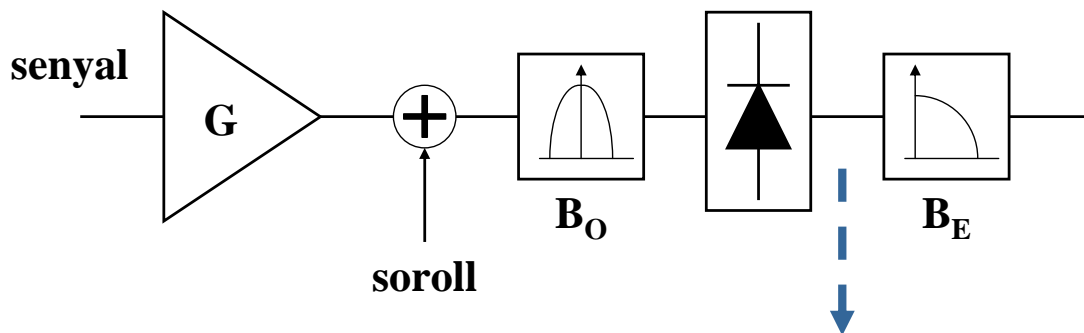
La recombinació espontània dels parells electró-forat en la zona activa dona lloc al ASE



## Espectre ASE

$$P_{out} = GP_{in} + S_{ASE} B_O \quad \leftarrow \quad S_{ASE}(f) = hf [G(f) - 1] n_{sp} = P_{ASE} / B_O$$

$$n_{sp} = \frac{N_2}{N_2 - N_1} \geq 1 \quad \text{factor d'emissió espontània}$$



$$i_{tot} \propto (E_s + E_n)^2 = \underbrace{E_s^2}_{\text{SENYAL}} + \underbrace{E_n^2}_{\text{SOROLL}} + \underbrace{2E_s E_n}_{\text{BATUT}}$$

## Espectre ASE

$$\langle i_{\text{tot}}^2 \rangle = \sigma_{\text{tot}}^2 = \sigma_{\text{shot-s}}^2 + \sigma_{\text{shot-ASE}}^2 + \sigma_{\text{s-ASE}}^2 + \sigma_{\text{ASE-ASE}}^2 + \sigma_{\text{T}}^2$$

$$\sigma_{\text{shot}}^2 = \sigma_{\text{shot-s}}^2 + \sigma_{\text{shot-ASE}}^2 = 2q\mathfrak{R}(GP_{\text{in}} + S_{\text{ASE}}B_{\text{O}})B_{\text{E}}$$

$$\sigma_{\text{s-ASE}}^2 = 4\mathfrak{R}^2GP_{\text{in}}S_{\text{ASE}}B_{\text{E}} = 4\mathfrak{R}^2GP_{\text{in}}hf(G-1)n_{\text{sp}}B_{\text{E}}$$

$$\sigma_{\text{ASE-ASE}}^2 = 4\mathfrak{R}^2S_{\text{ASE}}^2B_{\text{O}}B_{\text{E}} = 4\mathfrak{R}^2[hf(G-1)n_{\text{sp}}]^2B_{\text{O}}B_{\text{E}}$$

$$\sigma_{\text{T}}^2 = 4(k_{\text{B}}T/R_{\text{L}})F_{\text{A}}B_{\text{E}}$$

## Factor de Soroll

$$\text{SNR} \equiv \frac{\langle i_{\text{s}} \rangle^2}{\sigma_{\text{tot}}^2} \approx \frac{(\mathfrak{R}GP_{\text{in}})^2}{4\mathfrak{R}^2GP_{\text{in}}hf(G-1)n_{\text{sp}}B_{\text{E}}} = \frac{\mathfrak{R}P_{\text{in}}}{2qB_{\text{E}}} \frac{G}{2\eta n_{\text{sp}}(G-1)}$$

Fotodetector ideal ( $h=1$ , no soroll tèrmic)

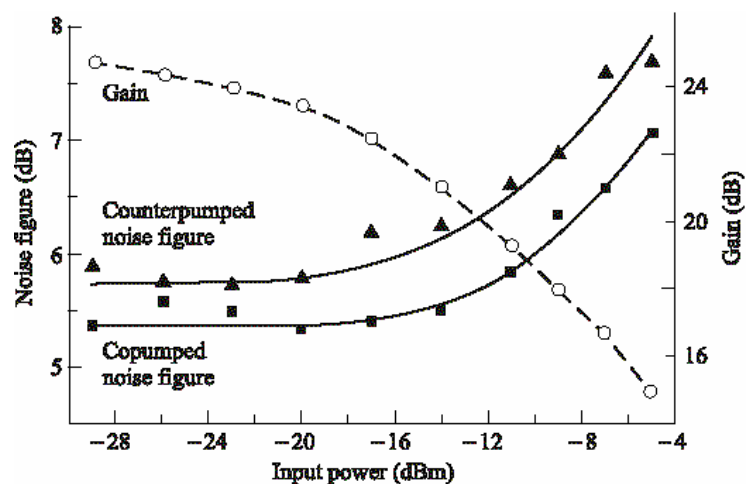
$$\text{SNR}_0 \equiv \frac{\mathfrak{R}P_{\text{in}}}{2qB_{\text{E}}} = \frac{P_{\text{in}}}{2hfB_{\text{E}}}$$

$$F \equiv \frac{2n_{\text{sp}}(G-1)}{G}$$

$$F \xrightarrow{G \gg 1} 2n_{\text{sp}}$$

$$F \xrightarrow{n_{\text{sp}}=1} 2 \text{ (3dB)}$$

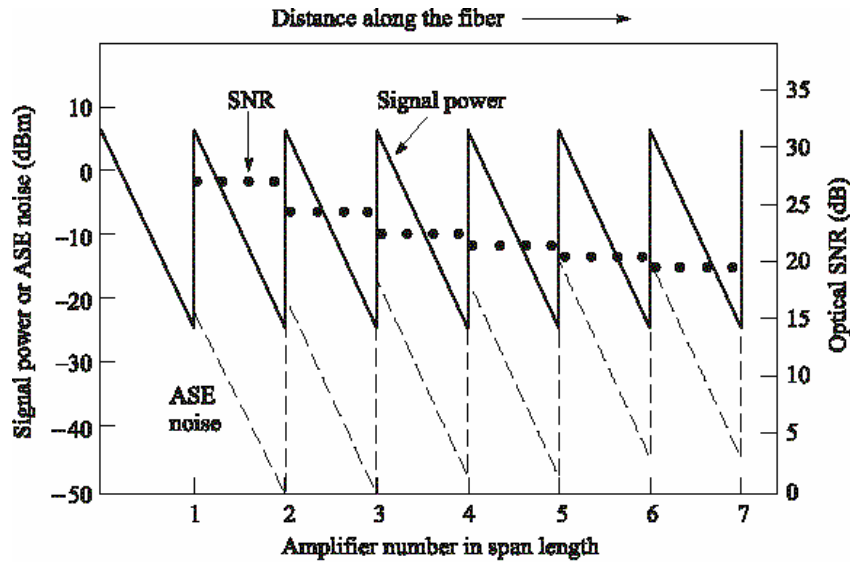
Límit Quàntic



## Degradació de la SNR en un Enllaç

$$F_T = F_1 + \frac{F_2}{G_1} + \frac{F_3}{G_1 G_2} + \dots + \frac{F_N}{G_1 G_2 \dots G_{N-1}}$$

N: Nombre d'amplificadors en cascada



## Sensibilitat en Pre-Amplificació

$$\mu_1 = \Re G P_{in}$$

$$\mu_0 = 0$$

Estadística gaussiana

$$\sigma_1 \approx \sqrt{\sigma_{s-ASE}^2 + \sigma_{ASE-ASE}^2}$$

$$\sigma_0 \approx \sigma_{ASE-ASE}$$

$$Q \equiv \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \approx \frac{\Re G P_{in}}{\sqrt{4\Re^2 G^2 P_{in} hf n_{sp} B_E + 4\Re^2 G^2 [hf n_{sp}]^2 B_O B_E + \sqrt{4\Re^2 G^2 [hf n_{sp}]^2 B_O B_E}}}$$

$$P_{in} = 4hf n_{sp} B_E \left[ Q^2 + Q\sqrt{B_O/B_E} \right]$$

$$P_a = \frac{1}{2} P_{in}$$

$$P_a = 2hf n_{sp} B_E \left[ Q^2 + Q\sqrt{B_O/B_E} \right]$$

$$Q = 6, n_{sp} = 1, B_O = B_E$$

$$\langle n_a \rangle = \frac{P_a}{hf 2B_E} = n_{sp} \left[ Q^2 + Q\sqrt{B_O/B_E} \right]$$

$$\langle n_a \rangle = 42 \left[ \frac{\text{fot}}{\text{bit}} \right]$$

## Millora de la Sensibilitat en Pre-Amplificació

**AO** Domina s-ASE i ASE-ASE

$$\mu_1 = \Re GP_{in}$$

$$\sigma_1 \approx \sqrt{\sigma_{s-ASE}^2 + \sigma_{ASE-ASE}^2}$$

$$\mu_0 = 0$$

$$\sigma_0 \approx \sqrt{\sigma_{ASE-ASE}^2}$$

**PIN** Domina Tèrmic

$$\mu_1 = \Re P_{in}$$

$$\sigma_1 \approx \sigma_T$$

$$\mu_0 = 0$$

$$\sigma_0 = \sigma_T$$

$$\sigma_{s-ASE}^2 = 4\Re^2 GP_{in} hf (G - 1) n_{sp} B_E$$

$$\sigma_{ASE-ASE}^2 = 4\Re^2 [hf (G - 1) n_{sp}]^2 B_O B_E$$

$$\sigma_T^2 = 4(k_B T / R_L) F_A B_E$$

$$Q_{PIN} = \frac{\mu_1}{2\sigma_1} = \frac{\Re P_{in}}{2\sigma_T} = \frac{\Re P_{in}}{2\sqrt{4\frac{k_B T}{R_L} F_A B_E}}$$

$$Q_{AO} = \frac{\mu_1}{\sigma_1 + \sigma_0} \approx \frac{\Re GP_{in}}{\sqrt{\sigma_{s-ASE}^2 + \sigma_{ASE-ASE}^2} + \sigma_{ASE-ASE}}$$

**Condicció de Millora de la Sensibilitat**

$$Q_{AO} > Q_{PIN}$$

$$P_a = \frac{1}{2} P_{in}$$

$$\frac{P_{in}}{\sqrt{4P_{in} hf n_{sp} B_E + 4[hf n_{sp}]^2 B_O B_E} + \sqrt{4[hf n_{sp}]^2 B_O B_E}} > \frac{\Re P_{in}}{2\sigma_T}$$

$$\longrightarrow P_{in} < \frac{\sigma_T^2}{\Re^2 B_E hf n_{sp}} - 2\frac{\sigma_T}{\Re} \sqrt{B_O / B_E}$$

$$P_a < \frac{\sigma_T^2}{\Re^2 B_E hf 2n_{sp}} - \frac{\sigma_T}{\Re} \sqrt{B_O / B_E}$$