Sistemas de comunicação óptica

Segunda parte

Fontes transmissoras

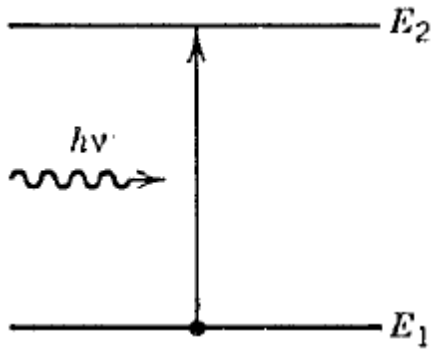
Transmissores Ópticos

- Fontes ópticas.

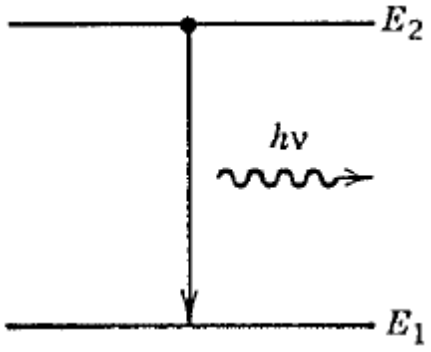
  Diodos emissores (LEDs)

  Laser de semicondutores
- Processo ópticos em semicondutores

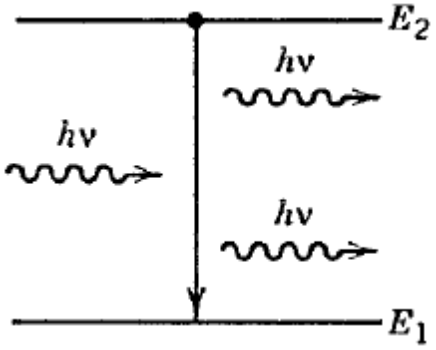
Absorção óptica



Emissão espontânea



Emissão estimulada



Transmissores Ópticos

Taxas de emissão e absorção

Taxa de emissão espontânea $R_{\text{spon}} = AN_2,$

Taxa de emissão estimulada $R_{\text{stim}} = BN_2\rho_{\text{em}}$

Taxa de absorção $R_{\text{abs}} = B'N_1\rho_{\text{em}}$

N_1: densidade de elétrons no estado fundamental
N_2: densidade de elétrons no estado excitado
ρ_{em}: densidade espectral da energia eletromagnética

No equilíbrio térmico

$$\begin{cases} N_2/N_1 = \exp(-E_g/k_BT) \\ \quad\quad\equiv \exp(-h\nu/k_BT) \\ AN_2 + BN_2\rho_{\text{em}} = B'N_1\rho_{\text{em}} \end{cases}$$

$$\rho_{\text{em}} = \frac{A/B}{(B'/B)\exp(h\nu/k_BT) - 1}$$

$$\rho_{\text{em}} = \frac{8\pi h\nu^3/c^3}{\exp(h\nu/k_BT) - 1}$$

Formula de Planck

Coeficientes de Einstein

$$A = (8\pi h\nu^3/c^3)B$$

$$B' = B$$

Transmissores Ópticos

Temperatura ambiente: $K_BT = 25$ meV

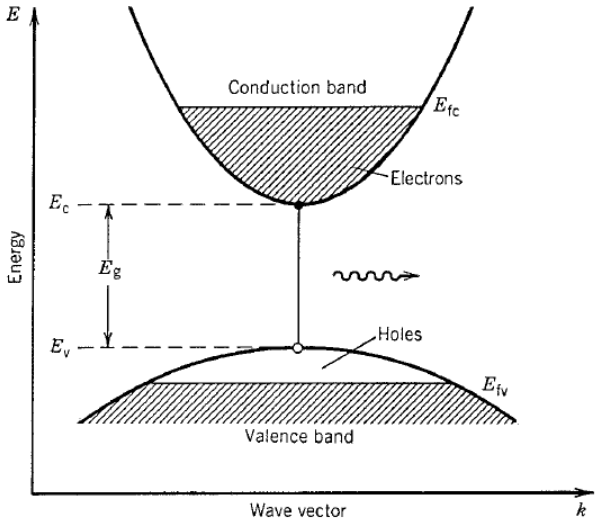
$$\frac{R_{estim}}{R_{espont}} = \left[exp\left(\frac{h\nu}{K_BT}\right) - 1\right]^{-1} \ll 1$$

Para $K_BT > h\nu$: $R_{espont} > R_{estim}\ e\ R_{abs}$

Emissão estimulada: bombeamento de energia externo ⇒ Inversão de população $N_2 > N_1$

Função de distribuição Fermi –Dirac: probabilidade de ocupação eletrônica da banda de condução e valência respectivamente

$$f_c(E_2) = \{1 + \exp[(E_2 - E_{fc})/k_BT]\}^{-1}$$
$$f_v(E_1) = \{1 + \exp[(E_1 - E_{fv})/k_BT]\}^{-1}$$



Taxas de emissão espontânea, estimulada e absorção

$$R_{\text{spon}}(\omega) = \int_{E_c}^{\infty} A(E_1, E_2) f_c(E_2)[1 - f_v(E_1)]\rho_{cv}\, dE_2$$

$$R_{\text{stim}}(\omega) = \int_{E_c}^{\infty} B(E_1, E_2) f_c(E_2)[1 - f_v(E_1)]\rho_{cv}\rho_{\text{em}}\, dE_2$$

$$R_{\text{abs}}(\omega) = \int_{E_c}^{\infty} B(E_1, E_2) f_v(E_1)[1 - f_c(E_2)]\rho_{cv}\rho_{\text{em}}\, dE_2$$

Densidade de estados eletrônicos: $\rho_{cv} = \frac{(2m_r)^{3/2}}{2\pi^2\hbar^3}(\hbar\omega - E_g)^{1/2}$

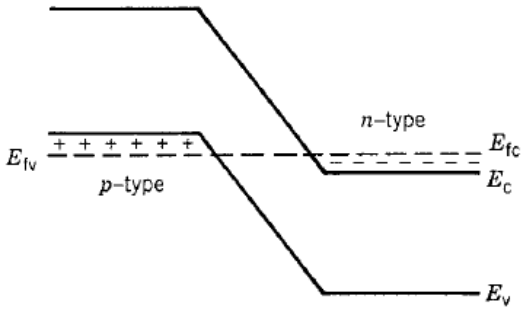
Inversão de população

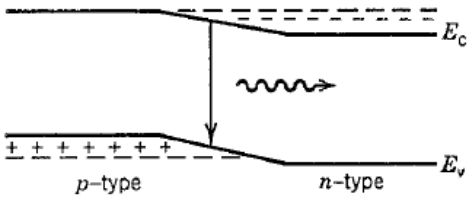
$$R_{stim} > R_{abs}$$

Transmissores Ópticos

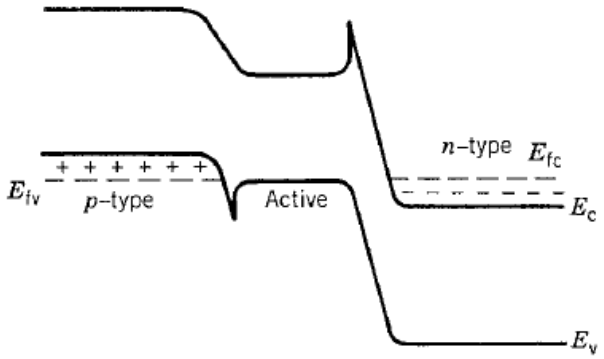
Junções P-N

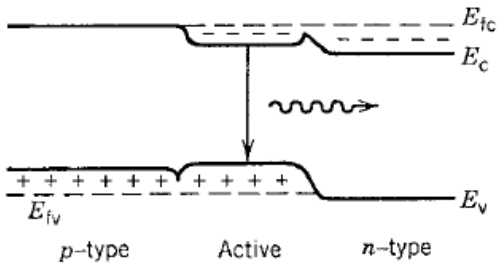
Homo- Junções





Hetero - Junções





- Camada ativa com a menor banda proibida
- Maior índice de refração
- Esta região se comporta como guia de onda

Transmissores Ópticos

Características Elétricas e ópticas das heteroestruturas

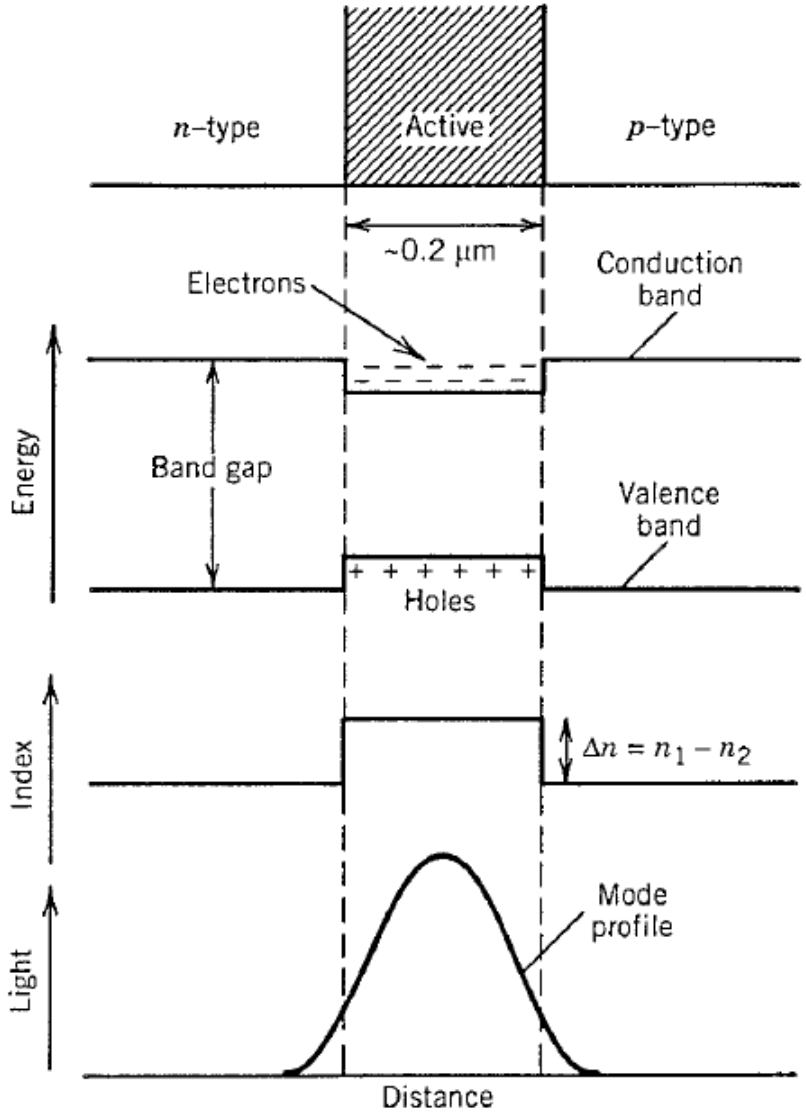


Diagrama de bandas de energia

Perfil do índice de refração

Perfil do modo guiado na camada ativa

Transmissores Ópticos

Recombinação radiativa, não radiativa e eficiência quântica da fonte de emissão de luz

Recombinação não radiativa "R_{nr}" →

- Armadilhas e defeitos no semicondutor
- Recombinação Auger

↓

Contribuição importante em semicondutores com banda proibida pequena (1,3 a 1,6 μm)

Eficiência quântica interna

$$\eta_{\text{int}} = \frac{R_{\text{rr}}}{R_{\text{tot}}} = \frac{R_{\text{rr}}}{R_{\text{rr}} + R_{\text{nr}}}$$

$$\eta_{\text{int}} = \frac{\tau_{\text{nr}}}{\tau_{\text{rr}} + \tau_{\text{nr}}}$$

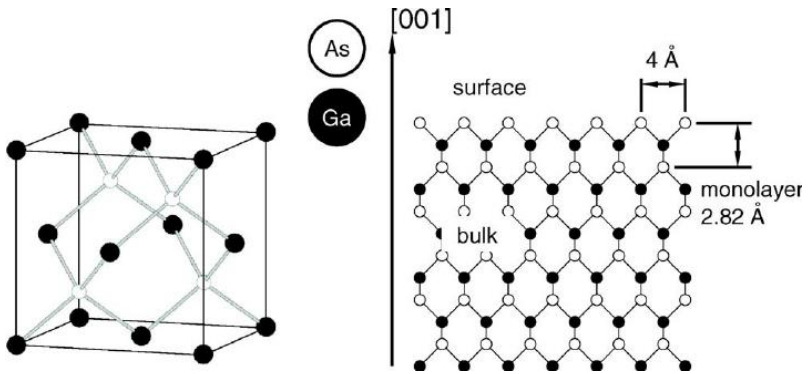
Diodos LED: $\eta_{int} \cong 0{,}5$

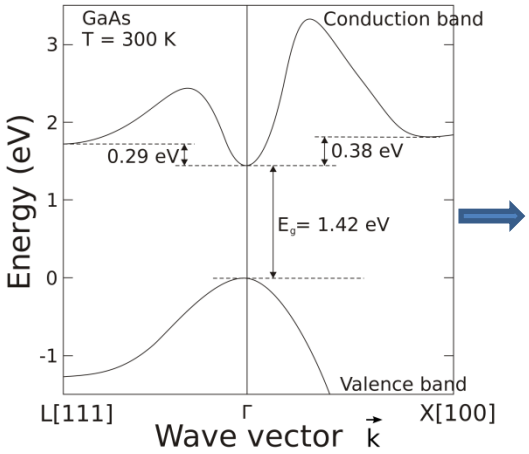
Diodos Laser: $\eta_{int} \cong 1$

Transmissores Ópticos

Materiais Semicondutores utilizados na fabricação de diodos e Lasers

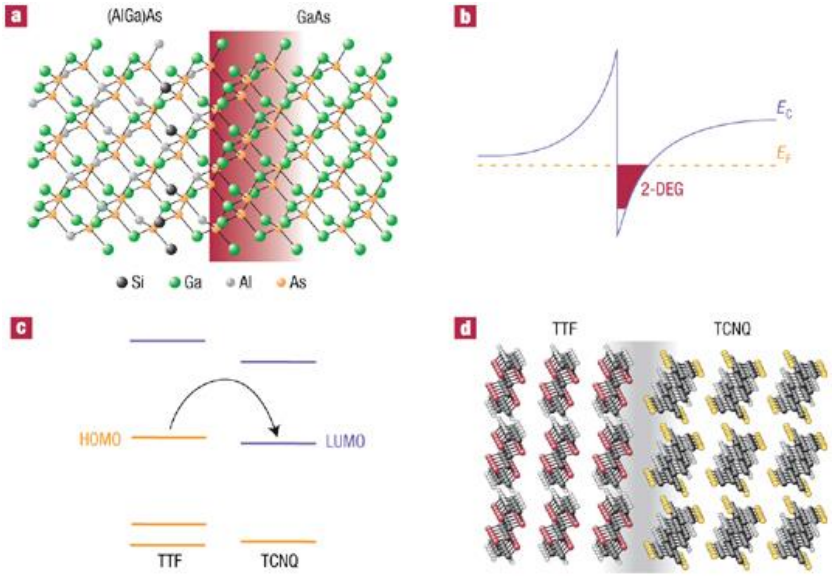
Semicondutor baseados em GaAs: Utilizados na primeira geração de sistemas de comunicação óptica





GaAS:

- Banda proibida direta E_g = 1, 424 eV ≅ 0,87 μm



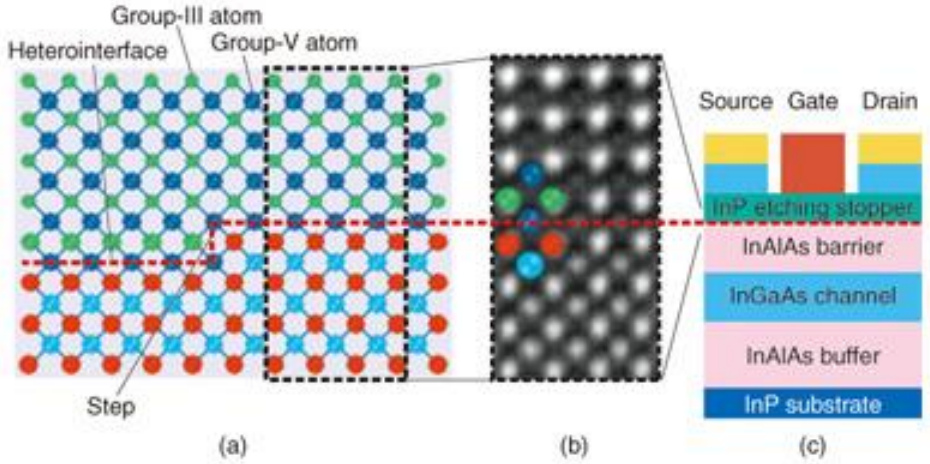
$Al_xGa_{1-x}AS$:

- Banda proibida direta
- E_g = 1, 42 + 1,247x (eV)
- Para x = 0,1 → E_g ≅ 0,87 μm

Transmissores Ópticos

Materiais Semicondutores utilizados na fabricação de diodos e Lasers

Semicondutor baseados em InP: Utilizados na segunda geração de sistemas de comunicação óptica



In P

- Banda proibida direta E_g = 1,35 eV (0,918 μm)

$$\mathbf{In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}}$$

- Banda proibida direta $E_g = 1,35 - 0,724y + 0,12y^2$ (eV)

→ Região de operação: 1, 3 – 1,6 μm

Transmissores Ópticos

Materiais Semicondutores utilizados na fabricação de diodos e Lasers

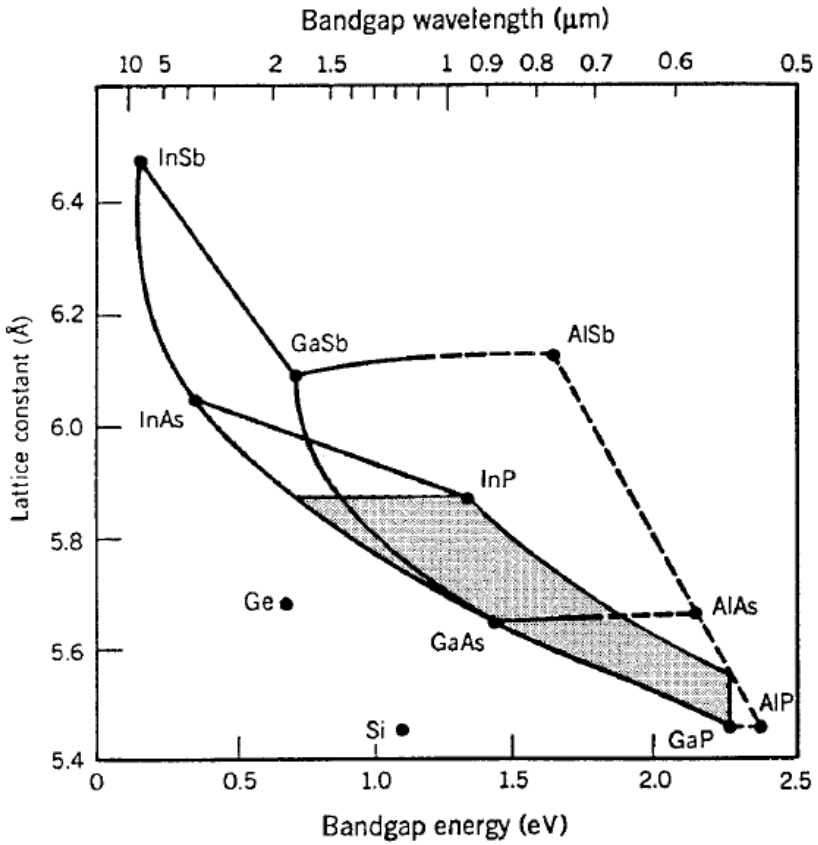
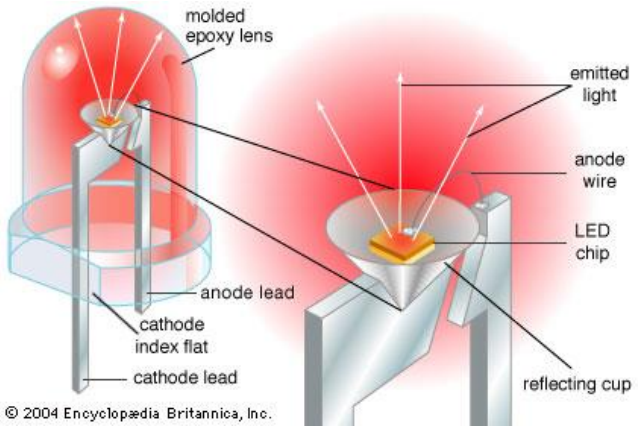


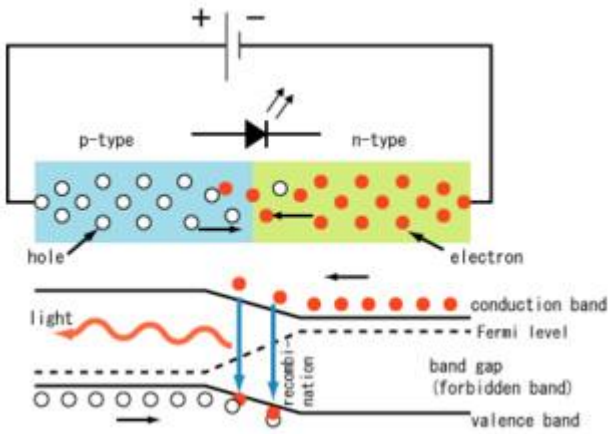
Diagrama da constante de rede e a banda proibida em compostos de semicondutores baseados em semicondutores do grupo III - V

Transmissores Ópticos

Diodos Emissores de Luz

- Operação em polarização direta da junção PN
- Efeito de emissão eletroluminescente (LED)
- Emissão de luz espontânea
- Recombinação radiativa na região de depleção
- Luz emitida incoerente com largura espectral larga (20 a 30 nm)
- Apertura angular grande





Transmissores Ópticos

Diodos Emissores de Luz: Características de Potência de emissão

Potencia óptica interna:

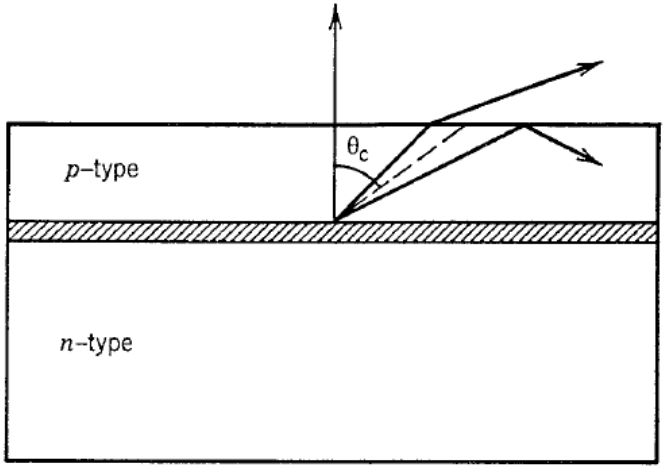
$$P_{\text{int}} = \eta_{\text{int}}(\hbar\omega/q)I,$$

Potencia emitida (externa):

$$P_e = \eta_{\text{ext}} P_{\text{int}} = \eta_{\text{ext}}\eta_{\text{int}}(\hbar\omega/q)I.$$

Eficiência quântica interna

Eficiência quântica externa



Transmissividade de Fresnel

$$\eta_{\text{ext}} = \frac{1}{4\pi}\int_0^{\theta_c} T_f(\theta)(2\pi\sin\theta)\,d\theta$$

$$T_f(0) = 4n/(n+1)^2$$

$$\eta_{\text{ext}} = n^{-1}(n+1)^{-2}$$

Em semicondutores n = 3,5 $\Rightarrow$ η_{ext} = 1,4%

Transmissores Ópticos

Diodos Emissores de Luz: Características de Potência de emissão

Medida do desempenho do diodo LED

Eficiência quântica total:

$$\eta_{total} = \frac{potência\ optica\ emitida}{potência\ eletrica\ aplicada} = \frac{P_e}{P_{eletr}}$$

$$\eta_{\text{tot}} = \eta_{\text{ext}}\eta_{\text{int}}(\hbar\omega/qV_0)$$

Responsividade do diodo LED:

$$R_{LED} = \frac{P_e}{I}$$

$$R_{\text{LED}} = \eta_{\text{ext}}\eta_{\text{int}}(\hbar\omega/q)$$

Valores típicos: R_{LED} = 0,01W/A

Transmissores Ópticos

Diodos Emissores de Luz (LED): Espectro de emissão

Taxa de emissão espontânea: $$R_{\text{spon}}(\omega) = \int_{E_c}^{\infty} A(E_1, E_2) f_c(E_2)[1 - f_v(E_1)]\rho_{cv}\, dE_2$$

$$\boxed{R_{\text{spon}}(\omega) = A_0(\hbar\omega - E_g)^{1/2} \exp[-(\hbar\omega - E_g)/k_B T]}$$

Pico em: $\hbar\omega = E_g + k_B T/2$

A temperatura de T = 300 ^{o}K, λ = 1,3 μm $\Rightarrow \Delta\lambda$ = 50 – 60 nm

Transmissores Ópticos

Diodos Emissores de Luz (LED): Resposta à modulação

Equação da taxa de variação de portadores:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{qV} - \frac{N}{\tau_c}$$

- **V: Volume da região ativa**
- **N: densidade de portadores**
- **τ_C: tempo de vida dos portadores**

Intensidade de corrente de modulação: $I(t) = I_b + I_m \exp(i\omega_m t)$

Corrente de polarização ← I_b ; $I_m \exp(i\omega_m t)$ → Corrente de modulação

Solução da equação diferencial:

$$N(t) = N_b + N_m \exp(i\omega_m t)$$

$$\begin{cases} N_b = \tau_c I_b / qV \\ N_m(\omega_m) = \dfrac{\tau_c I_m / qV}{1 + i\omega_m \tau_c} \end{cases}$$

Função de transferência do diodo LED:

$$H(\omega_m) = \frac{N_m(\omega_m)}{N_m(0)} = \frac{1}{1 + i\omega_m \tau_c}$$

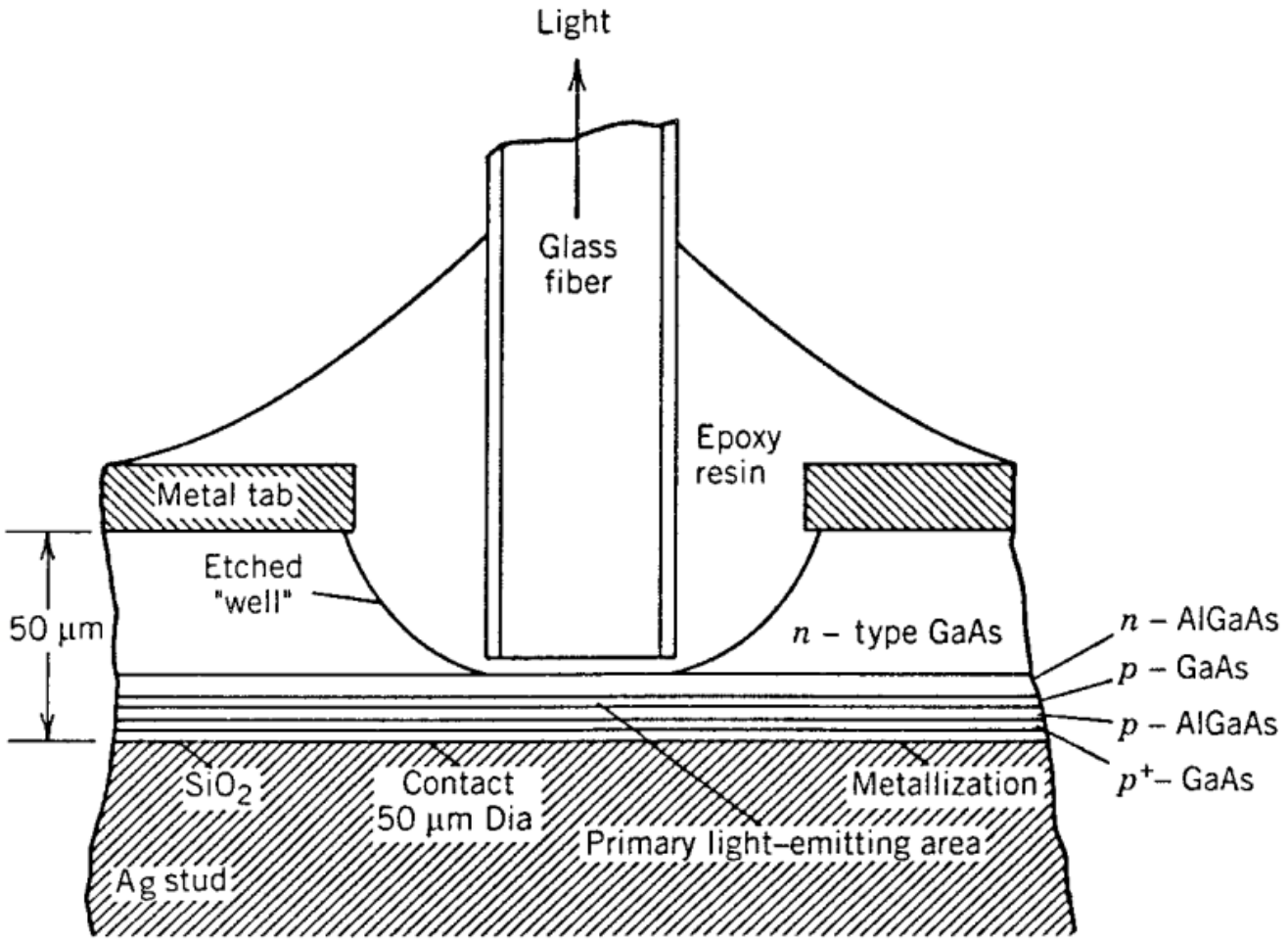
Frequência de corte do diodo LED:

$$f_{3\,\mathrm{dB}} = \sqrt{3}\,(2\pi\tau_c)^{-1}$$

Para LEDs de InGaAsP: τ_C = 2 -5 ns → f_{3dB} = 50 – 140 MHz

Transmissores Ópticos

Diodos Emissores de Luz (LED): Estrutura de um diodo LED



Transmissores Ópticos

Fontes Laser de Semicondutores

- Baseados em emissão estimulada
- Luz coerente
- Largura espectral estreita
- Eficiência de acoplamento de 50 %
- Elevada taxa de bits B = 10Gb/s
- Frequência de modulação elevada: 25 GHz

Fontes Laser de Semicondutores

Ganho óptico

Fator de amplificação na região ativa: $G = exp(gz)$ g: coeficiente de ganho

Pico do ganho:

$$g_p(N) = \sigma_g(N - N_T)$$

ou

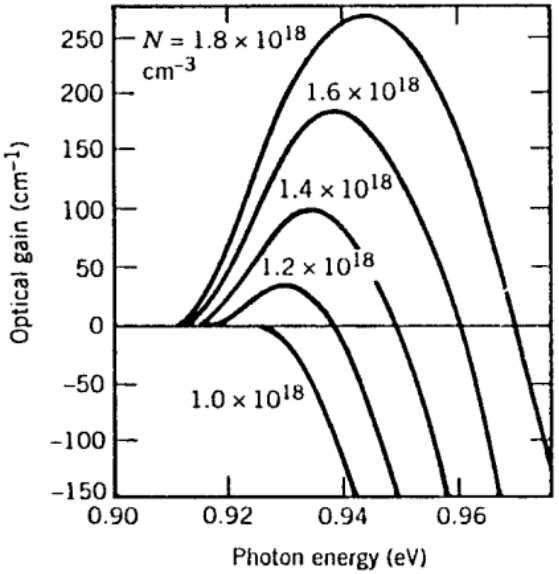
$$g_p(N) = g_0[1 + \ln(N/N_0)]$$

N: concentração de portadores

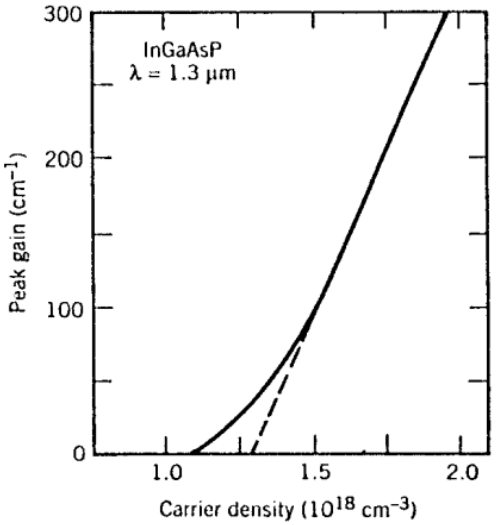
$N_T = 1\ a\ 1{,}5x10^{18}cm^{-3}$

$\sigma_g = 2\ a\ 3x10^{-16}cm^2$

$N_0 = eN_T = 2{,}718N_T$



Espectro do ganho óptico

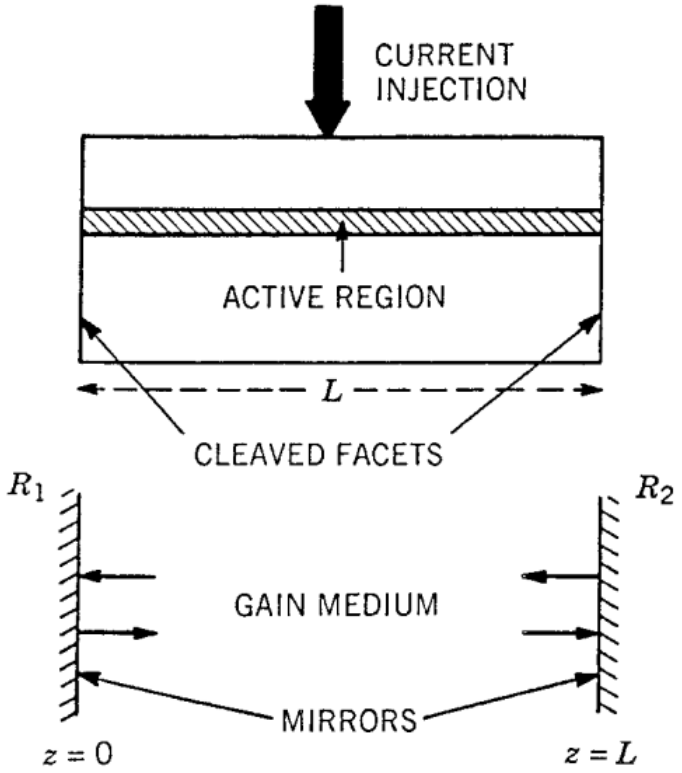


Máximo do ganho em função da concentração de portadores injetado

Fontes Laser de Semicondutores

Retro Alimentação e Limiar Laser

Principio de emissão Laser esta baseado na retro alimentação e ganho óptico
Cavidade ressonante: retroalimentação
Injeção elétrica de portadores : ganho



Reflexão dos espelhos: $R_m = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2$

Semicondutores: n =3,5 ⟶ R =30%

Condição de limiar para o efeito Laser

$$g = \alpha_{\text{int}} + \frac{1}{2L}\ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right) = \alpha_{\text{int}} + \alpha_{\text{mir}} = \alpha_{\text{cav}}$$

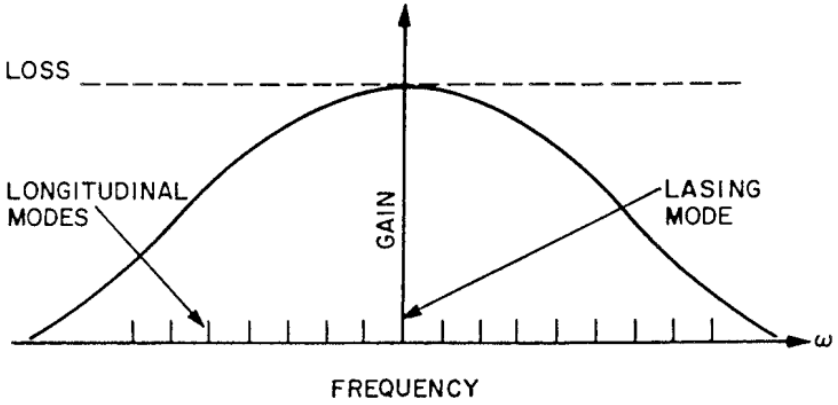
Condição ressonante da cavidade

$$2kL = 2m\pi$$

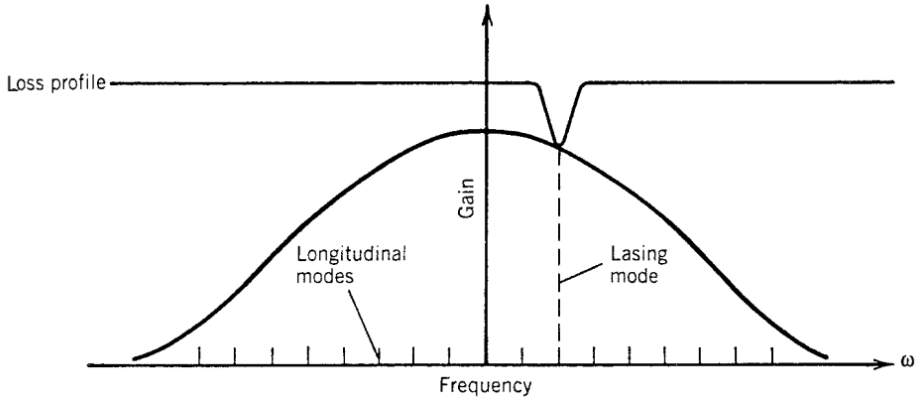
$$\nu = \nu_m = mc/2nL$$

Fontes Laser de Semicondutores

Retro Alimentação e Limiar Laser



Representação espectral do ganho óptico e dos diferentes modos de oscilação da cavidade



Representação espectral do ganho óptico, dos diferentes modos de oscilação da cavidade e perda sintonizável para controlar o modo desejado

Figura de mérito do desempenho de emissão laser de modo singular na cavidade

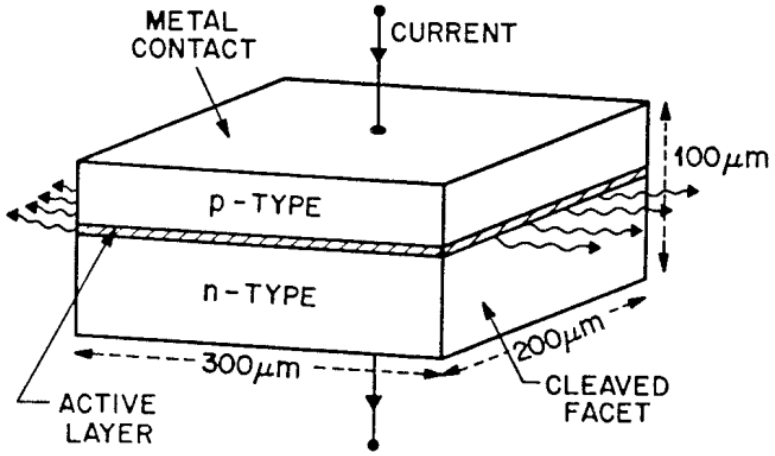
MSR: Taxa de supressão de modo

$$\mathrm{MSR} = P_{\mathrm{mm}}/P_{\mathrm{sm}}$$

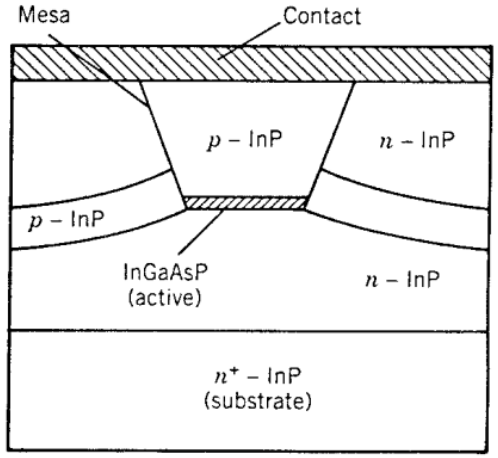
P_{mm}: Potência do modo principal
P_{Sm}: Potência do modo lateral

MSR $\geq$ 1000 (30 dB)

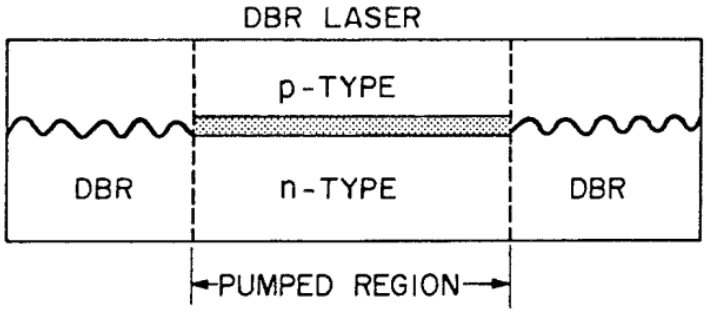
Fontes Laser de Semicondutores



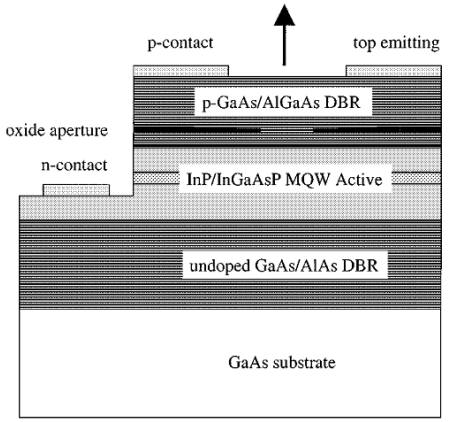
Laser com estrutura sandwich: Laser FP
FP: interferômetro Fabry-Perot



Laser com camada enterrada ativa como guia de onda



Laser com refletores Bragg: Laser DFB



Laser com cavidade vertical (VCSEL)

Características do Laser

Características do Laser de Emissão Continua (CW)

Taxa de variação de fótons na camada ativa:

$$\frac{dP}{dt} = GP + R_{sp} - \frac{P}{\tau_p}$$

Taxa de variação de elétrons na camada ativa:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{q} - \frac{N}{\tau_c} - GP,$$

τ_p: Tempo de vida dos fótons
τ_c: Tempo de vida dos portadores
Γ: fator de confinamento
v_g: velocidade de grupo
g_m: ganho óptico do material

Taxa de emissão estimulada:

$$G = \Gamma v_g g_m = G_N(N - N_0)$$

Taxa de emissão espontânea:

$$R_{sp} = n_{sp} G$$

Tempo de vida dos fótons:

$$\tau_p^{-1} = v_g \alpha_{cav} = v_g(\alpha_{mir} + \alpha_{int})$$

Corrente de limiar para gerar o efeito laser:

$$I_{th} = \frac{qN_{th}}{\tau_c} = \frac{q}{\tau_c}\left(N_0 + \frac{1}{G_N \tau_p}\right)$$

Número de fótons em função da corrente :

$$P = (\tau_p/q)(I - I_{th})$$

Potência emitida por um laser FP :

$$P_e = \tfrac{1}{2}(v_g \alpha_{mir})\hbar\omega P.$$

Potência emitida por um laser DFB :

$$P_e = \frac{\hbar\omega}{2q}\frac{\eta_{int}\alpha_{mir}}{\alpha_{mir} + \alpha_{int}}(I - I_{th})$$

Características do Laser

Características do Laser de Emissão Continua (CW)

A corrente de limiar depende da temperatura: $I_{\text{th}}(T) = I_0 \exp(T/T_0)$

$T_0 \cong 120$ K para GaAs

Inclinação da curva P_e -I então inclinação de eficiência: $\frac{dP_e}{dI} = \frac{\hbar\omega}{2q}\eta_d$

Eficiência diferencial: $\eta_d = \frac{\eta_{\text{int}}\alpha_{\text{mir}}}{\alpha_{\text{mir}} + \alpha_{\text{int}}}$

Eficiência quântica externa

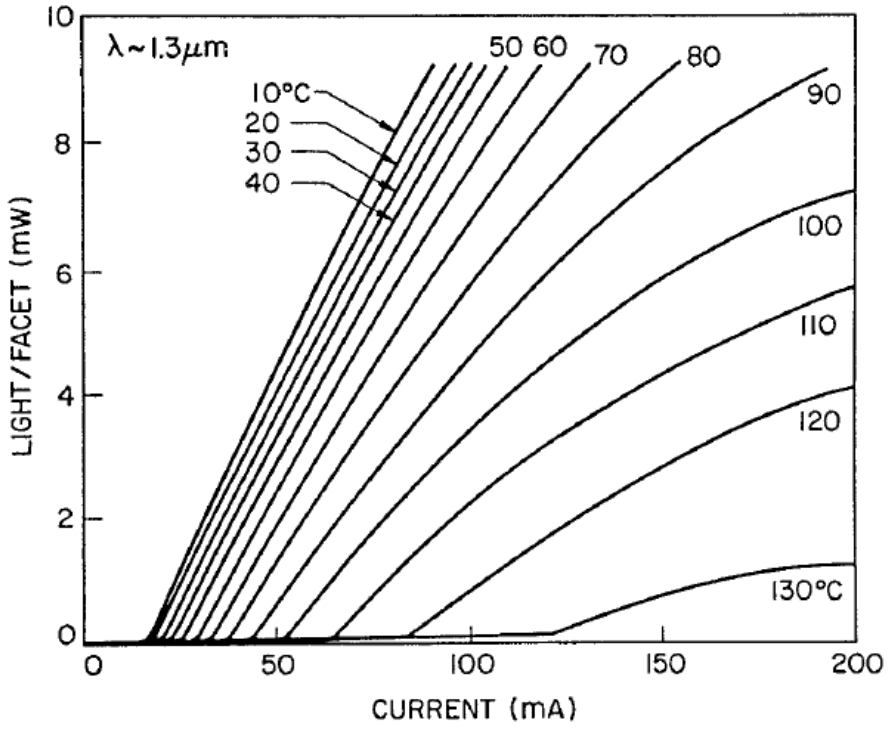
$$\eta_{ext} = \frac{taxa\ de\ emissão\ de\ fótons}{taxa\ de\ injeção\ de\ elétrons} = \frac{2P_e/\hbar\omega}{I/q} = \frac{2q}{\hbar\omega}\frac{P_e}{I}$$

$$\eta_{\text{ext}} = \eta_d(1 - I_{\text{th}}/I)$$

Eficiência quântica total

$$\eta_{tot} = \frac{\boldsymbol{P_e}}{\boldsymbol{P_{eletrica(max)}}} = \frac{\boldsymbol{2P_e}}{\boldsymbol{V_0 I}}$$

$$\eta_{\text{tot}} = \frac{\hbar\omega}{qV_0}\eta_{\text{ext}} \approx \frac{E_g}{qV_0}\eta_{\text{ext}}$$



Curva da potência de emissão óptica vs a corrente injetada do Laser de InGaAsP com camada ativa enterrada.

Características do Laser

Modulação de pequenos sinais

$$\begin{cases} \dfrac{dP}{dt} = GP + R_{sp} - \dfrac{P}{\tau_p} \\ \dfrac{dN}{dt} = \dfrac{I}{q} - \dfrac{N}{\tau_c} - GP, \\ I(t) = I_b + I_m f_p(t) \end{cases}$$

Para $f_p(t) = \sin(\omega_m t)$:

$$P(t) = P_b + |p_m| \sin(\omega_m t + \theta_m)$$

$$N(t) = N_b + |n_m| \sin(\omega_m t + \psi_m)$$

Função de transferência:

$$H(\omega_m) = \frac{p_m(\omega_m)}{p_m(0)} = \frac{\Omega_R^2 + \Gamma_R^2}{(\Omega_R + \omega_m - i\Gamma_R)(\Omega_R - \omega_m + i\Gamma_R)}$$

Frequência de corte:

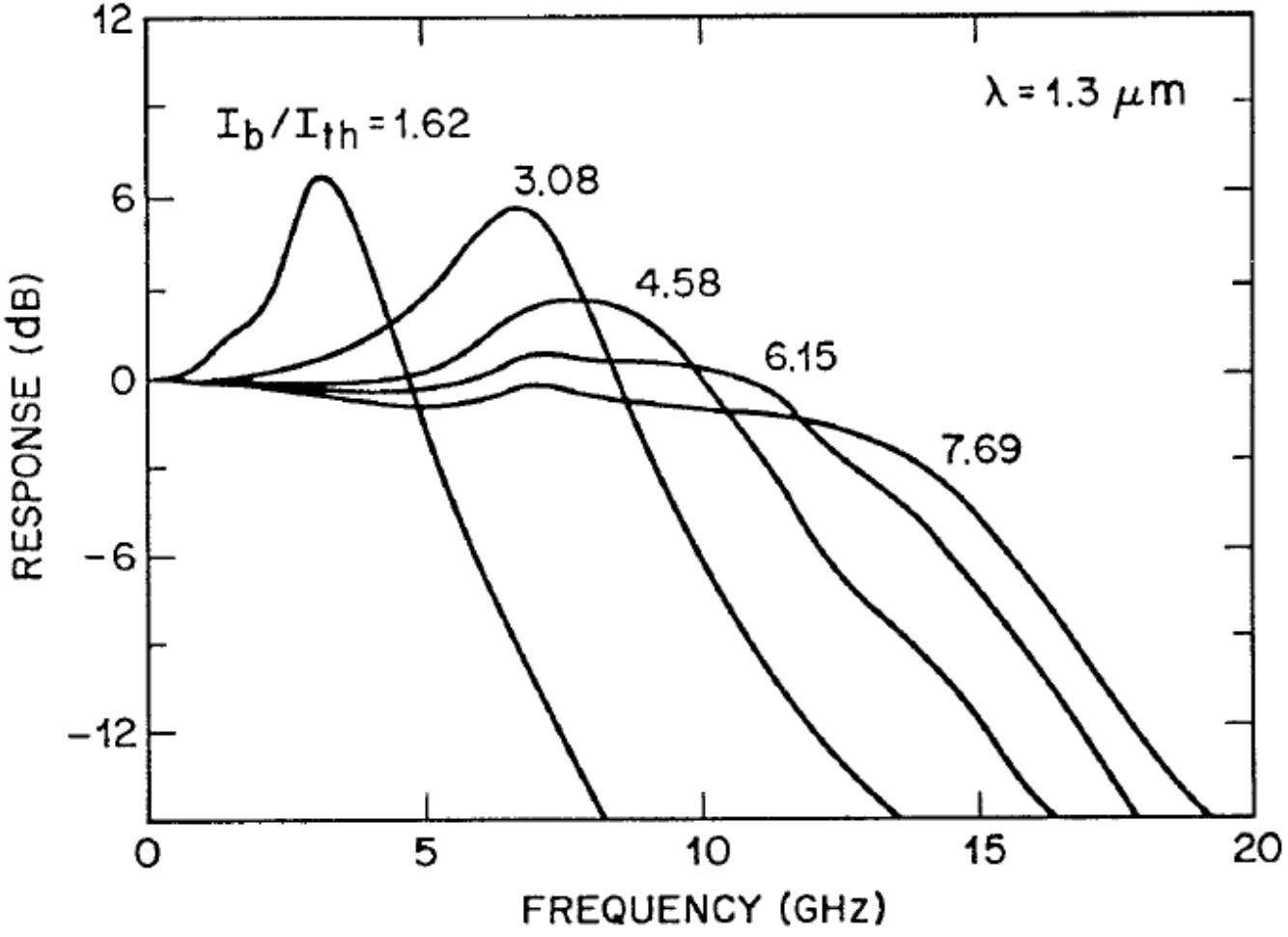
$$f_{3\,\mathrm{dB}} = \frac{1}{2\pi}\left[\Omega_R^2 + \Gamma_R^2 + 2(\Omega_R^4 + \Omega_R^2\Gamma_R^2 + \Gamma_R^4)^{1/2}\right]^{1/2}$$

Para $\Gamma_R \ll \Omega_R$

$$f_{3\,\mathrm{dB}} \approx \frac{\sqrt{3}\Omega_R}{2\pi} \approx \left(\frac{3G_N P_b}{4\pi^2 \tau_p}\right)^{1/2} = \left[\frac{3G_N}{4\pi^2 q}(I_b - I_{th})\right]^{1/2}$$

Características do Laser

Modulação de pequenos sinais



Resposta em frequência de um laser DFB em 1,55 μm para pequenos sinais de modulação

Características do Laser

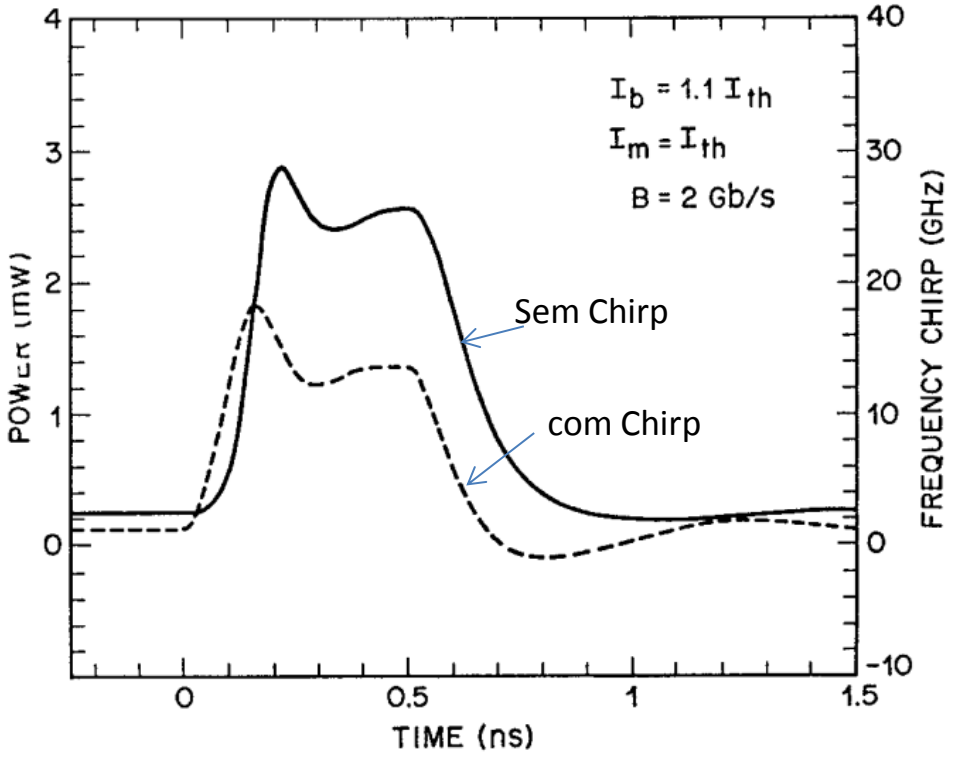
Modulação de grandes sinais

$I_b = 1{,}1 I_{th}$

$I_m = I_{th}$

Solução numérica das equações

$$\begin{cases} \dfrac{dP}{dt} = GP + R_{sp} - \dfrac{P}{\tau_p} \\ \dfrac{dN}{dt} = \dfrac{I}{q} - \dfrac{N}{\tau_c} - GP, \end{cases}$$

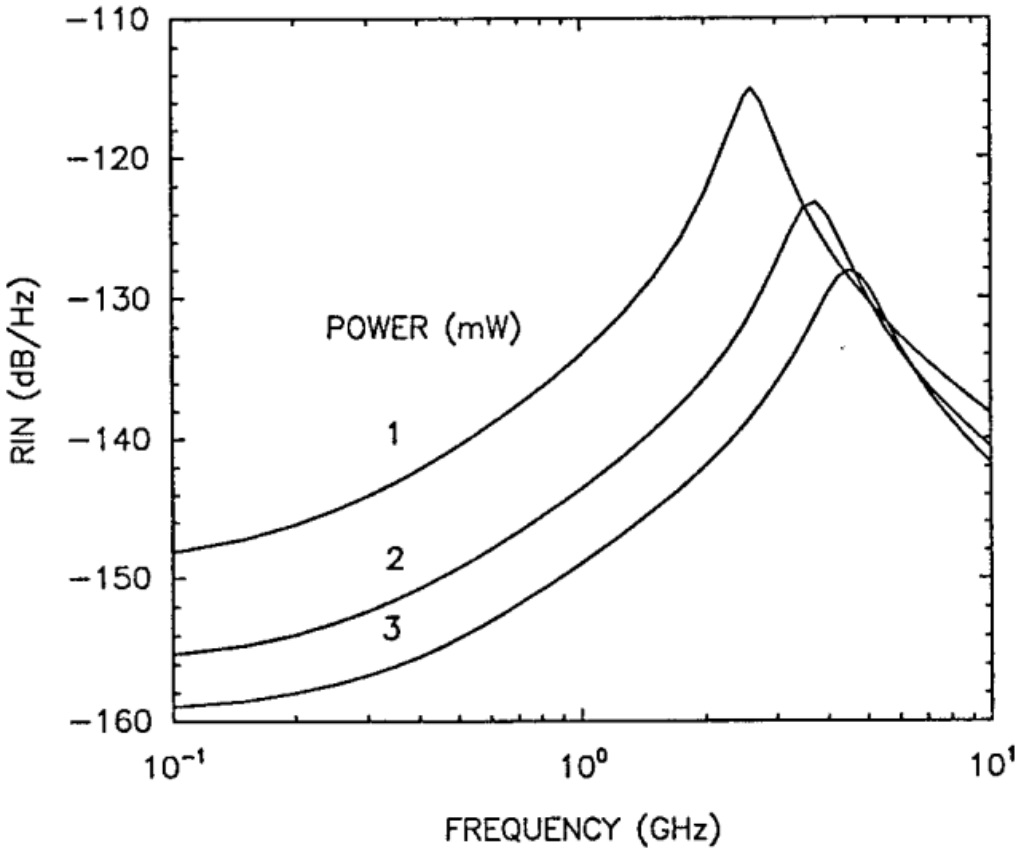


Modulação de 2Gb/s

Potência óptica para uma modulação com um pulso quadrado de 500 ps

Características do Laser

Intensidade Relativa do Ruído (RIN)



Espectro do parâmetro RIN do laser a semicondutor de 1,55 µm

Características do Laser

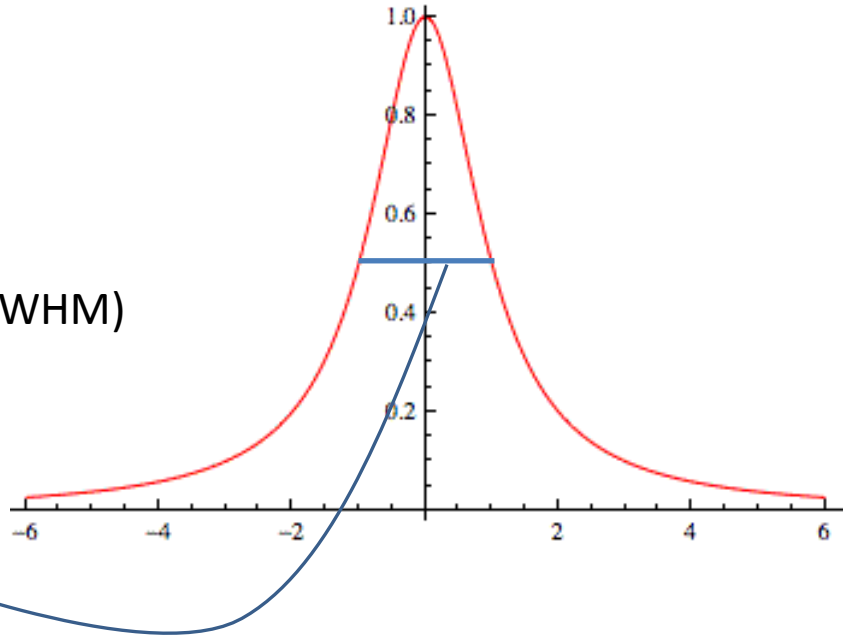
Largura Espectral do Sinal Óptico Emitido

Espectro da luz emitida: $$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \Gamma_{EE}(t) \exp[-i(\omega - \omega_0)\tau]\, d\tau$$

Auto correlação do campo elétrico: $$\Gamma_{EE}(t) = \langle \exp[i\Delta\phi(t)] \rangle = \exp[-\langle \Delta\phi^2(\tau) \rangle / 2]$$

Função espectral Lorentziana

$$S(\omega) = \frac{1}{\pi} \frac{\frac{1}{2}\Gamma}{(\omega - \omega_0)^2 + \left(\frac{1}{2}\Gamma\right)^2}$$

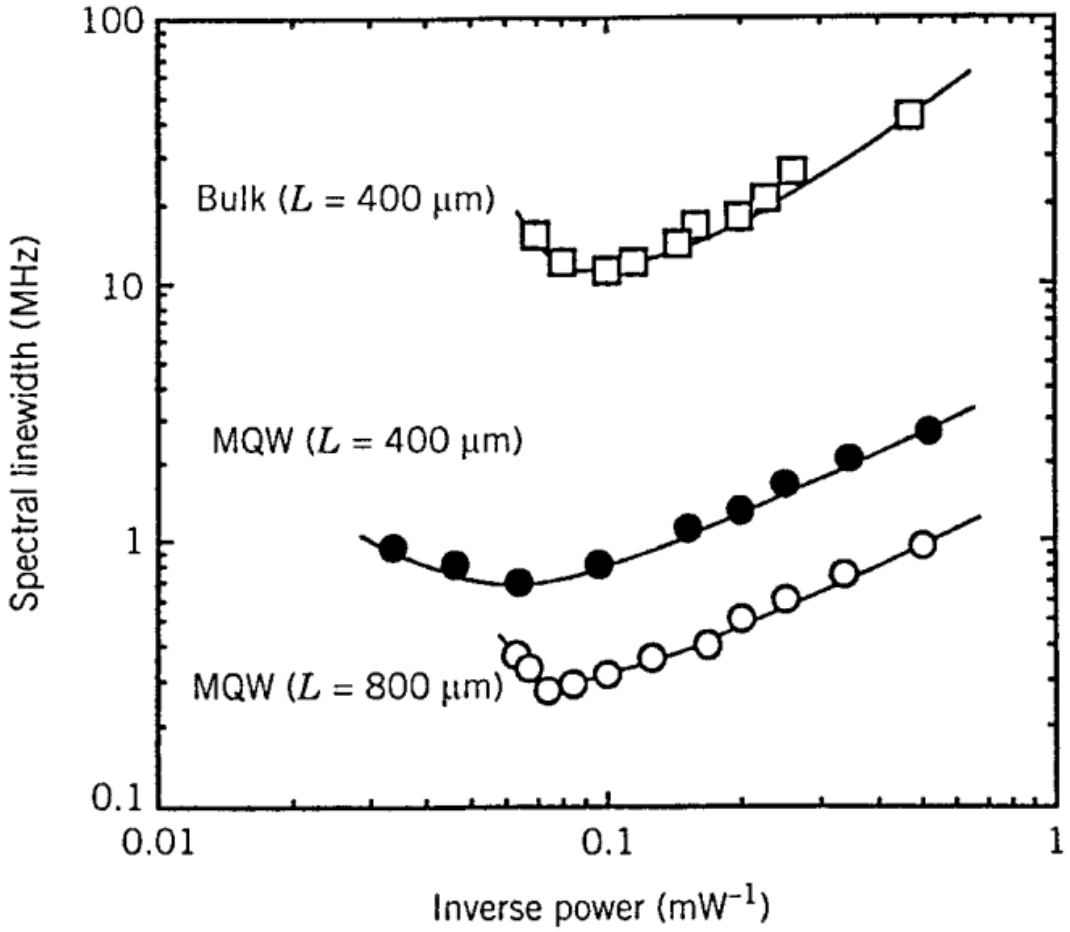


Largura espectral: Largura máxima a meia altura (FWHM)

$$\Gamma/2\pi = \Delta\nu = R_{sp}(1 + \beta_c^2)/(4\pi\bar{P})$$

Características do Laser

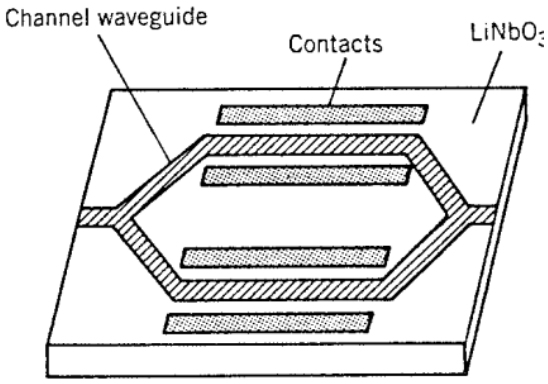
Largura Espectral do Sinal Óptico Emitido

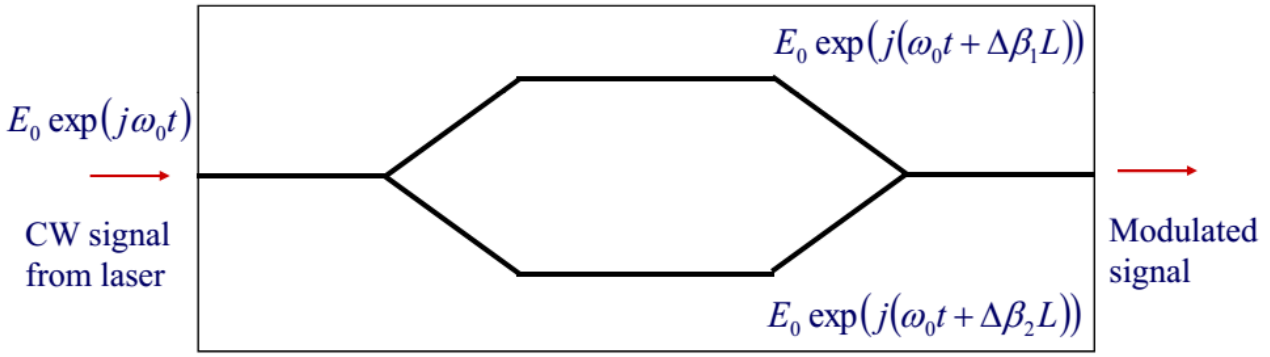


Largura espectral como função da potência emitida de diferentes Laser DFB (1,55 μm)

Moduladores Ópticos

Modulador tipo Mach - Zehnder





Sinal de saída do modulador:

$$E(V_1, V_2) = E_0 \cos\left[\left(\frac{\Delta\beta_2 - \Delta\beta_1}{2}\right)L\right] \exp\left[j\left(\frac{\Delta\beta_2 + \Delta\beta_1}{2}\right)L\right]$$

Constante de propagação em cada braço:

$$\Delta\beta_i = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_i$$

Índice de refração em cada braço em função da polarização elétrica:

$$n_i = n_0 + \eta_i V(t)$$

Moduladores Ópticos

Modulador tipo Mach - Zehnder

Intensidade do sinal modulado:

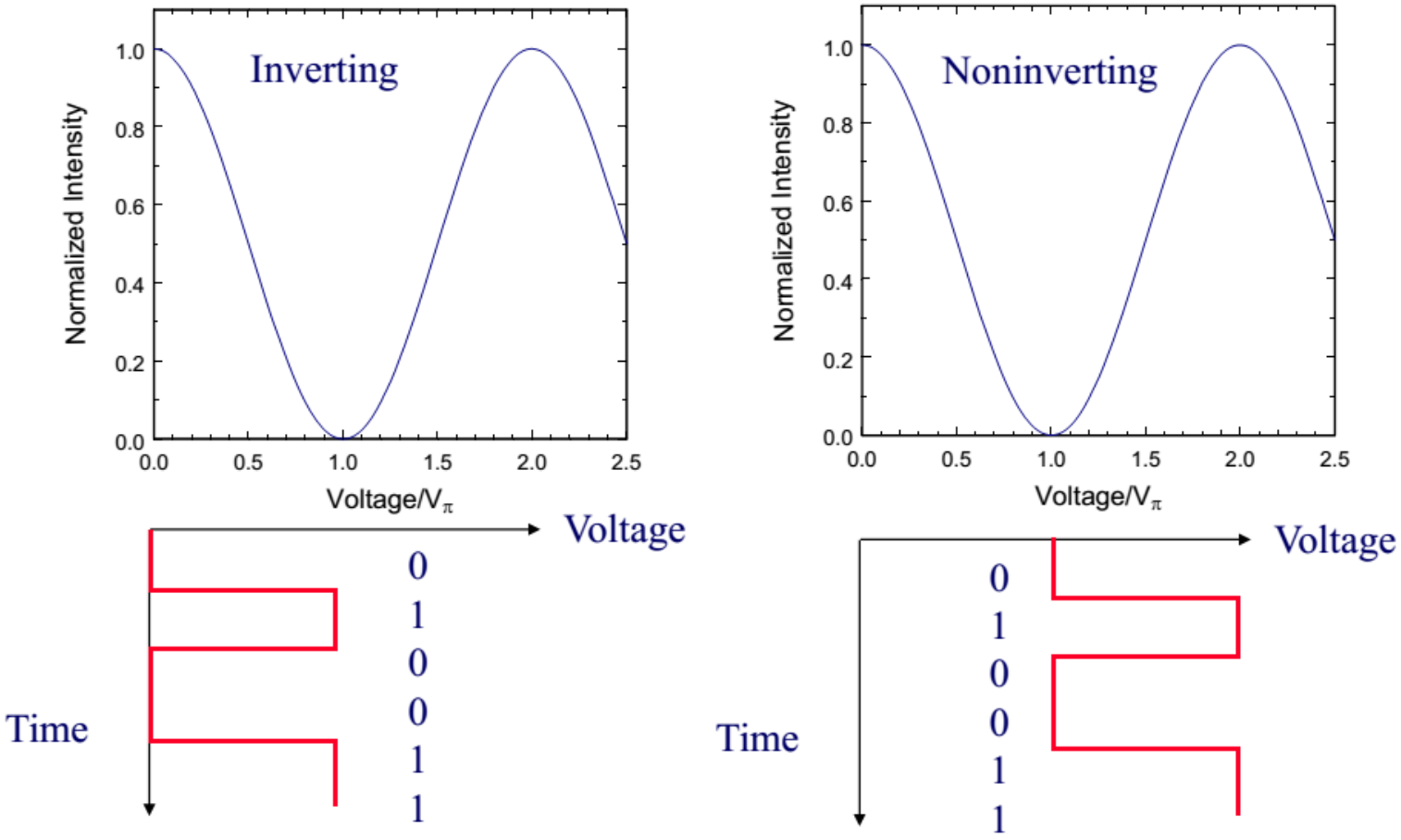
$$\begin{cases} I(V_1(t), V_2(t)) = \dfrac{E_0^2}{2}\left[1+\cos\left(\dfrac{\pi}{V_\pi}\left(V_2(t)-V_1(t)\right)\right)\right] \\ V_\pi = \dfrac{\lambda_0}{2L\eta} \end{cases}$$

Fase de batimento (CHIRP):

$$\begin{cases} \phi_{chirp}(V_1(t), V_2(t)) = \dfrac{\pi\eta L}{\lambda_0}\left[V_2(t)+V_1(t)\right] \\ \eta_2 = \eta_1 = \eta \end{cases}$$

Frequência de batimento:

$$\Delta\nu(t) = \frac{1}{4V_\pi}\left[\frac{dV_2(t)}{dt}+\frac{dV_1(t)}{dt}\right]$$

Moduladores Ópticos

Modulador tipo Mach - Zehnder