Fontes Ópticas
- Tipos e principais características -

- As principais fontes ópticas utilizadas em comunicações ópticas são o **LED** (***l**ight **e**mitting **d**iode*) e o **LD** (***L**aser **d**iode* que funciona segundo o princípio LASER - ***l**ight **a**mplification by **s**timulated **e**mission of **r**adiation*),
  - são dispositivos a semicondutor baseados em heterojunções;

- Principais características:
  - Largura de banda;
  - Potência óptica;
  - Comprimento de onda de emissão;
  - Perdas de acoplamento;
  - Largura espectral;
  - Custo e fiabilidade.

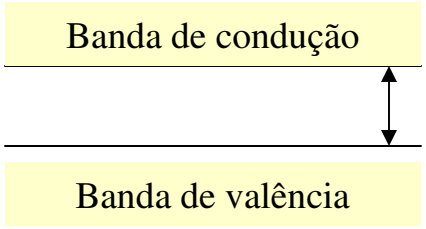
Potência óptica:
- LED: P_{opt} de 10 a 100 μW
- LD: P_{opt} de 1 a 5 mW

Largura espectral:
- LED: $\Delta\lambda$ de 10 nm até $0{,}1\lambda_0$
- LD: $\Delta\lambda$ de 10^{-5} nm a 5 nm

Uma definição usual de largura espectral (em termos de $\Delta\lambda$) corresponde ao intervalo limitado pelos pontos em que potência desce a metade do seu valor máximo (-3 dB) – FWHM, *full width at half maximum.*

As fontes ópticas (LED's e LD's) não são monocromáticas, i.e. não emitem um único comprimento de onda; emitem radiação numa largura espectral $\Delta\lambda$ ou $\Delta\nu$.

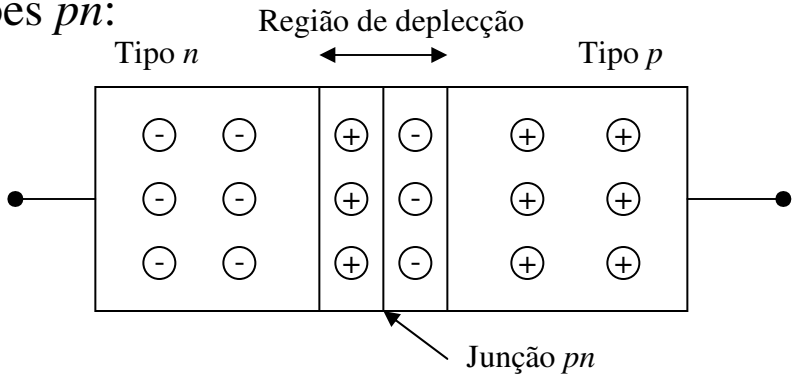
Tópicos sobre semicondutores



Diferença energética entre bandas ou níveis (*energy gap*), E_g

- Bandas de energia:
  - banda de condução, banda de valência.
  - recombinação e geração de pares electrões/lacunas (fenómenos opostos);
  - a condutividade de um semicondutor pode ser aumentada introduzindo impurezas no material - materiais do tipo *n* ou tipo *p*;
  - portadores maioritários e minoritários.

- Junções *pn*:

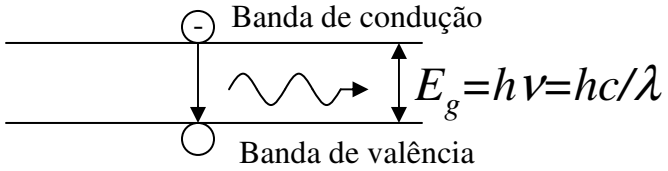


Junção polarizada directamente:
• a região de deplecção diminui;
• mecanismo de geração da radiação óptica - **fontes ópticas**.

Junção polarizada inversamente:
• a região de deplecção alarga;
• mecanismo de absorção da radiação óptica - **fotodetectores**.

Díodos Emissor de luz (LED)

- Estrutura física do LED:
  - é constituído por uma heterojunção
  - a emissão de radiação é feita por emissão espontânea
    - Quando temos uma polarização directa temos difusão de portadores os quais se recombinam de forma radiante (emissão de fotões) ou não-radiante (não há emissão de fotões).



- Parâmetros mais importantes:
  - Rendimento quântico e potência
  - Modulação
- Utilização:
  - sistemas de curta distância usando fibras ópticas multimodais principalmente em transmissão de dados em 850 e 1300 nm (1ª e 2ª janela);
  - Ritmos binários até 200 Mbit/s (LAN's)
- Materiais:
  - 1ª janela: GaAlAs, σ_λ = 35 nm (valor típico);
  - 2ª e 3ª janelas: InGaAsP, σ_λ = de 70 nm a 180 nm.

LED : rendimento quântico interno

- Decaimento exponencial do excesso de portadores: $N(t) = N_0 e^{-t/\tau}$
  - *N*, portadores em excesso
  - τ, tempo de vida dos portadores

- Taxa de recombinação de portadores [s^{-1}]: $R_{total} = I/q$ $R_{total} = N/\tau$
  - *I/q,* taxa de injecção de portadores

- Rendimento quântico interno:
  - Quando portadores são injectados na junção podem-se recombinar de forma radiante e não-radiante, sendo:

    $R_{rad} = N/\tau_{rad}$ $R_{n-rad} = N/\tau_{n-rad}$ $R_{total} = R_{rad} + R_{n-rad}$
    - Rendimento quântico interno: $\eta_{\text{int}} = R_{rad}/R_{total}$

- Potência óptica interna: $P_{\text{int}} = \eta_{\text{int}}(h\nu)R_{total} = \eta_{\text{int}} h\nu \frac{I}{q}$ $[J \cdot s^{-1} = W]$

LED : rendimento externo

- Apenas a radiação fotónica dentro do ângulo θ_c sai para o exterior do LED, sendo $T(\phi)$ o *coeficiente de trasmissividade de Fresnel* (ver [Keiser pp. 159]) .

$$\eta_{ext} = \frac{1}{4\pi}\int_0^{\theta_c} T(\phi) 2\pi \sin(\theta) \partial\phi$$

- No caso do meio exterior ser o ar (com índice de refracção n):

$$\eta_{\text{ext}} \approx \frac{1}{n(n+1)^2}$$

Assim, a potência de emissão de um LED é:

$$P_e = \eta_{ext} \cdot P_{\text{int}} = \eta_{ext}\eta_{\text{int}} h\nu \frac{I}{q}$$

LED: resposta em frequência sob modulação

Considerando que o LED é modulado directamente por uma corrente

$$I(t)=I_b+I_0\cos(\omega t)$$

e sendo P_0 a potência óptica em ω=0 e τ o tempo de vida dos portadores de carga tem-se:

$$P(\omega) = P_0 \Big/ \sqrt{1+(\omega\tau)^2}$$

A resposta é condicionada por: grau de dopagem da região activa; tempo de vida dos portadores e da capacitância parasita no LED.

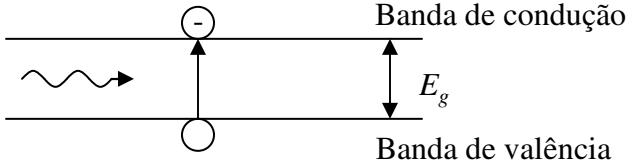
Atenção: a FWHM é diferente quando definida no domínio óptico e no domínio eléctrico! [ver Keiser pp. 160-161] uma vez que:

$$\frac{P_{opt}(\omega_F)}{P_{opt}(0)} = \frac{I(\omega_F)}{I(0)} = \frac{1}{2} \qquad \frac{P_{elec}(\omega'_F)}{P_{elec}(0)} = \frac{I^2(\omega'_F)}{I^2(0)} = \frac{1}{2}$$

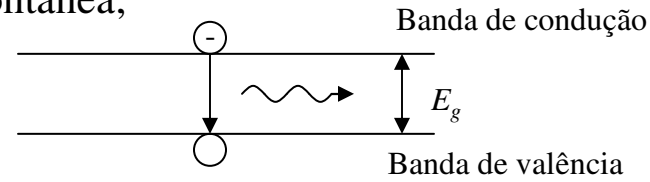
(**Nota:** *F* refere a frequência associada à FWHM. A mesma simbologia é usada em $\Delta\lambda_F$ e $\Delta\nu_F$.)

Díodo Laser
- Definição e príncipios básicos de operação -

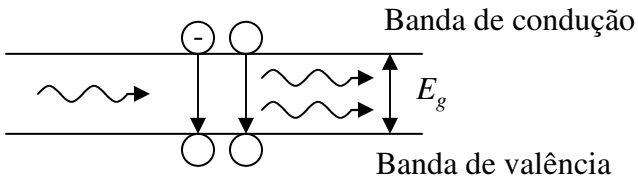
- Definição:
  - é um oscilador óptico baseado no proncípio de amplificação óptica numa cavidade reflectora com realimentação positiva;
- Príncipios básicos (a operação do laser é o resultado de três processos):
  - Absorção;



  - Emissão espontânea;



  - Emissão estimulada:
    - A passagem de um fotão faz um electrão decair da banda de condução para a banda de valência emitindo um fotão (radiação) **coerente** (mesma direcção, frequência, fase e polarização) com o fotão (radiação) incidente.



Díodo Laser
- Príncipios básicos de operação (cont.) -

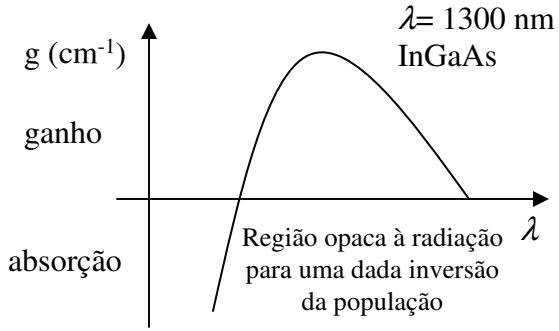
- Para que haja emissão estimulada permanente é necessário garantir que a concentração de electrões na banda de condução é muito elevada

  $\Rightarrow$ **Inversão da população**;

- Esta situação não constitui uma situação de equilíbrio termodinâmico

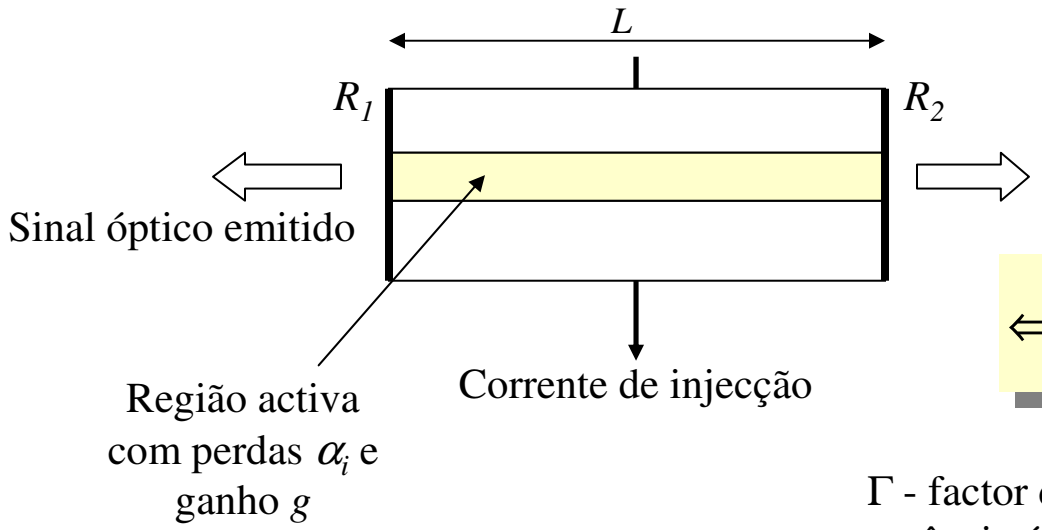
  $\Rightarrow$ é necessário polarizar directamente o laser com uma corrente suficientemente elevada;

- Logo, a amplificação da radiação luminosa só tem lugar quando:
  - a densidade de portadores, *N,* na zona activa ultrapassar um valor crítico N_0 (valor de transparência).



Díodo Laser
- Príncipios básicos de operação (cont.) -

- Os díodos laser usam uma cavidade de Fabry-Perot (FP) como cavidade ressonante. As faces do material semicondutor constituem as superfícies semi-reflectoras (espelhos) da cavidade.



Condições de oscilação:

$$\Gamma g \geq \Gamma g_{th} = \alpha_i + \frac{1}{2L}\ln\frac{1}{R_1 R_2}$$

$$2kL = 2\pi m, \ m \text{ inteiro}$$

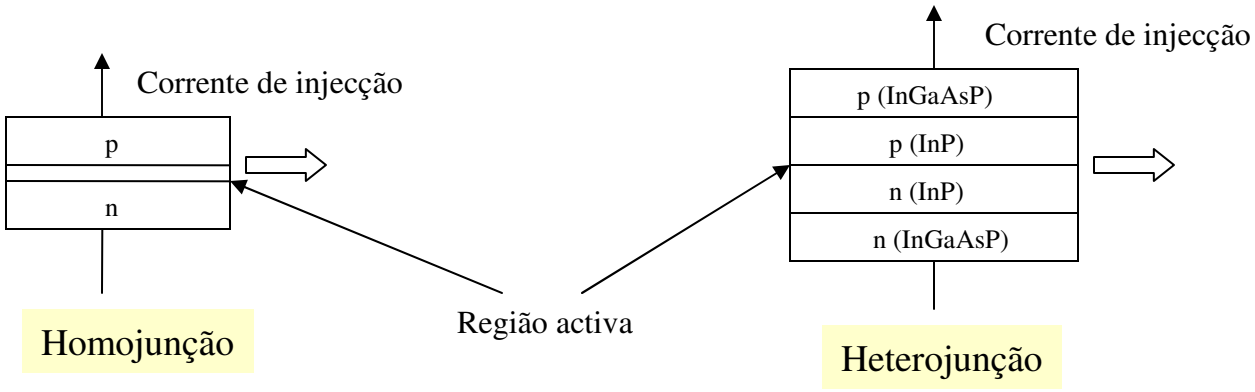
$$\Leftrightarrow 2k_0 nL = 2\pi m, \quad \text{com } k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Γ - factor de confinamento óptico (fracção de potência óptica na região activa);
R_1, R_2 - factores de reflexão das extremidades.

Díodo Laser
- Estrutura física -

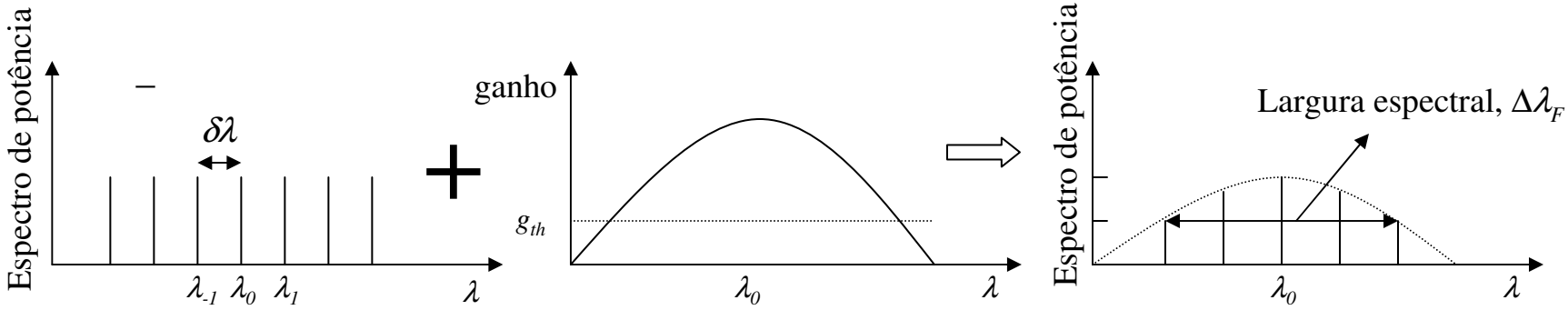
- Usam-se heterojunções em vez de uma simples junção *pn*. Esta estrutura permite um maior confinamento:
  - da radiação luminosa (fotões) dentro da zona activa (consegue-se modificando os índices de refracção);
  - dos portadores dentro da zona activa (consegue-se modificando as bandas de energia).

- Com esta estrutura é possível reduzir a corrente de injecção necessária para originar a inversão da população.



Laser de Fabry-Perot
- Características de emissão -

- Espectro de emissão:
  - o espectro de emissão corresponde aos comprimentos de onda de ressonância da cavidade de Fabry-Perot para os quais o ganho do meio ultrapassa o ganho de limiar g_{th}.



  - O laser de Fabry-Perot apresenta um espectro de emissão constituído por vários modos de oscilação longitudinais, ou seja é um **laser multimodal**.
    - A separação entre os modos longitudinais é :

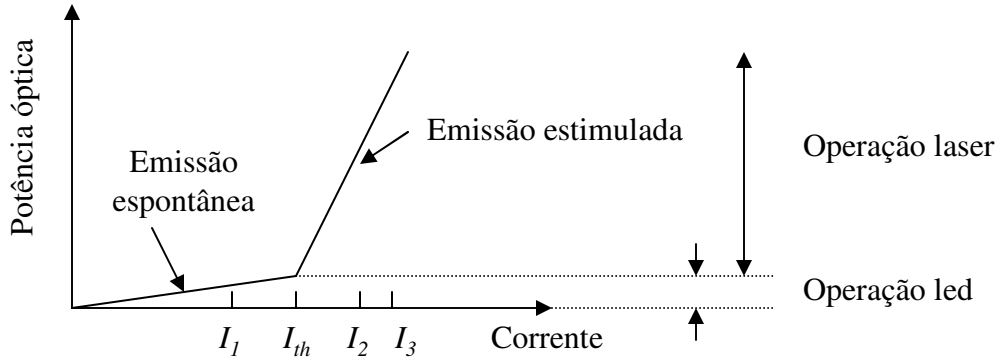
$$\delta\upsilon = \frac{c}{2nL} \quad \leftrightarrow \quad \delta\lambda = \lambda_m - \lambda_{m-1} = \frac{\lambda_m^2}{2nL}$$

L: comprimento da cavidade
n: índice de refracção do material semicondutor

    - Valores típicos da largura espectral a meia potência (FWHM): 2 nm - 5 nm

Laser de Fabry-Perot
- Características de emissão (cont.) -

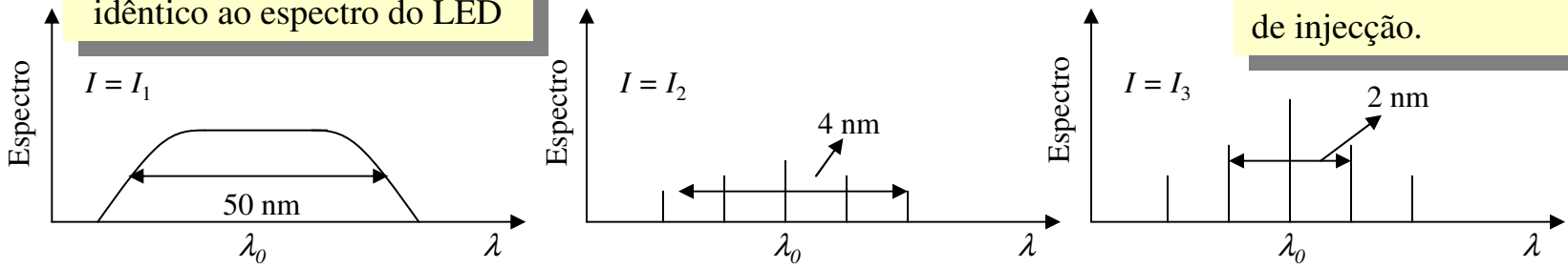
- Potência de emissão:
  - quando a corrente aumenta o ganho óptico também aumenta.
  - A partir de um certo valor da corrente (corrente de limiar, I_{th}) o ganho iguala as perdas da cavidade iniciando-se o processo de **emissão estimulada**.



- Variação do espectro de emissão com a corrente de injecção:

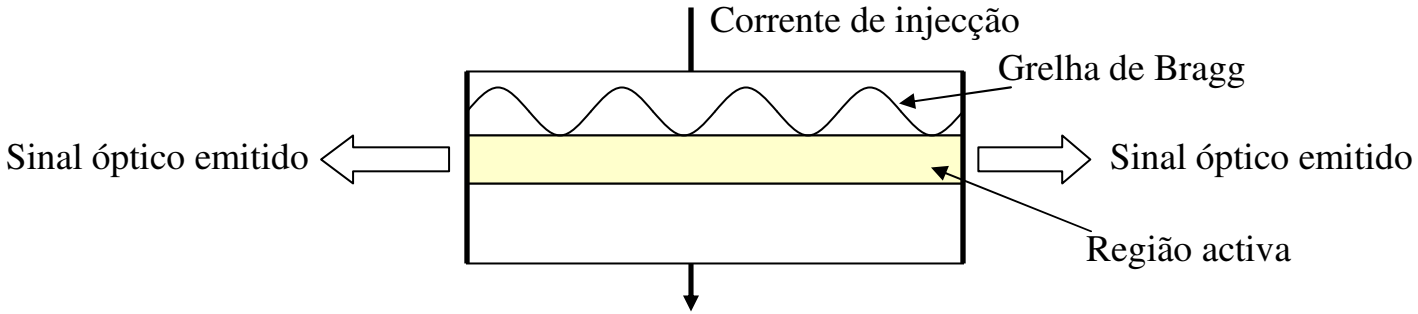
Abaixo do limiar o espectro é idêntico ao espectro do LED

Acima do limiar a potência do modo central aumenta com o aumento da corrente de injecção.



Laser monomodal

- O LD monomodal mais usado é o laser DFB (*distributed feedback*).
  - este laser é semelhante ao laser de FP, mas possui uma grelha de *Bragg* localizada junto à região activa de modo a filtrar todos os modos longitudinais exceptuando o central.



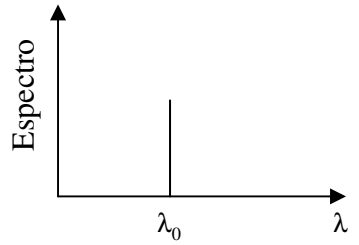
- O outro tipo de LD é o DBR (*distribuited Bragg's reflector*)

Ruído e desvio de frequência (*chirp*)

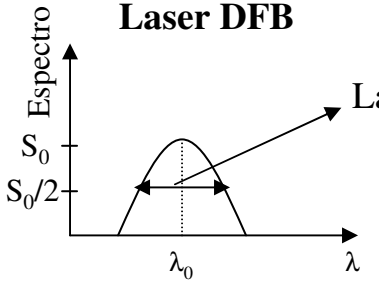
A presença de ruído devido à emissão espontânea vai contribuir para originar **ruído de amplitude** e **ruído de fase** no sinal emitido pelo laser;

O ruído de fase é responsável pela largura espectral do sinal emitido.

Fonte monocromática (ideal)



Laser DFB



Largura espectral a meia potência (FWHM)

$\Delta\lambda_F$: largura espectral a meia potência

σ_λ: largura espectral rms

$$\sigma_\lambda = \Delta\lambda_F \Big/ \left(2\sqrt{2\ln 2}\right)$$

DFB não-modulado:

$\Delta\lambda_F$ = 0.00001 - 0.001 nm

À saída dos fotoemissores o sinal é da forma:

ASK "+" FSK + ruído de amplitude + ruído de fase:

$$\begin{cases} \text{bit "0"}: & \left[\sqrt{2P(0)} + n_a(t)\right]\cos\left(2\pi\upsilon_0 t + 2\pi\dfrac{f_d}{2}t + \phi_0 + \phi_n(t)\right) \quad 0 \le t \le T_b \\ \text{bit "1"}: & \left[\sqrt{2P(1)} + n_a(t)\right]\cos\left(2\pi\upsilon_0 t - 2\pi\dfrac{f_d}{2}t + \phi_0 + \phi_n(t)\right) \quad 0 \le t \le T_b \end{cases}$$

Modulação de LED's e de LD's

Modulação directa:

A potência óptica é modulada por via da modulação da corrente eléctrica de excitação.
$\Rightarrow$ Surge o *chirp* (devido à variação do índice de refracção da região activa que faz com que altera a frequência dos fotões emitidos). O seu efeito é uma modulação de frequência do sinal. Limita a largura de banda (não confundir com largura espectral óptica!) a alguns GHz uma vez que o espectro (óptico) do sinal alarga (dada a modulação FM) o que aumenta a dispersão intramodal.

$\Rightarrow$ A largura de banda da modulação (não confundir com largura espectral óptica!) directa está limitada pelo tempo de vida das cargas portadoras.

Modulação externa:

$\Rightarrow$ O dispositivo fotoemissor é colocado num funcionamento estático e é colocado entre ele e o meio de transmissão (fibra óptica) um modulador óptico que corta (ou filtra) a radiação de forma controlada electricamente pelos impulsos (geralmente binários) a transmitir.

$\Rightarrow$ Não existe *chirp* uma vez que o dispositivo fotoemissor está com uma corrente constante. Assim a largura de banda possível é superior.

LED versus LD

Vantagens do LD vs LED:

- ✓ Maior potência de emissão (1-5 mW vs 10-100μW.
- ✓ Menor largura espectral (10^{-5} - 5 nm vs 0,1λ , i.e. ≈centenas de nm. Com LD's monomodo consegue-se 10^{-5}-10^{-3} nm, isto é ≈1MHz e 100MHz)
- ✓ Maior directividade (permite chegar a uma eficiência de acoplamento de ≈50% para as fibras monomodais vs <1% com LED's para essas fibras)

Desvantagens do LD vs LED:

- ❖ Custo de fabrico (sendo os LD's monomodo os mais caros)
- ❖ Dependência da temperatura
- ❖ Complexidade do circuito de alimentação