

O laser

Prof. Newton C. Frateschi, PhD
DFA – IFGW e CCS UNICAMP



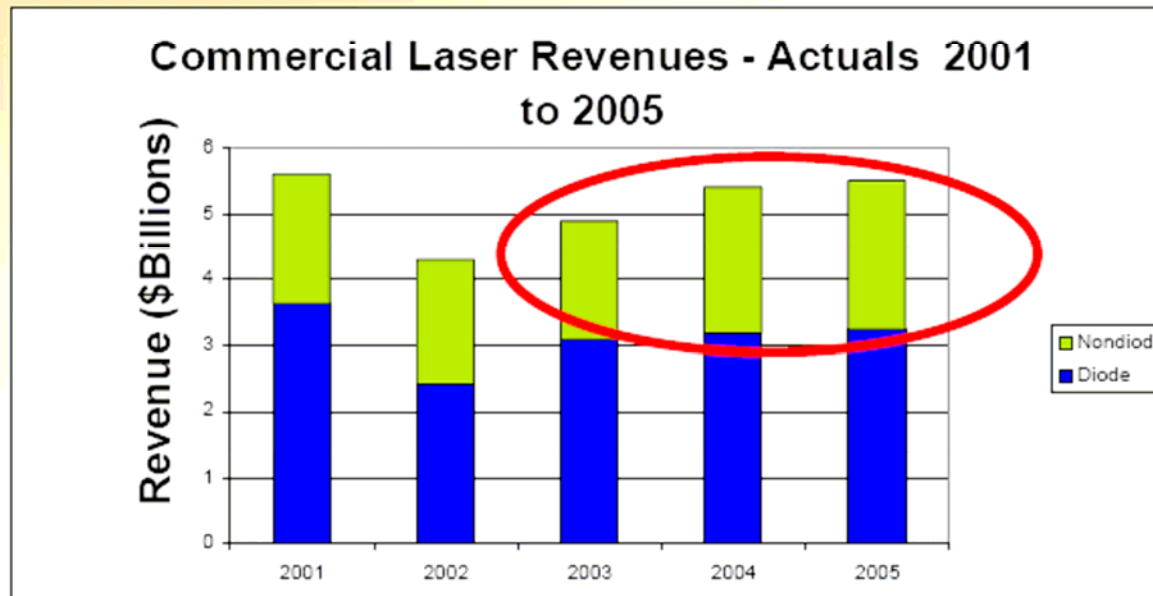
- Introdução
- Conceitos Básicos
- Laser
- Exemplos de laser e aplicações



- Armazenamento óptico: CD's e DVD's (lasers de dimensões sub-milimétricas)
- Leitores de código de barras, apontadores, etc
- Na indústria corte, solda, marcações e madeira, materiais, posicionamento preciso, etc
- Impressão, prototipagem 3D
- Telecomunicação
- Medicina e odontologia: terapêutico ou cirúrgico
- Ciência: principalmente aplicações necessitando: fonte monocromática (coerente), pulsos ultra-curtos.
- Aplicações militares.
- Lasers dos tipos mais diversos já foram criados, até comestíveis!

Total laser market

- Now surpassing \$5B with continuing growth in nondiode

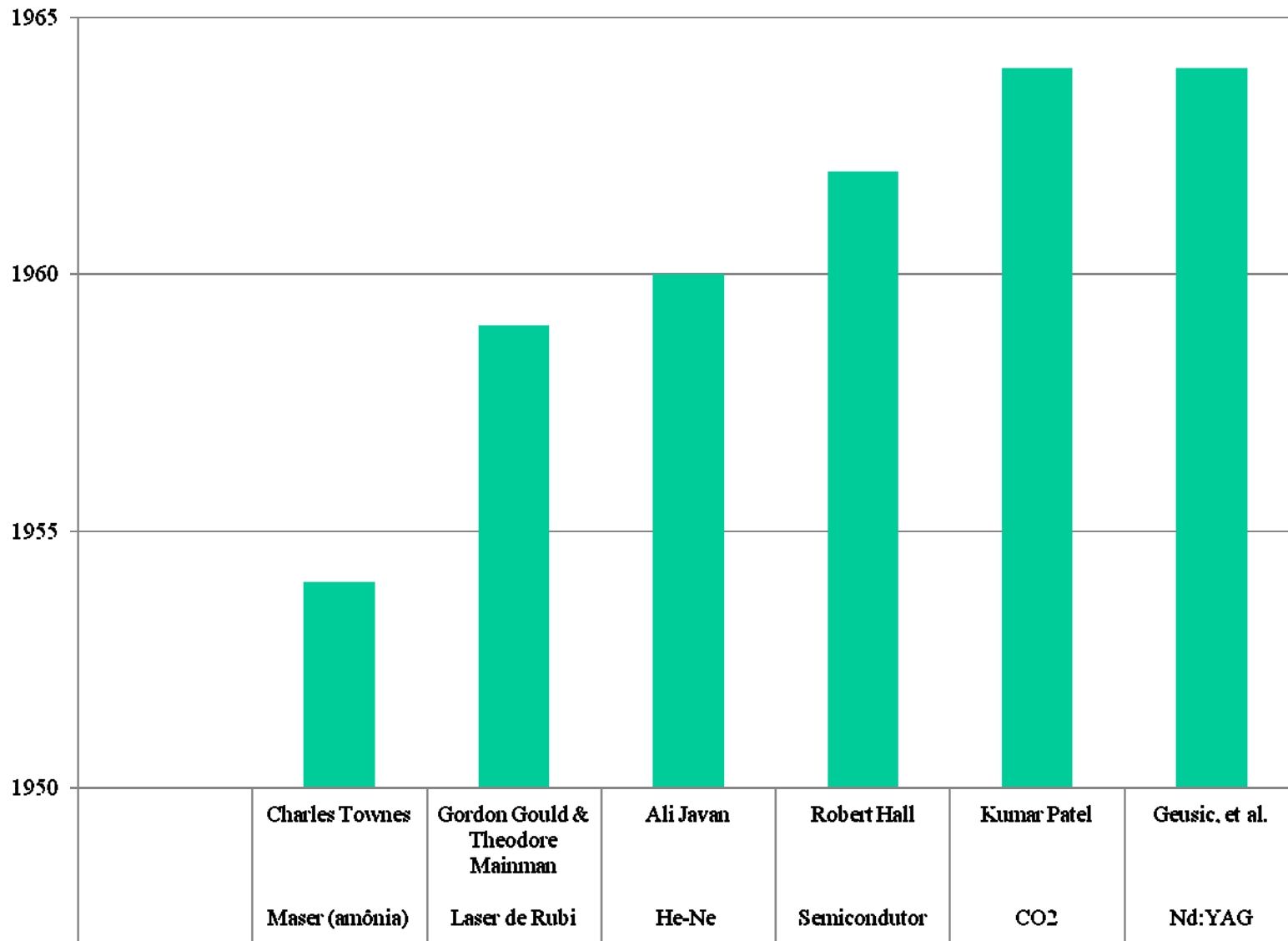


Sources: Laser Focus, OIDA



Michael Lebby (lebby@oida.org)

Now back over \$5B





Light **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation

Amplificação de luz por emissão estimulada de radiação;

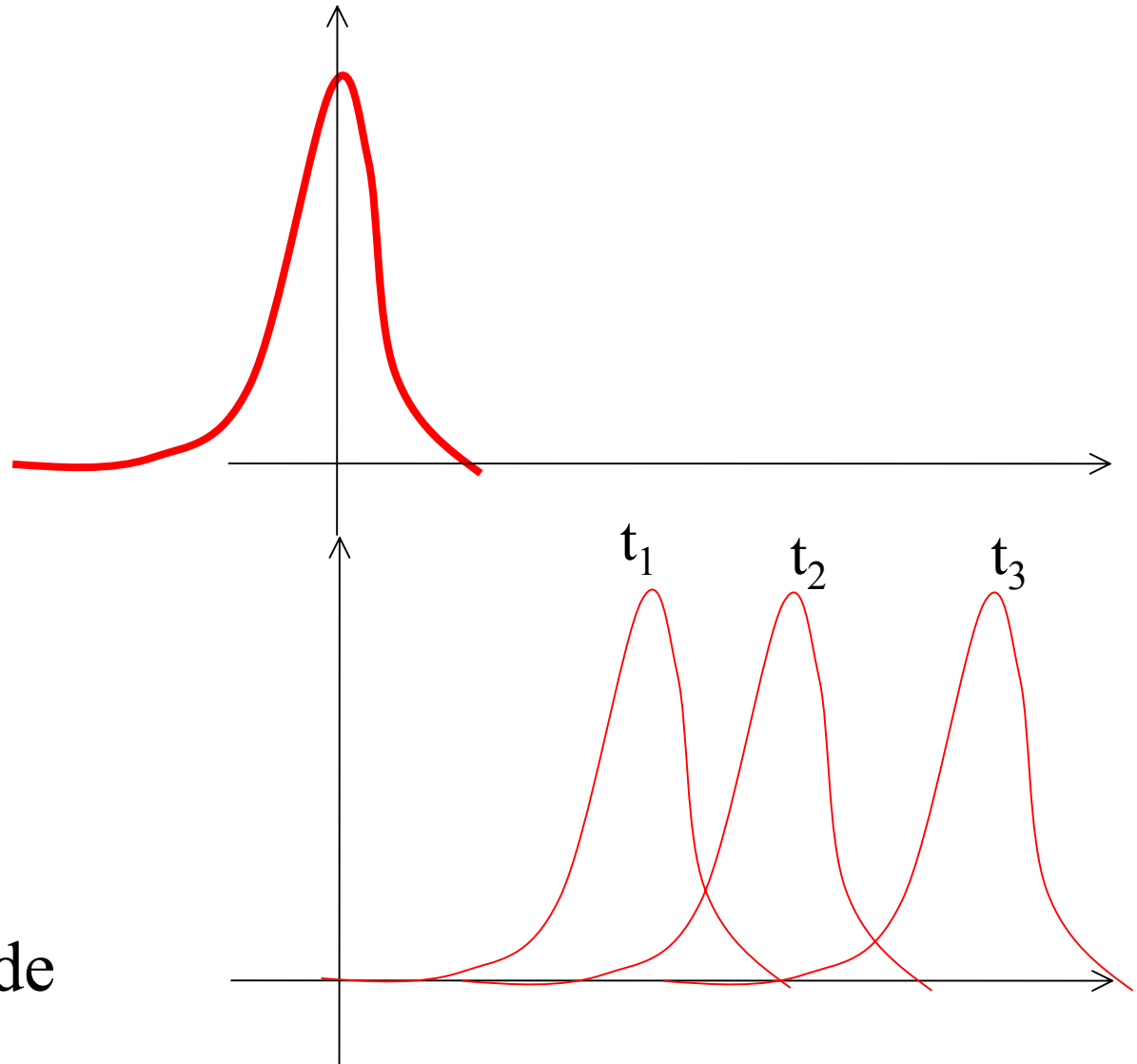
Alternativamente: Laser é uma fonte de luz coerente!

Para se compreender o que é laser, temos que responder:

- O que é luz?
- O que é emissão estimulada?
- O que é amplificação de luz?
- O que é coerência?

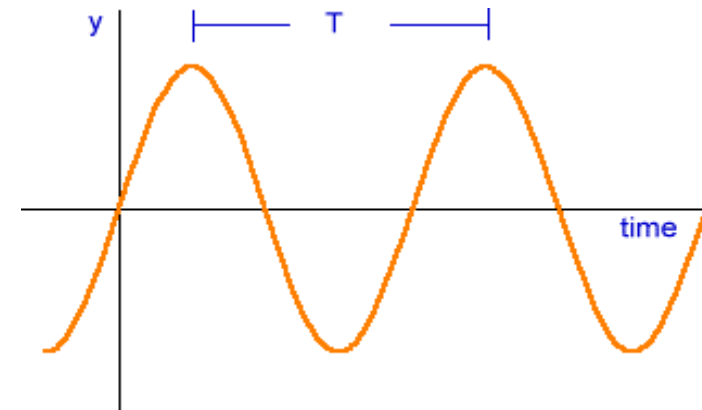
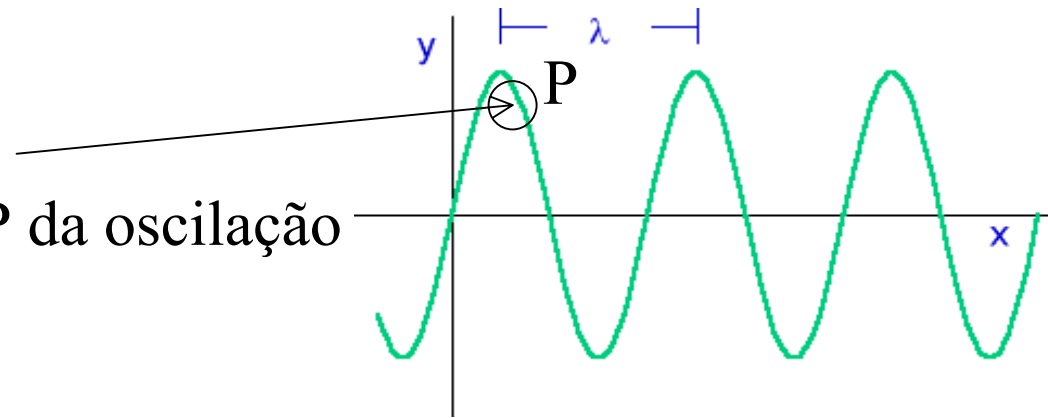


- $F(x)$
- $(x-vt)$
- $(x+vt)$
- $F(x-vt),$
- v é a velocidade de propagação





- $F(x-vt)=F_0\sin(2\pi x/\lambda-\omega t)$
- Fase: $(2\pi x/\lambda-\omega t)$:
 - Indica um ponto característico P da oscilação
- Comprimento de onda: λ
- Período: $T=2\pi/\omega$
- Amplitude: F_0
- Observemos que: $v = \omega/(2\pi/\lambda)$
- Definimos frequência :
- $f=1/T= \omega/2\pi$; $v=f.\lambda$





Resultados empíricos de fenômenos elétricos e magnéticos observados por vários cientistas (Faraday, Oersted, Ampere, Lenz, Coulomb, etc...) resultaram em diversas leis envolvendo forças elétricas e magnéticas.

No final do século XIX, Maxwell sintetizou estas leis em 4 equações básicas (equações de Maxwell) que regem todo o eletromagnetismo. Ao lado, as equações na forma diferencial (Onde E e H são os campos elétricos e magnéticos).

$$\begin{aligned} (1) \vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= \rho \\ (2) \vec{\nabla} \cdot \vec{H} &= 0 \\ (3) \vec{\nabla} \times \vec{E} &= -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \\ (4) \vec{\nabla} \times \vec{H} &= \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \end{aligned}$$

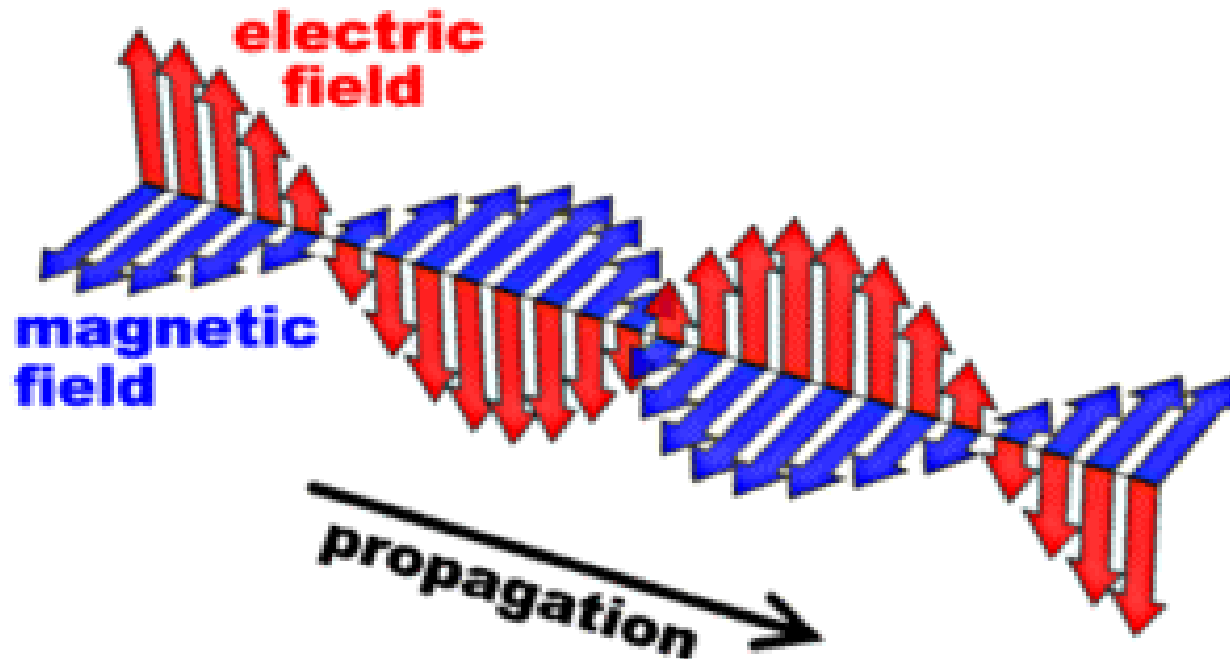
No
vácuo
 $\varepsilon \rightarrow \varepsilon_0$
 $\mu \rightarrow \mu_0$

Estas equações significam:

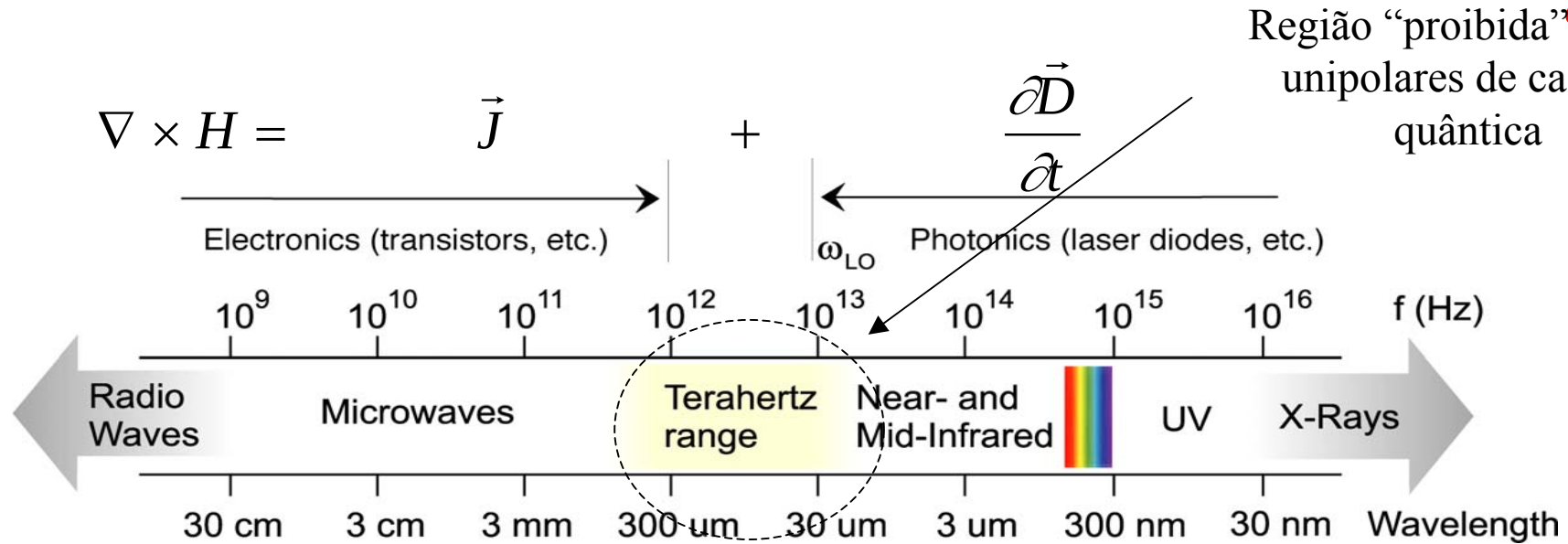
- (1) A fonte fundamental de campos elétricos são cargas elétricas. (lei de Gauss)
- (2) Não existe uma carga magnética (ou seja, pólo sul ou norte separados)
- (3) Uma variação temporal do campo magnético induz uma variação espacial do campo elétrico no sentido de se opor aos seus efeitos; (lei de Faraday)
- (4) Uma variação temporal do campo elétrico induz uma variação espacial do campo magnético no mesmo dos seus efeitos; (lei de Ampere-Maxwell)



- $E=E_0\sin(2\pi x/\lambda-\omega t)$, $B=B_0\sin(2\pi x/\lambda-\omega t)$
- $B_0=E_0/c$; $c=f\cdot\lambda$; Intensidade: (potência por unidade de área) proporcional a $(E_0)^2$
- $c=1/[n(\epsilon_0\mu_0)^{1/2}] = (3\times 10^8\text{m/s})/n$; n é o índice de refração, no vácuo (ar) $n=1$



Geração das ondas EM



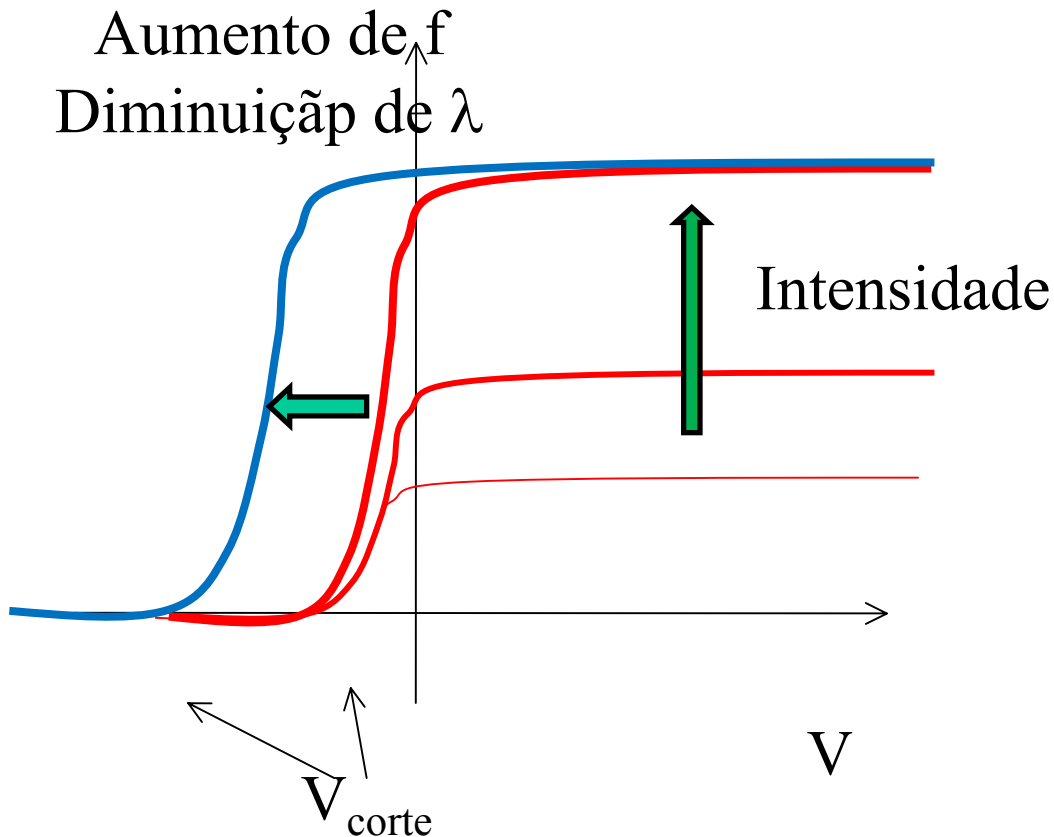
Oscilação de cargas, limitada por
 Tempo de trânsito e RC ,

Limitado por diferença de energia entre
 estados da matéria e ruído térmico.

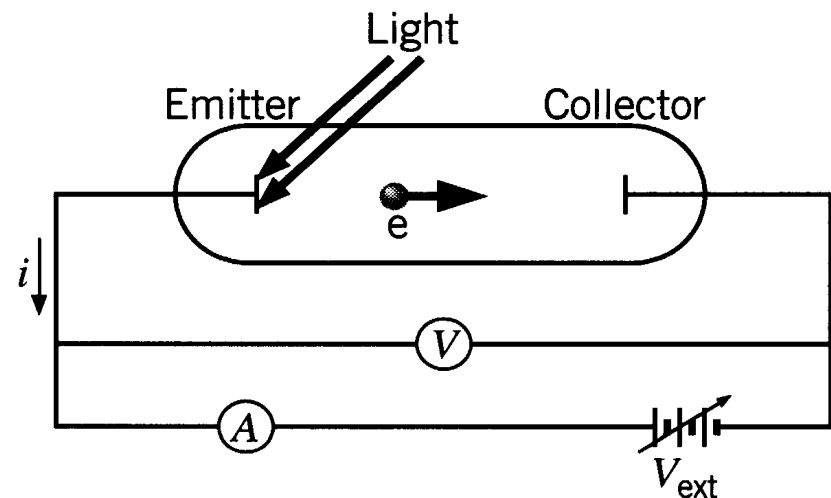
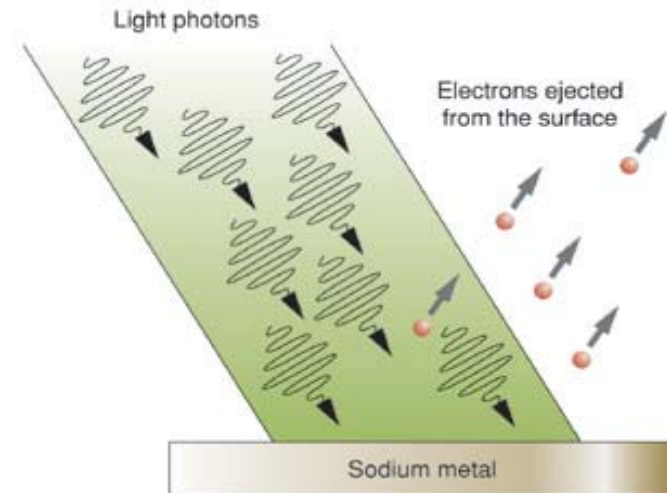
•Qing Hu, (MIT)

- A eletrônica e a óptica diferem na geração por cargas livres e/ou oscilações dielétricas:
- A óptica concentra-se em oscilações dielétricas.

- $K = E(\text{onda}) - \Phi$



- V_{corte} linear com f
- $eV_{\text{corte}} = K = E - \Phi = hf - \Phi$





- $E = hf = hc/\lambda$ $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{J.s} = 4,136 \times 10^{-15} \text{eV.s}$
- $E \text{ (eV)} \sim 1,24/\lambda \text{ (microns)}$; $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$

Quanto maior a energia, menor o comprimento de onda;

Uma onda de comprimento de onda λ só pode ter energia múltiplo de hc/λ ;

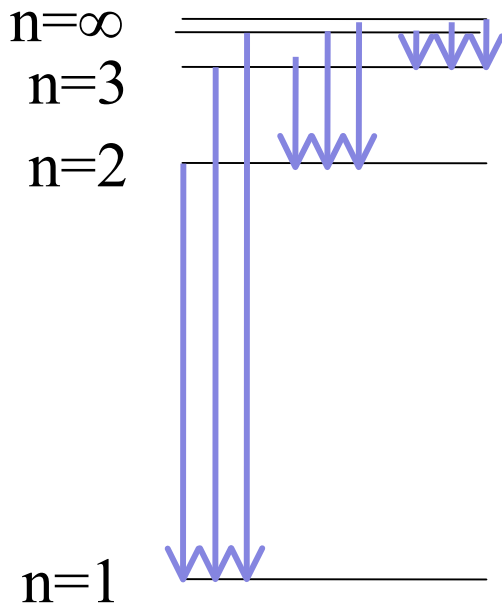
Análogo à quantidade de dinheiro que se pode ter com notas de um certo valor:

Total = número de notas x valor de cada nota

Energia = número de fótons x energia de cada foton



- $E_n = -13,6 \text{ eV}/n^2$
- $E_{\text{foton}} = E_{\text{inicial(m)}} - E_{\text{final(p)}} = -13,6 \text{ eV}(1/m^2 - 1/p^2) = hf = hc/\lambda$



(1) Átomo pode emitir fóton com energia igual à diferença entre dois níveis ficando o átomo menos excitado criando-se um fóton.

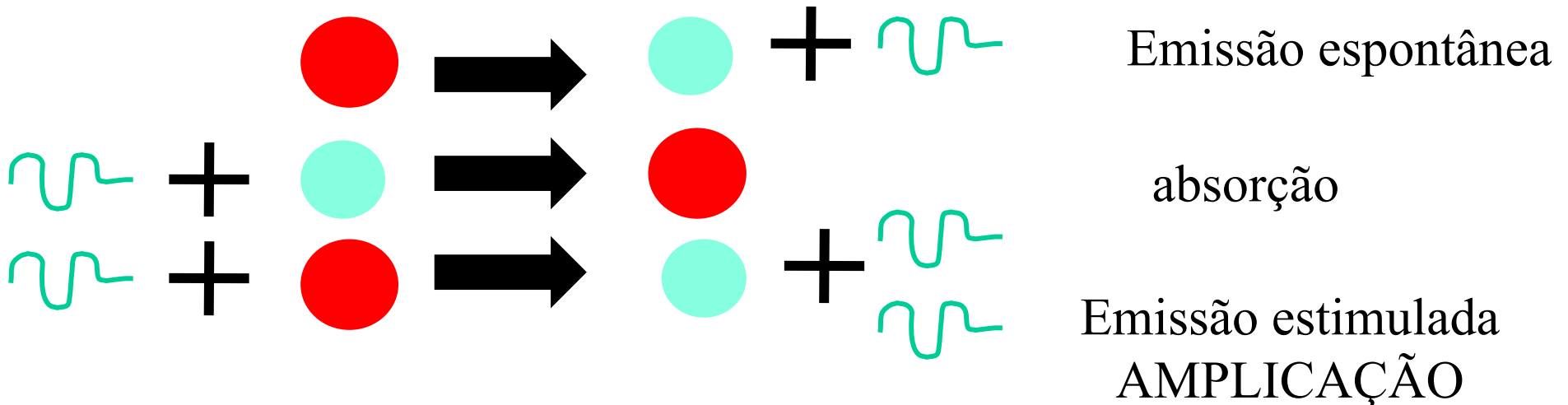
Fóton de energia E_{foton} incide sobre o átomo:

(2) Absorção: ocorre para fótons com energia igual à diferença entre dois níveis; o átomo fica mais excitado de E_{foton} ;

(3) Emissão estimulada: átomo fica menos excitado emitindo um fóton idêntico ao incidente.



- “Propagação de campos elétricos e magnéticos no espaço” (Clássico)
- Criação de modos de excitação do espaço: ftons. (quântico)
- Como são criadas ou destruídas:
 - Interação com a matéria





Fontes de luz

Classificação segundo forma do seu espectro eletromagnético :

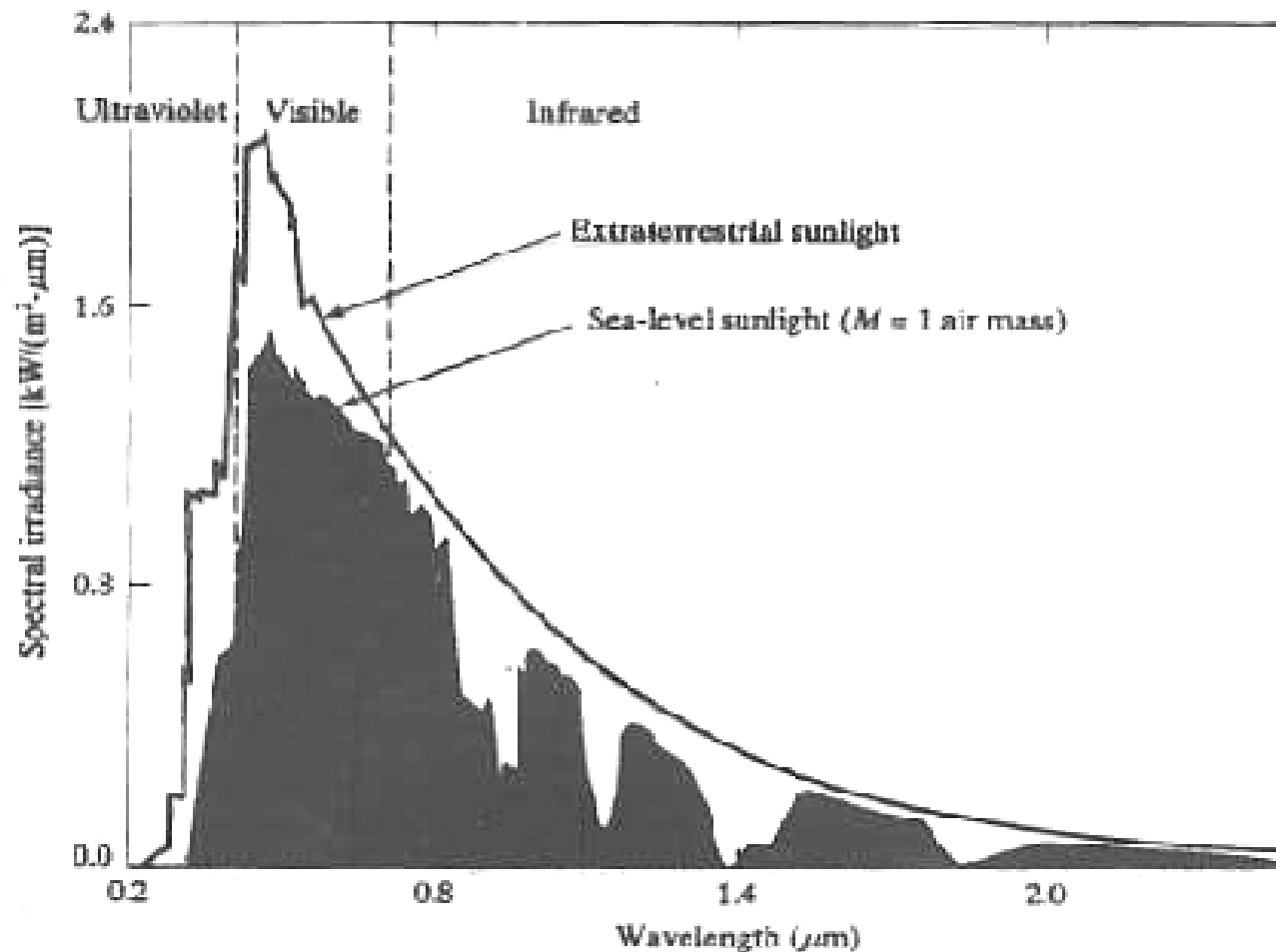
- Fontes contínuas
- Fontes discretas (Transições atômicas – raias finas - ou entre bandas de energia de sólidos – raias largas)
- Fontes oriundas de aceleração de partículas (ex.: Sincrotron)
- **Fontes monocromáticas ou lasers (Emissão estimulada numa cavidade ressonante)**



1.2. Fontes de luz

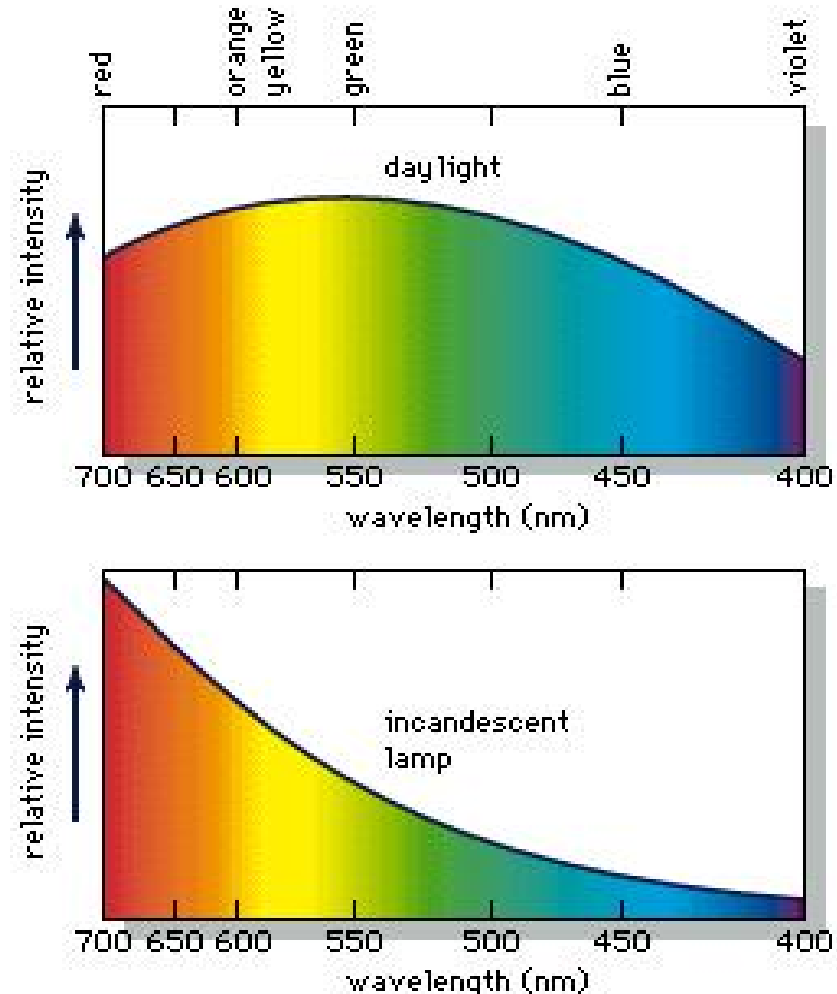
1.2.1. Fontes contínuas

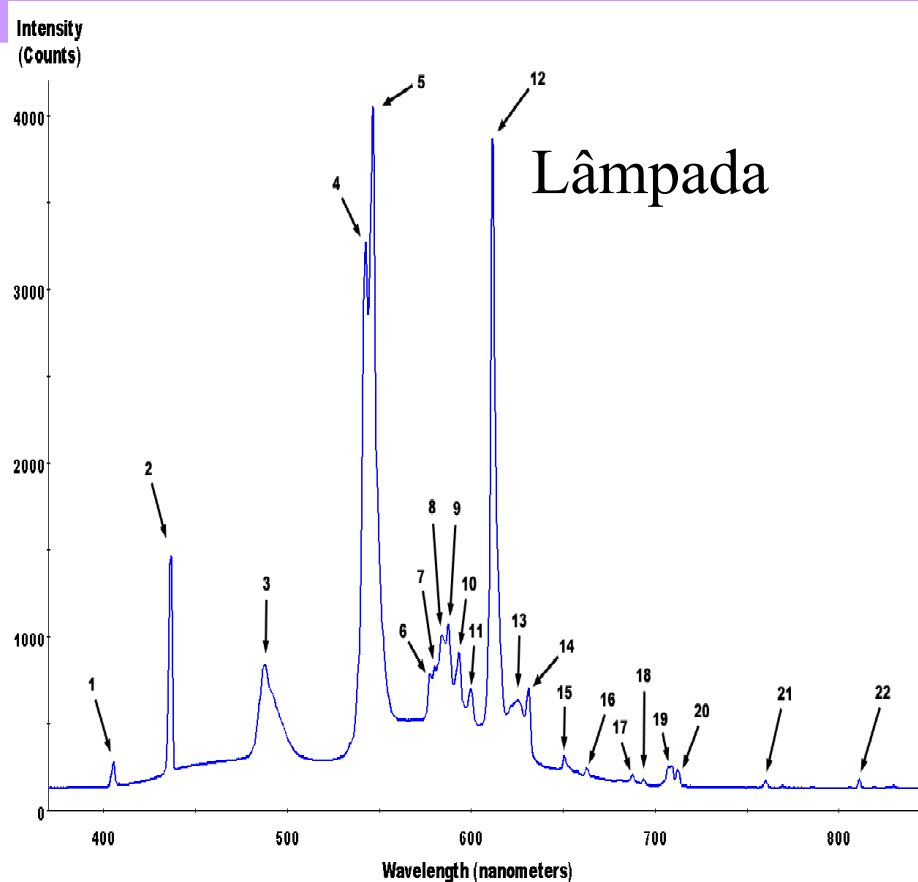
Espectro Solar:



Espectro da lâmpada incandescente

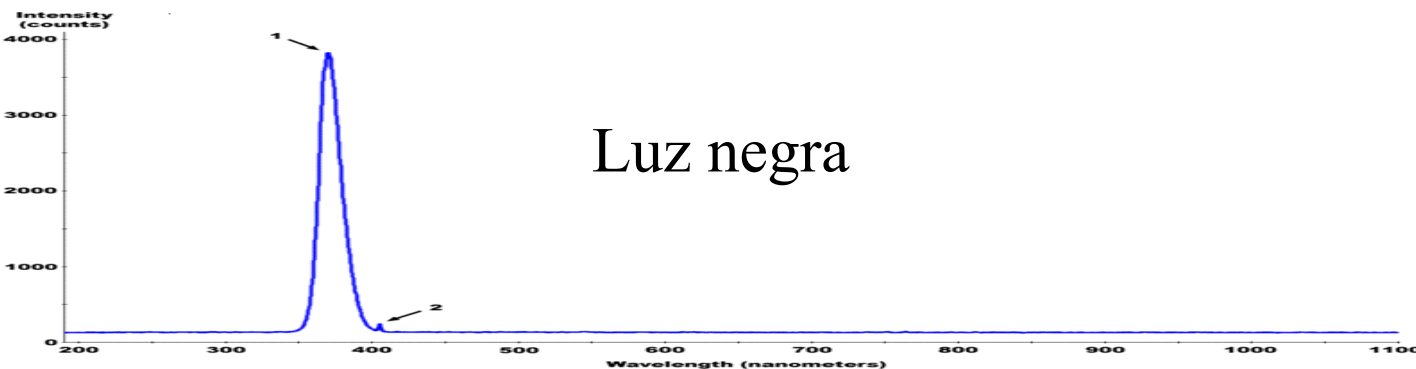
- Lâmpada incandescente filamento aquecido:
- Radiação de corpo negro;
- Potência altera distribuição espectral:
 $P \sim (1/\lambda)^4$
 - É impossível mudar potência sem mudar espectro



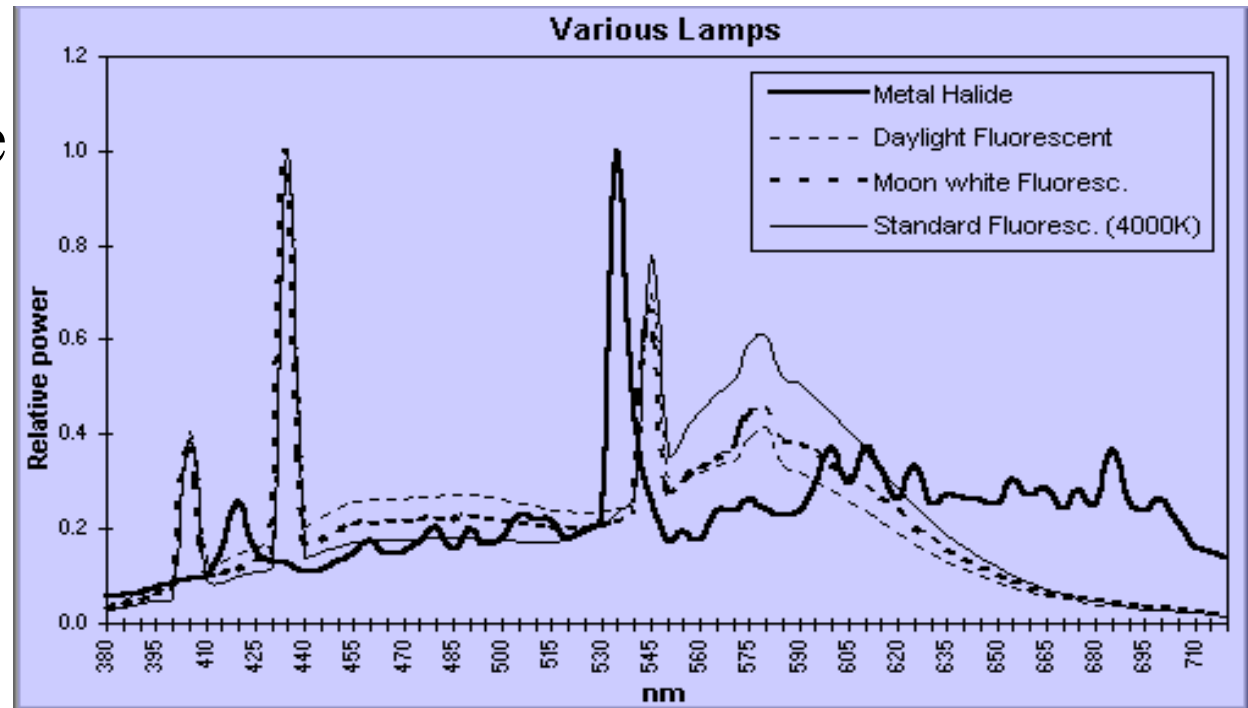


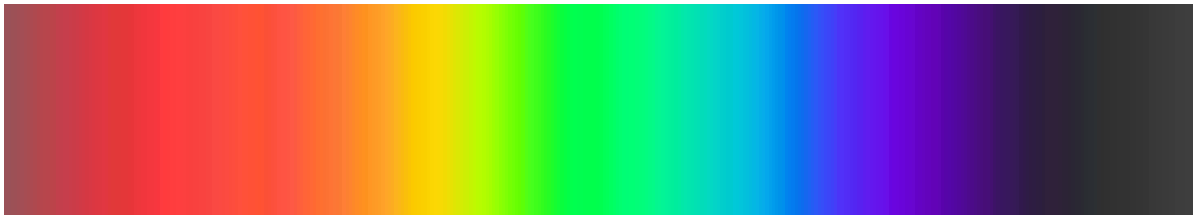
Plasma de ionização do gás
gera UV; (luz negra)

Material fluorescente do
envelope contem terras
raras: Tb^{3+} , Ce^{3+} : $LaPO_4$
para verde e azul e
 $Eu:Y_2O_3$ para vermelho

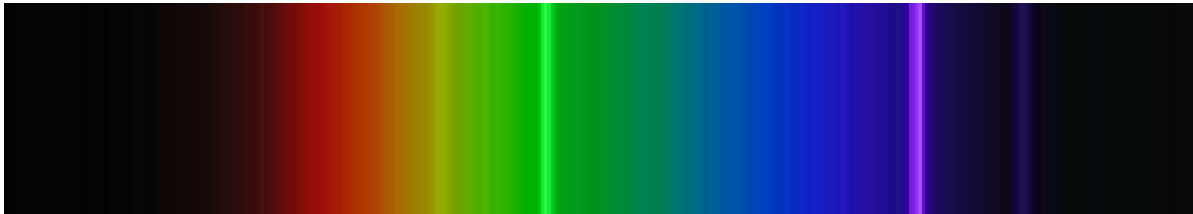


- Combina luz espectral com espectro contínuo de fluorescência:
- Pode-se mudar o espectro mudando-se o composto fluorescente

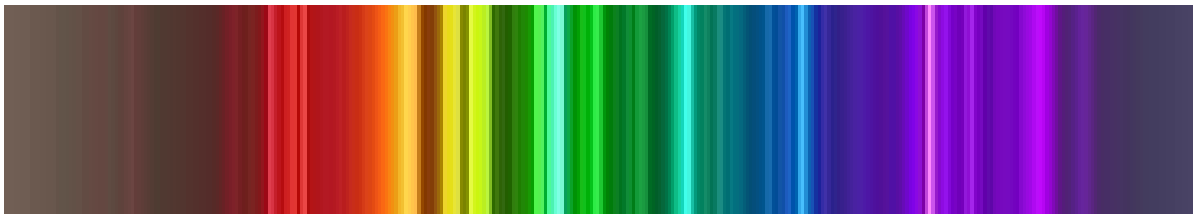




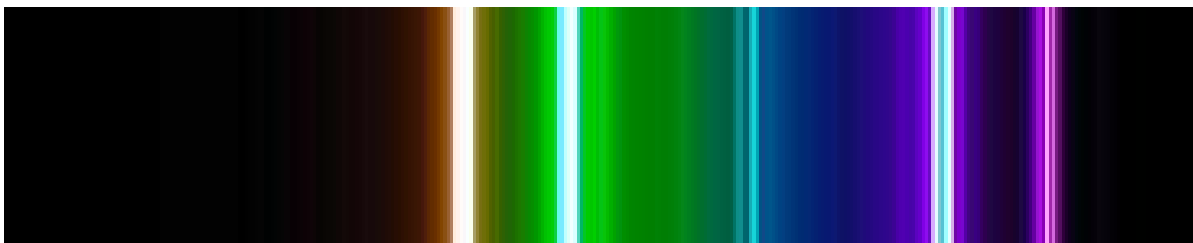
incandescente



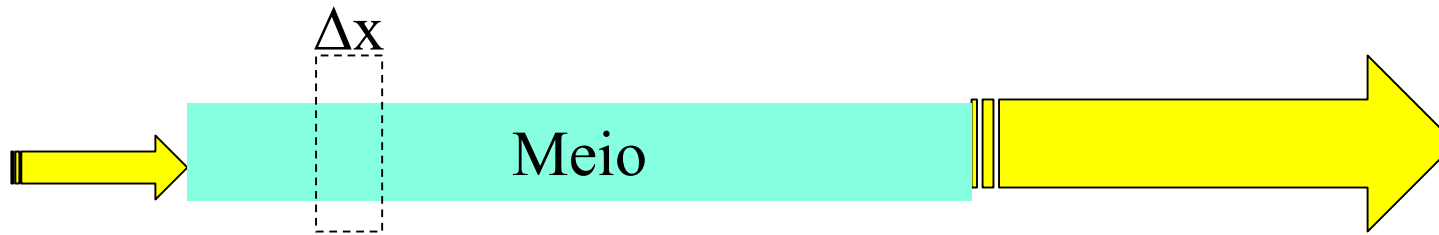
fluorecentes



Haleto de metal



Vapor de mercúrio



- Imaginemos que o meio tem dois níveis de energia possíveis: E_1 e E_2
- Consideremos que temos em Δx n_1 átomos no nível E_1 e n_2 átomos no nível E_2
- A taxa de geração de fótons com energia $E = E_2 - E_1$ em Δx é:

$$\Delta p / \Delta t = A_{21}(n_2 - n_1) + B_{21}pn_2 - B_{12}pn_1$$

Emissão
espontânea

Emissão
estimulada

Absorção



- Aplicando esta equação a um corpo negro numa temperatura T , utilizando física estatística clássica, Einstein mostrou que os coeficientes A e B devem satisfazer:
- $B_{21}=B_{12}=B$
- $A_{21}=B_{21}(2hf^3/c^2)[1/(e^{E/kT}-1)]$
- Sendo assim:
- $\Delta p/\Delta t = A_{21}(n_2-n_1)+B(n_2-n_1)p$;
- Agora $\Delta p/\Delta t = c\Delta p/\Delta z$, então:
- $\Delta p/\Delta z = A_{21}(n_2-n_1)/c+B(n_2-n_1)p/c$

aumento exponencial

aumento linear

$$p(z) = cA_{21}z + e^{B(n_2-n_1)z/c}$$



- Amplificação ou absorção depende do termo: $g = B(n_2 - n_1)/c$ (ganho);
- Se $n_2 = n_1$, $g = 0$, material é transparente;
- Se $n_2 < n_1$, $g < 0$, material absorve a luz: a intensidade luminosa cai exponencialmente com o comprimento;
- Se $n_2 > n_1$, $g > 0$, material é amplificador: a intensidade luminosa aumenta exponencialmente com o comprimento;
- O problema é que estatisticamente $n_2 < n_1$ pois os meios tendem a minimizar energia no equilíbrio.
- Portanto, temos que estar fora do equilíbrio e inverter esta situação com algum tipo de excitação (**bombeio**):

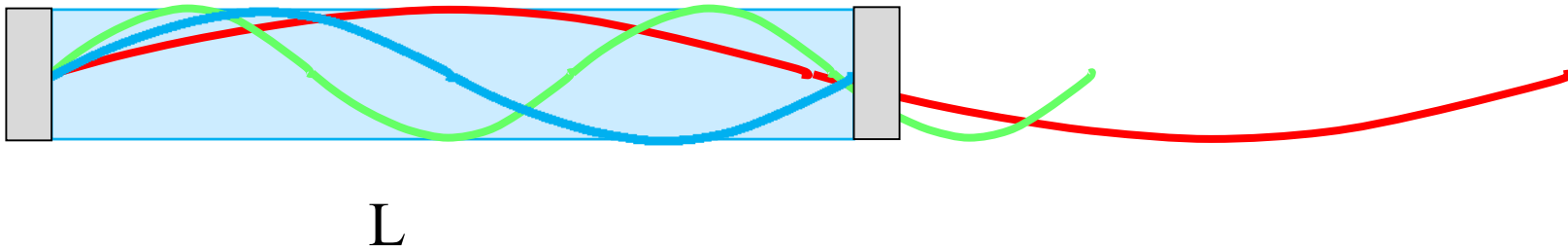
inversão de população.



- Aprendemos que para ter amplificação necessitamos alguma forma de excitação que chamamos de bombeio.
- Estes podem ser:
 - Descarga elétrica (como numa lâmpada fluorescente)
 - Bombeio óptico (luz excita os estados)
 - Injeção direta de portadores (semicondutor)



- Quando uma onda é confinada numa região do espaço, cria-se ondas estacionárias. Ou seja regiões fixas de máximo e mínimos da onda.
- Abaixo mostramos caso da cavidade Fabry-Perot, linear com dois espelhos

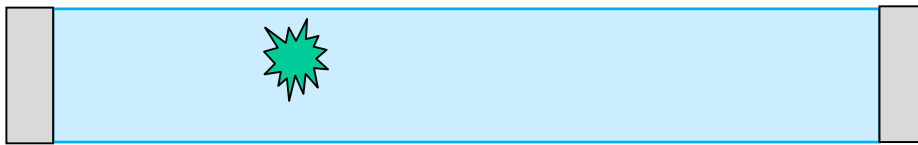


$$\lambda_m = \frac{2L}{m}; \lambda_m^{\text{vácuo}} = \frac{2Ln_{\text{ref}}}{m}$$



- Em termos de frequência possíveis, temos:

$$f_m = \frac{c}{\lambda_m^{\text{vácuo}}} = \frac{m(c / n_{\text{ref}})}{2L} = \frac{m}{\tau_{\text{volta}}}$$

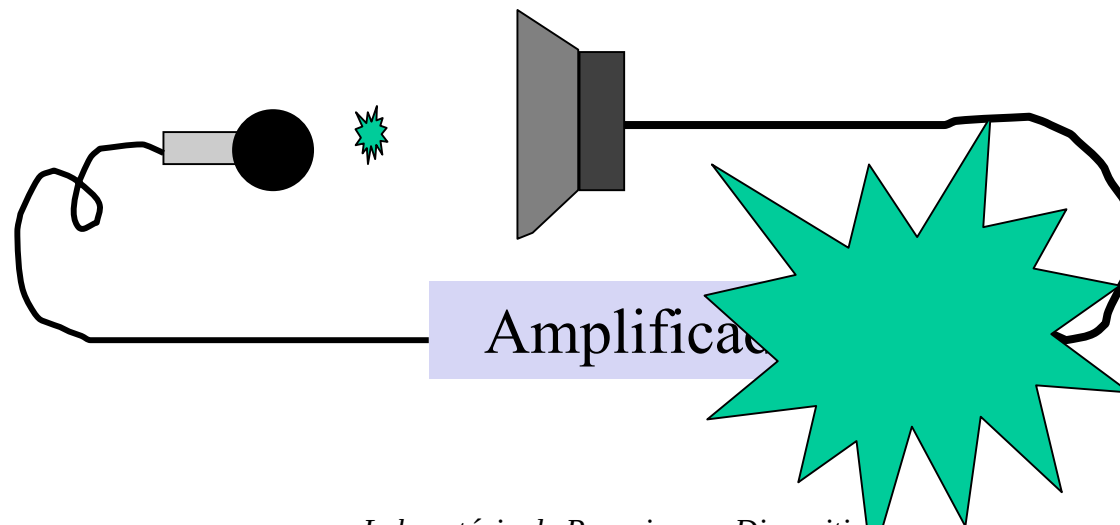


L

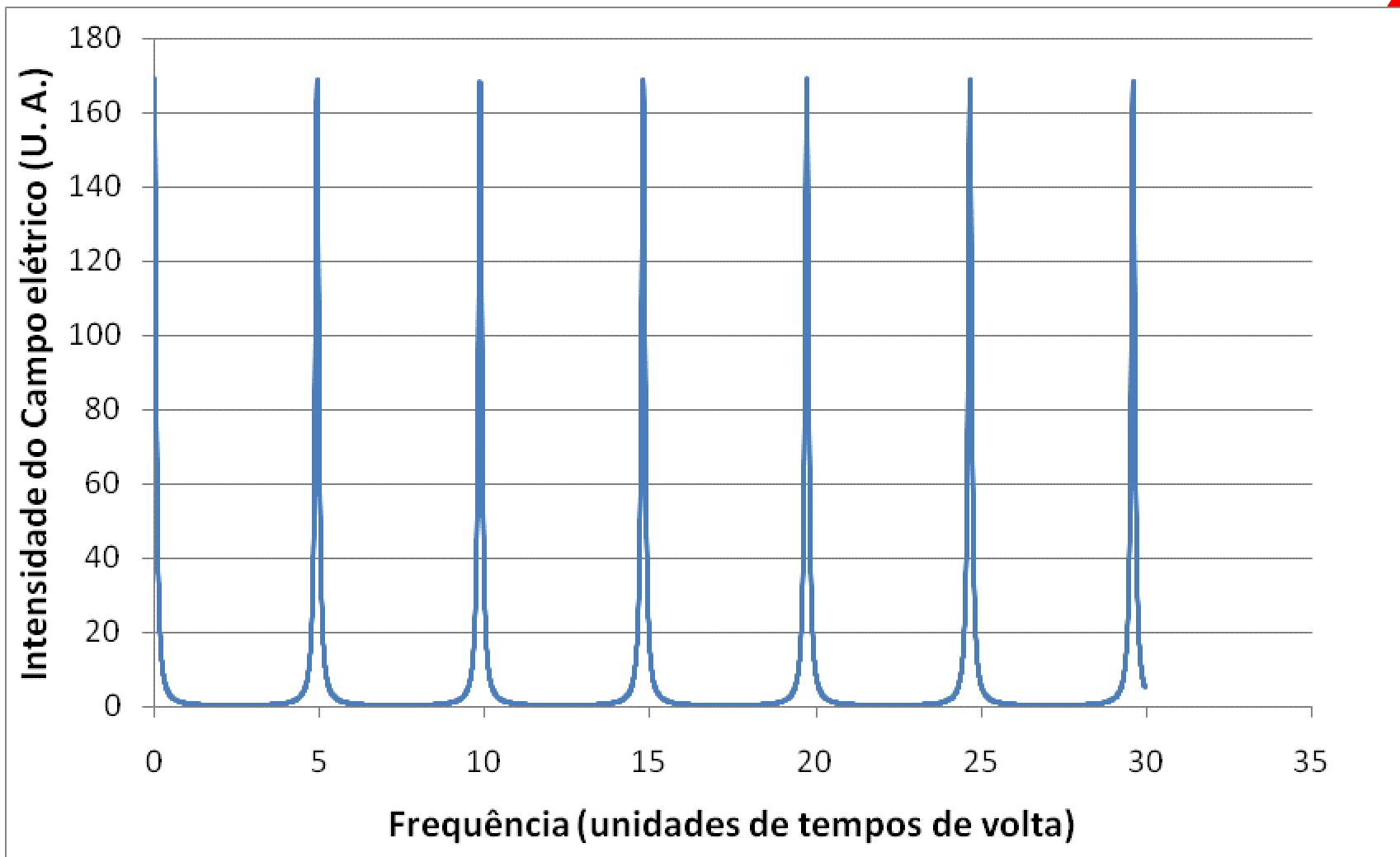
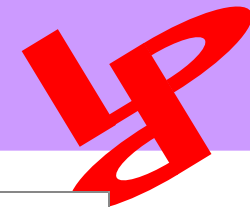
- Podemos imaginar que ondas contra propagantes devido a múltiplas reflexões interferem entre si formando o campo estacionário.
- Como o meio tem sempre uma absorção residual, o campo vai diminuindo exponencialmente.

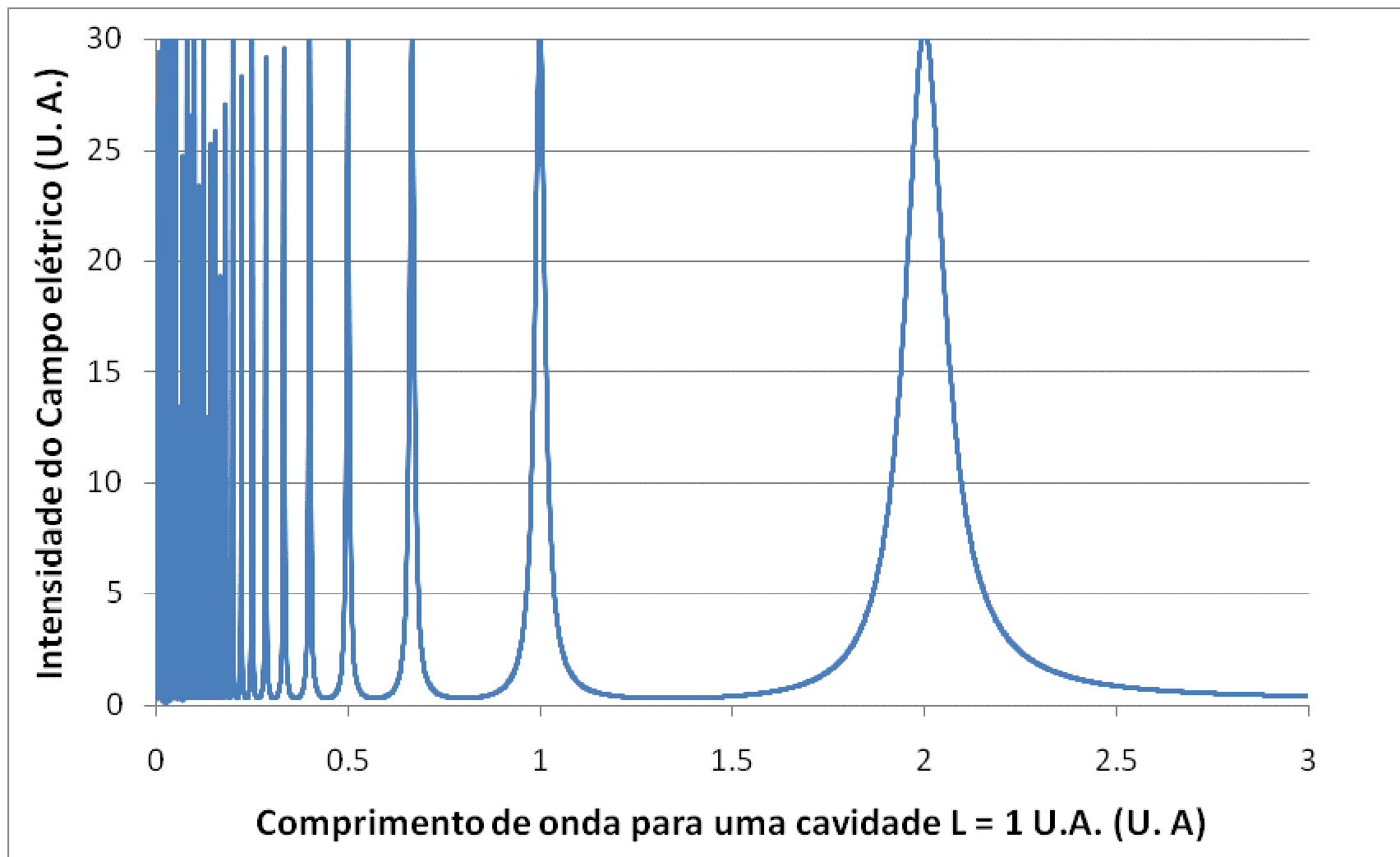


- Se dentro da cavidade inserimos um meio amplificador para compensar as perdas podemos somar infinitos campos contra-propagantes;
- Ou seja, num ponto gera-se luz por emissão espontânea e esta é amplificada nas muitas passagens pelo meio.
- A situação é bastante parecida à microfonia:

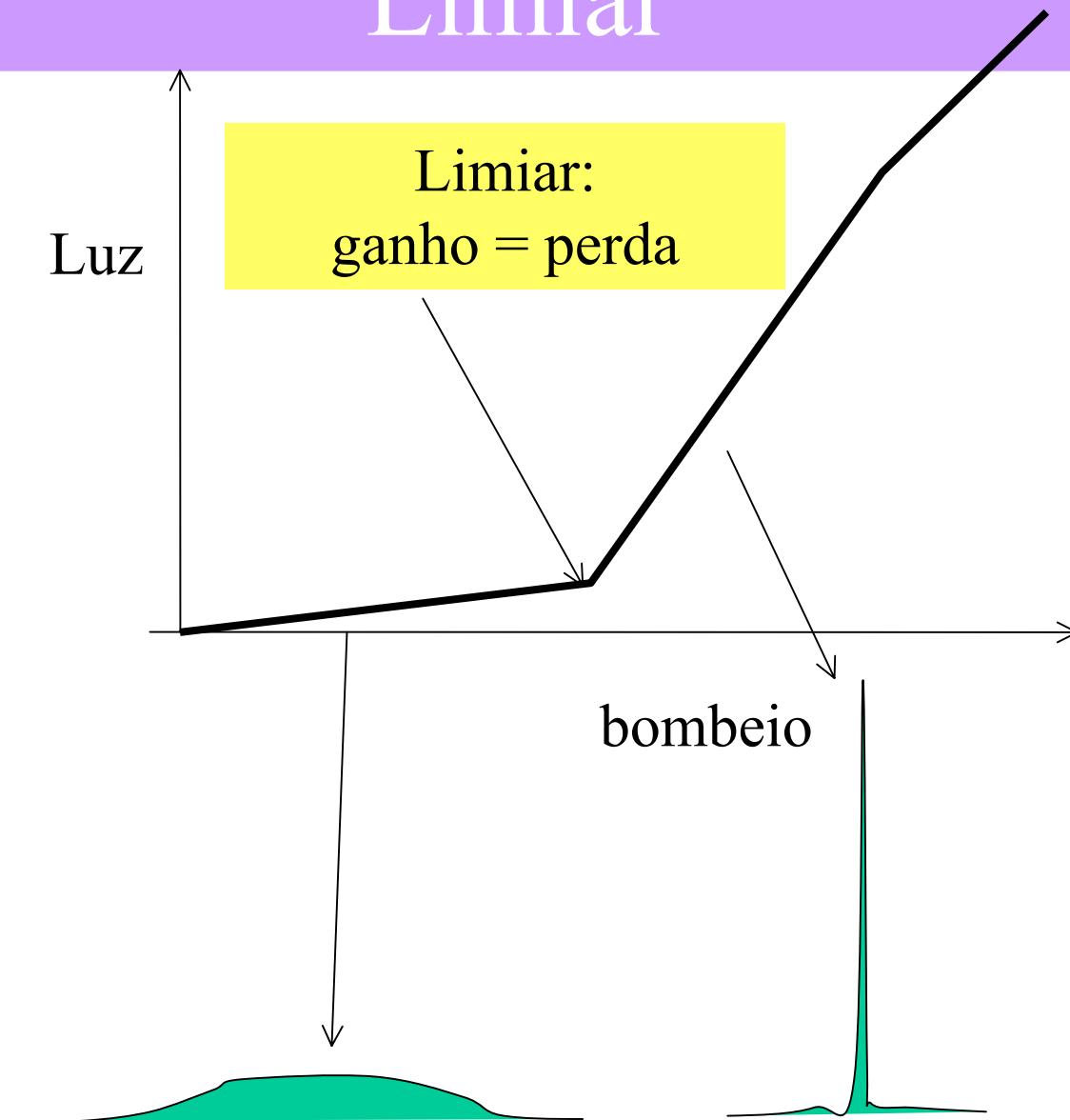


Campo em função da frequência





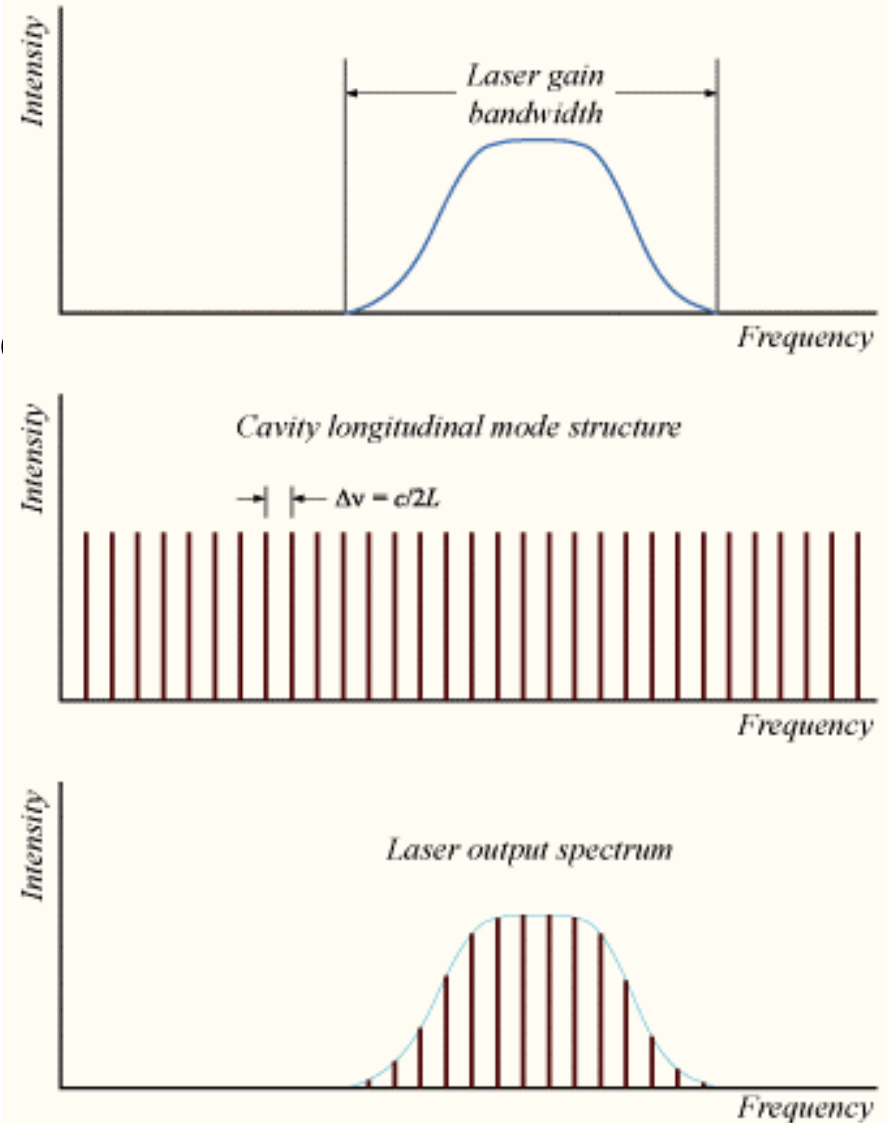
Limiar





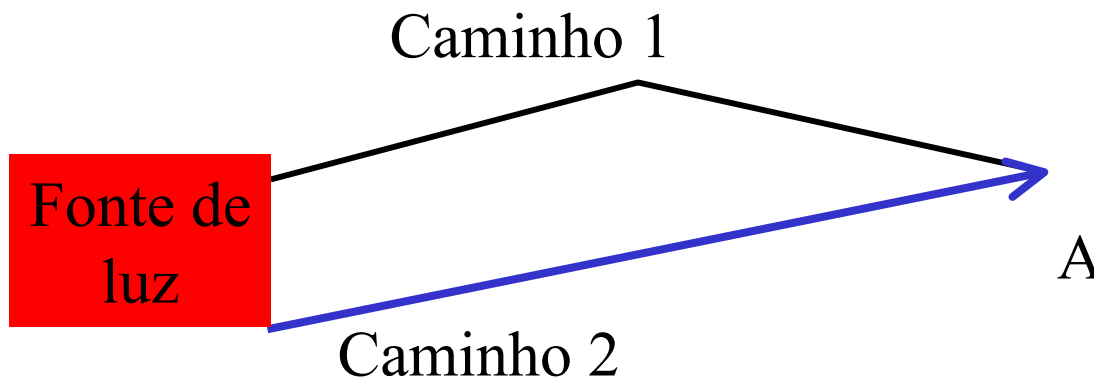
- Cavidade ressonante;
- Insere-se um meio que pode ser excitado para resultar em mais emissão estimulada que absorção;
 - Mecanismo de excitação:
 - Elétrico;
 - Óptico (lâmpada, outro laser, etc...)
 - Eletrônico.
- Ao se aproximar o ganho da perda na cavidade a emissão espontânea é fortemente amplificada nos modos da cavidade;
- Finalmente alguns dos modos, ou somente um modo se sobressai e consome toda a excitação e o laser fica monocromático.

- O ganho tem uma largura espectral fixa:
 - Diferentes modos têm diferentes ganho.
 - Um sobressai e suprime os outros.
 - Muitos modos podem ocorrer (neste caso, se forem correlacionados : mode-locking)





- A diferença de fase até chegar em A para os dois feixes depende do intervalo de tempo e do caminho percorrido.
 - Se contarmos o tempo da hora que o feixe 1 sai, como o feixe 2 sai atrasado exatamente para se encontrarem em A, a diferença de fase é só devido à diferença de caminho. Para saber o valor basta saber a diferença de caminho em unidades de comprimento de ondas:
- ☐ $\Delta\Phi = 2\pi (l_1 - l_2) / \lambda$ (neste caso consideramos que λ é o mesmo para os dois caminhos)





- No ponto A temos:
- $E_{\text{total}} = E_{01} \cos(\omega t) + E_{02} \cos(\omega t + \Delta\Phi)$
- A intensidade da onda é dada pelo quadrado da amplitude, então:
 - Onda 1: $I_1 = A(E_{01})^2$; (A é uma constante);
 - Onda 2: $I_2 = A(E_{02})^2$;
 - Intensidade em A: $A(E_{01} \cos(\omega t) + E_{02} \cos(\omega t + \Delta\Phi))^2$
- Como ω é muito grande vemos uma média de muitos períodos. Assim:
- $I = I_1 + I_2 + 2(I_1 \cdot I_2)^{1/2} \cos(\Delta\Phi)$;
- Se $I_1 = I_2 = I_0$; $I = 4I_0 \cos^2(\Delta\Phi/2)$:

$$\Delta\Phi = 2n\pi, n = 1, 2, \dots$$

$$I = 4I_0; \text{ Construtiva}$$

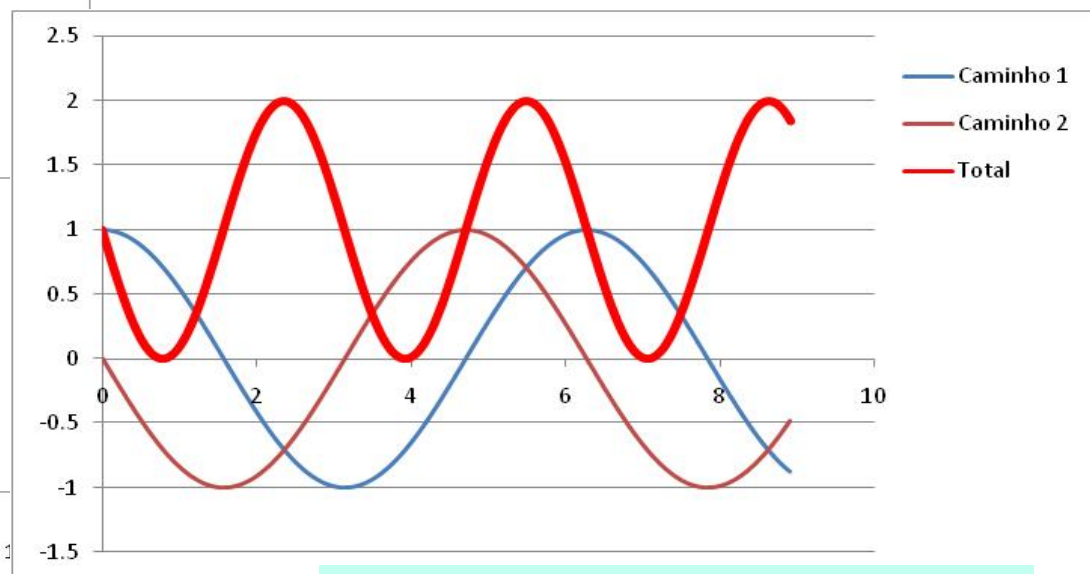
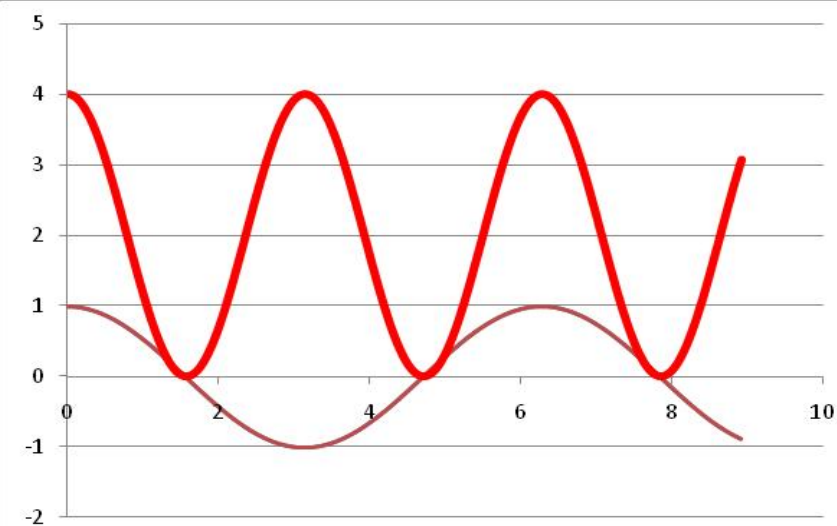
$$\Delta\Phi = (2n+1)\pi, n = 1, 2, \dots$$

$$I = 0; \text{ Desstrutiva}$$

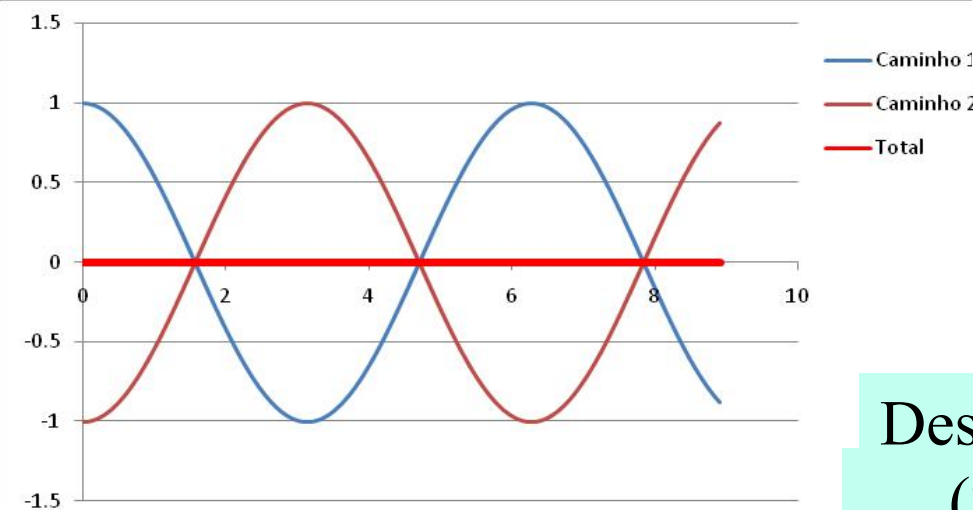


Construtiva

$$(2n)\pi, n=0,1,2,\dots$$



$$(2n+1/2)\pi, n=0,1,2,\dots$$

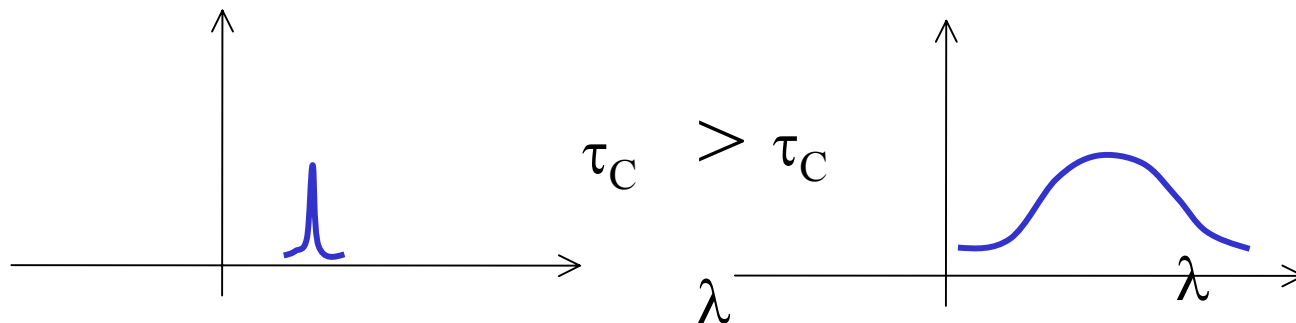


Destrutiva

$$(2n+1)\pi, n=0,1,2,\dots$$



- Feixes de luz saem em tempos diferentes da fonte;
- Média da interferência de vários pares de dois feixes no ponto A.
- Uma fonte é caracterizada por um tempo médio τ_C (coerência temporal) onde sua fase muda aleatoriamente.
- Efeitos de interferência só poderão ser vistos se $l_C = (l_1 - l_2)/c < \tau_C$; (l_C é o comprimento de coerência);
- A largura espectral de uma fonte é inversamente proporcional a τ_C : $\Delta\nu \sim 1/\tau_C$;
- Como laser vem de emissão estimulada os fótons são idênticos. Também, dada sua característica monocromática, sua luz é extremamente coerente.





- Emissão estimulada: fótons idênticos são produzidos
- O feixe final tem:
 - Campo elétrico e magnético na mesma direção (polarização)
 - Podem ser feitos com fótons propagando (quase) exatamente na mesma direção;
 - Além disto, por serem monocromáticos: podem ser focalizados nas menores áreas;
- Uma fonte contínua: filtros, lentes, polarizadores poderia ter as mesmas propriedades! No entanto a energia do feixe seria quase nula. O laser já produz desta forma!!



- Terra: 1 mm
- Lua (385 mil Km) :1.5km
- Divergência:0.2 milésimos de grau.

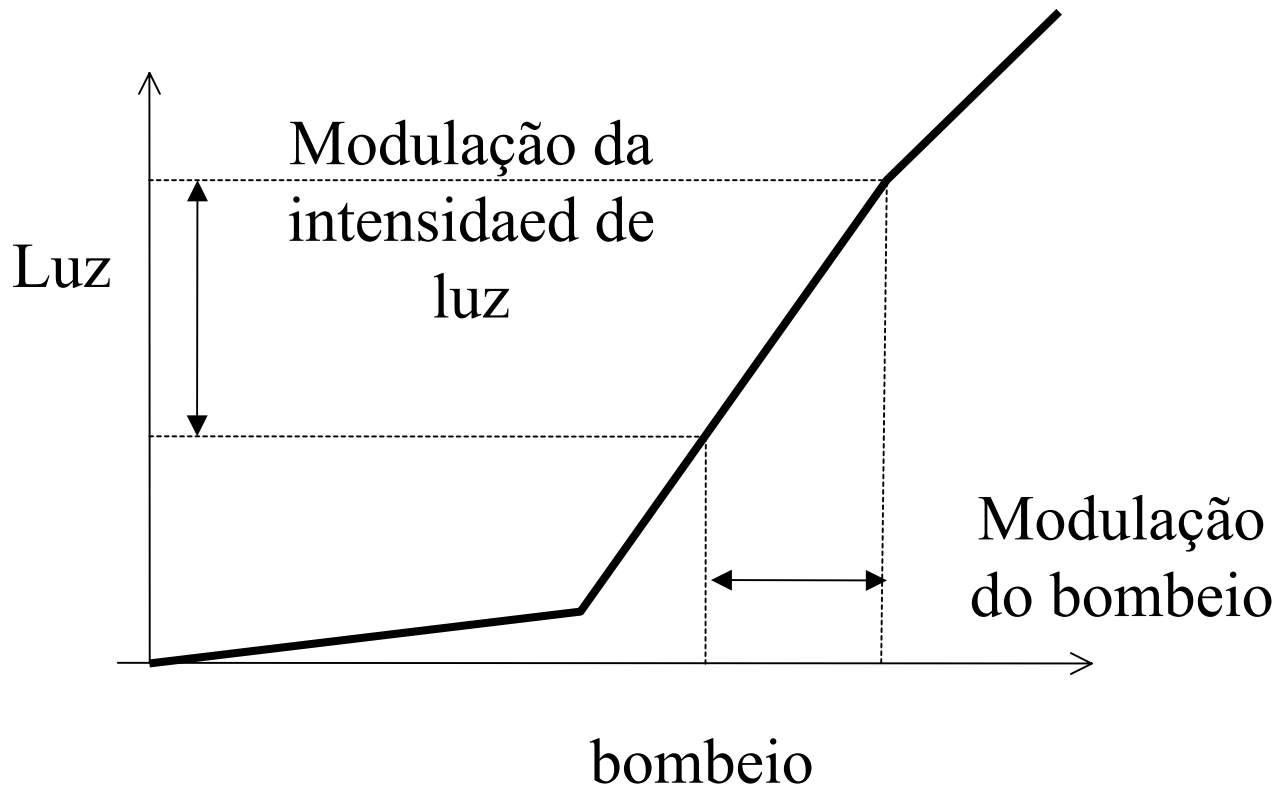


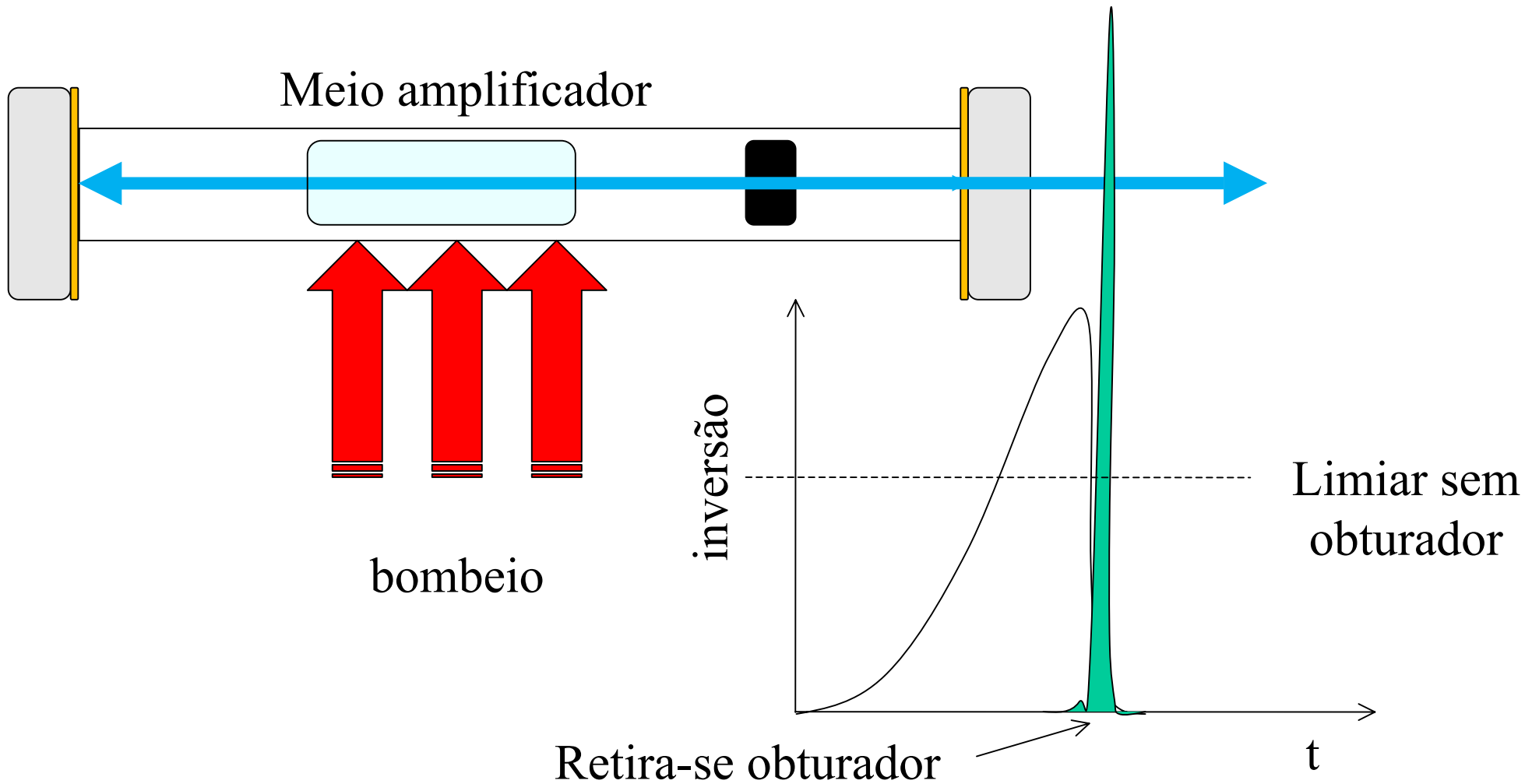


- Contínuo:
- Pulsado:
 - Modulado:
 - Q-switch:
 - Mode -locked:



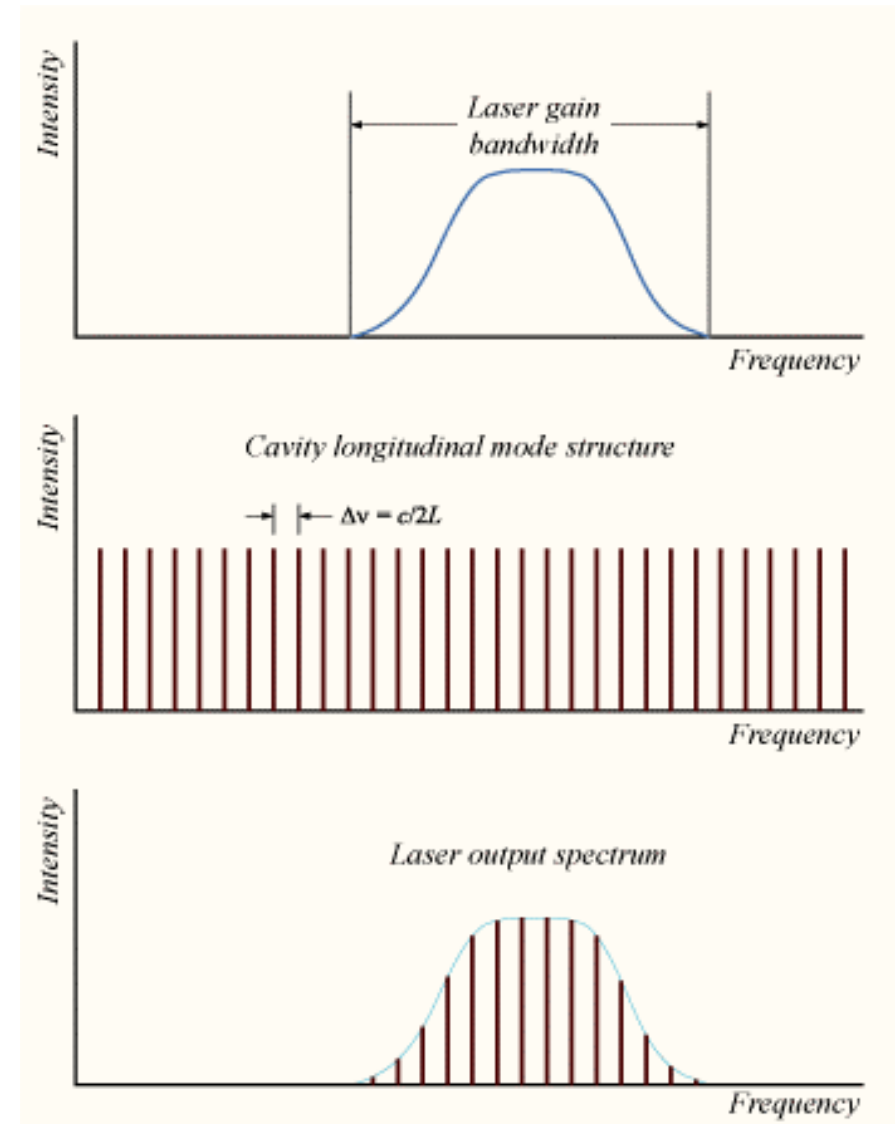
- Matem-se o laser acima do limiar e modula-se o bombeio



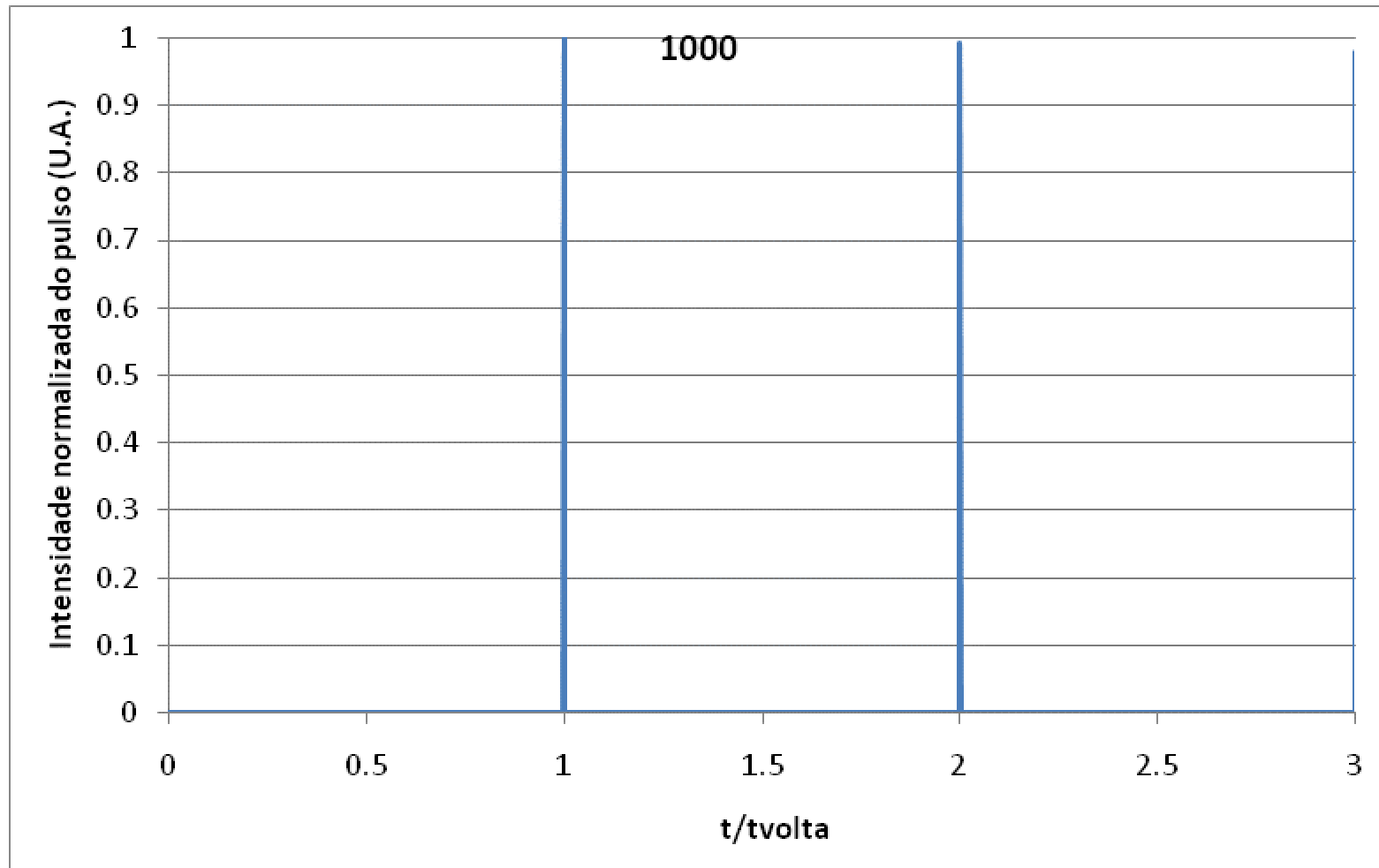




- Se M modos estão correlacionados:
- repetição a cada t_{volta}



Mode-locking



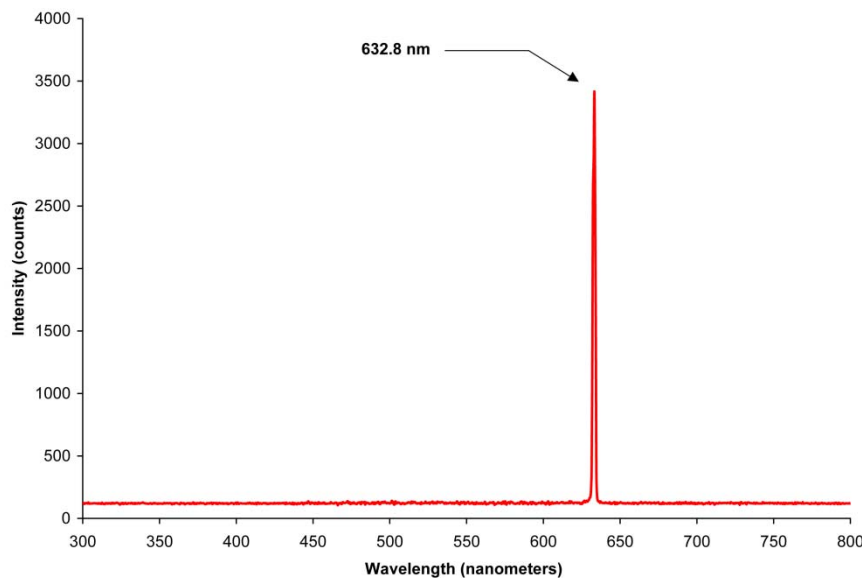
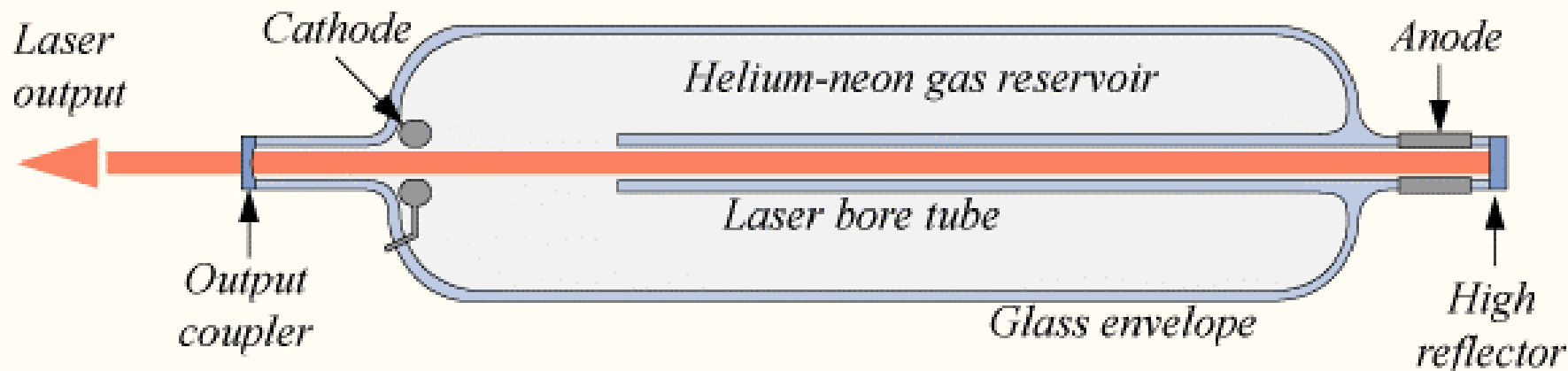


- Intensidade aumenta com M^2 ;
- Largura, decresce com $1/M$
- Lasers com pulsos de 1fs (10^{-15} seg.) podem ser obtidos
- Aplicações:
 - Aumento de potência
 - Taxas de repetição altíssimas
 - Estudo de fenômenos ultra-rápidos
 - Processo de materiais sem aquecimento



- Laser de gas;
 - He-Ne
 - CO₂
- Laser no estado sólido;
 - Nd-YAG
- Laser de semicondutor
 - III-V
 - Cascata quântica
 - Laser a fibra;
- Laser químico;
 - Eximer (EXPLEX)

Laser de He-Ne



- Descarga de 1000 V;
- Mistura de He:Ne (~10:1)
- Baixa potência
- Operação CW
- Aplicações: Óptica; leitor de código de barras, etc.



- Bombeio do He por descarga elétrica;
- Transferência de energia para o nível $3s_2$ do Ne
- Decaimento para o nível $2P_4$ do Ne e emissão $0.6328 \mu\text{m}$.
- Estado $2P_4$ esvaziado rapidamente.

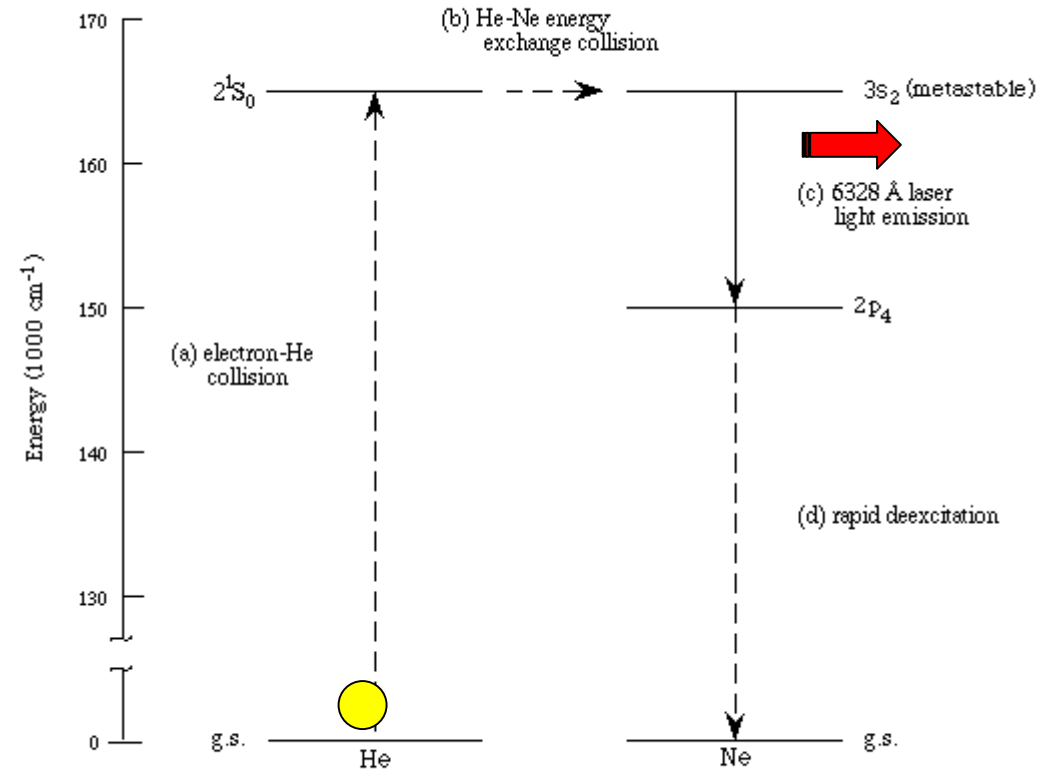
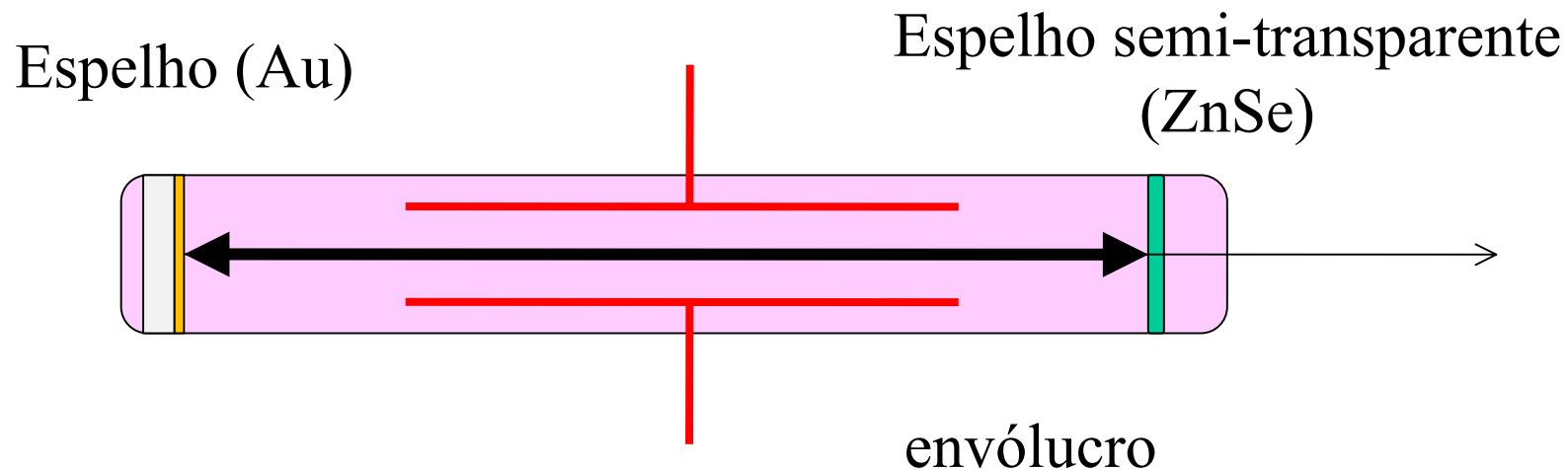


FIG. 3. Simplified atomic energy level diagram showing excited states of atomic He and Ne relevant to the operation of the HeNe laser at 6328 Å .

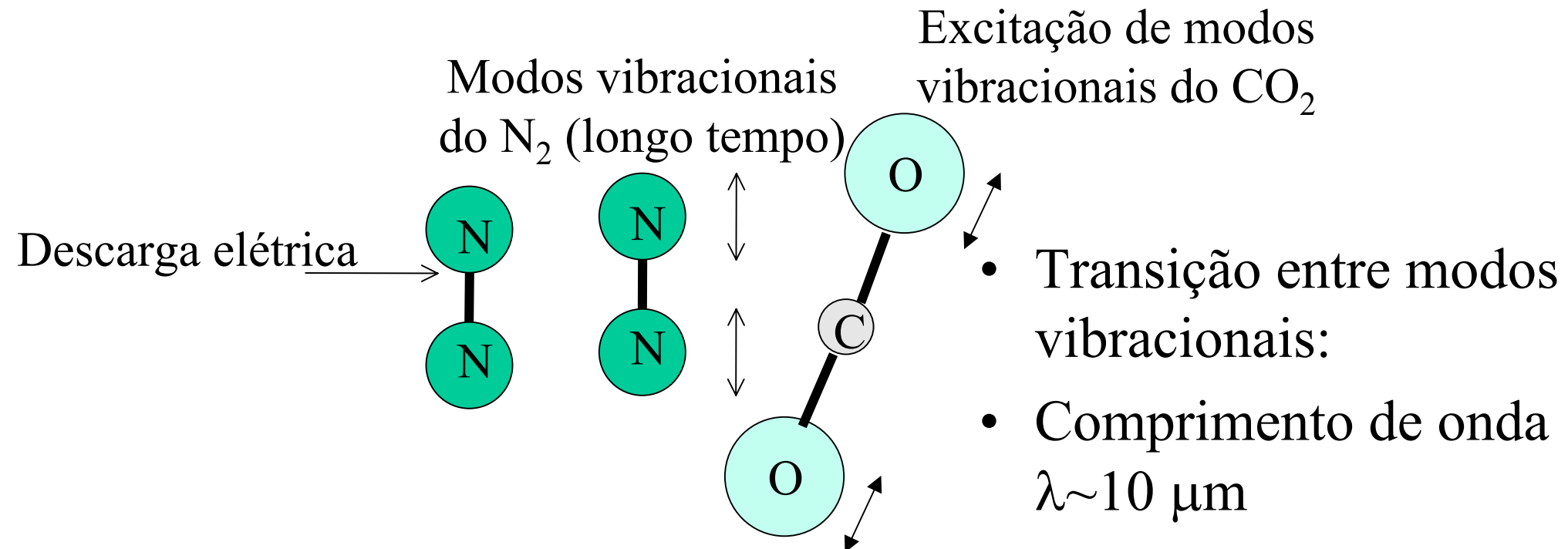


- Potência de mW a 1 bilhão de W (Q-switched)
- Aplicações:
 - Indústria: corte (metal, madeira e concreto) e solda
 - Médico: “pealling” e queima de manchas





- Dióxido de carbono(CO₂) (~10-20 %)
- Nitrogênio(N₂) (~10-20%)
- Hidrogênio (H₂) and/or (Xe) (baixa porcentagem)
- Hélio (He) (resto da mistura)





Corte madeira



Solda

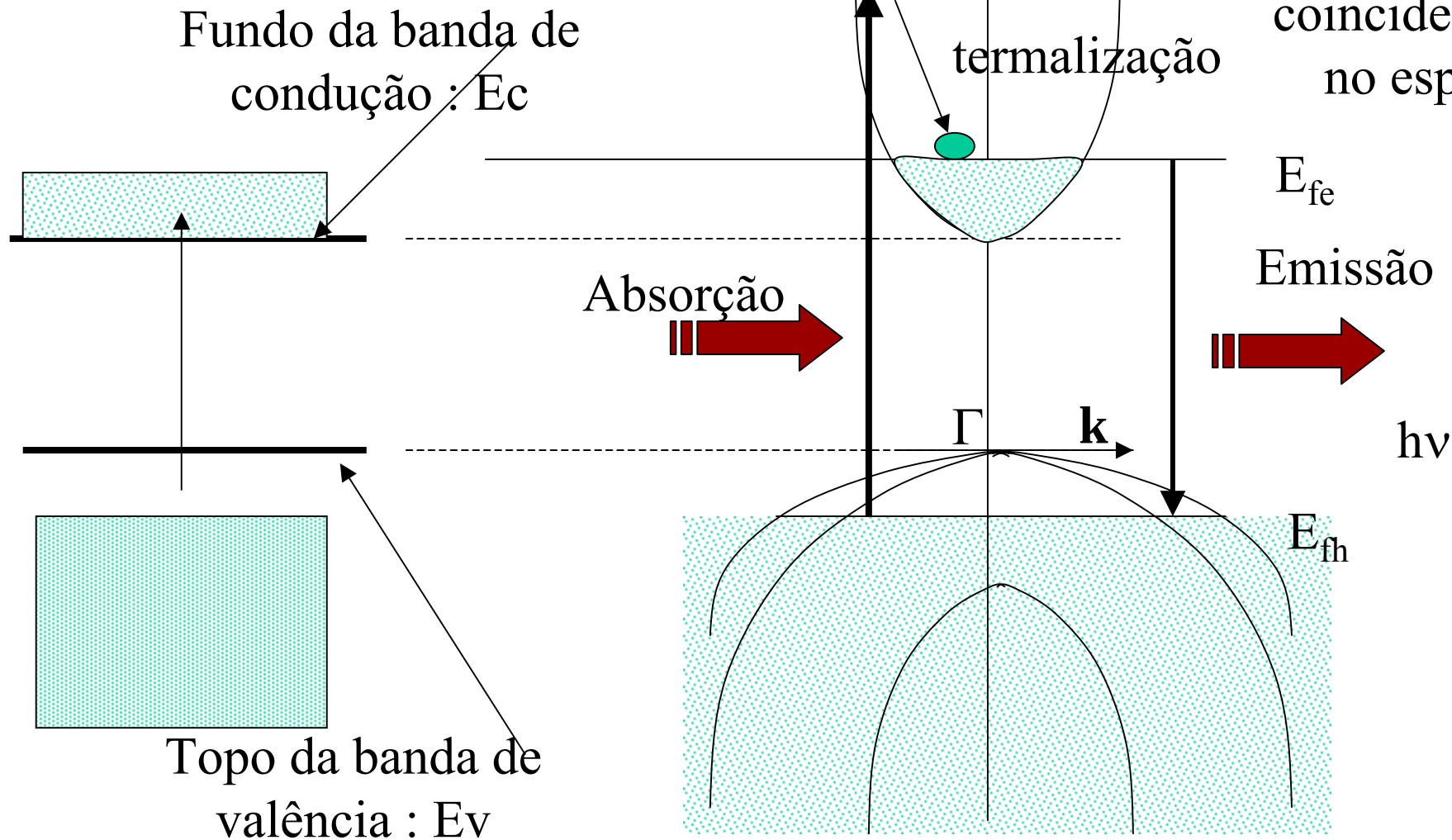


- Dimensões micrométricas
- Injeção eletrônica; eficiência energética alta
- Aplicações:
 - Espectro: infravermelho ao ultra-violeta
 - Armazenagem de dados: CD e DVD;
 - Telecomunicação;
 - Bombeio de outros lasers (estado sólido)
 - Odontologia: cura de resinas (UV) e inflamação (ultra-violeta)
 - impressoras
 - Apontadores,
 - Etc...
- Operação: contínuo e pulsado



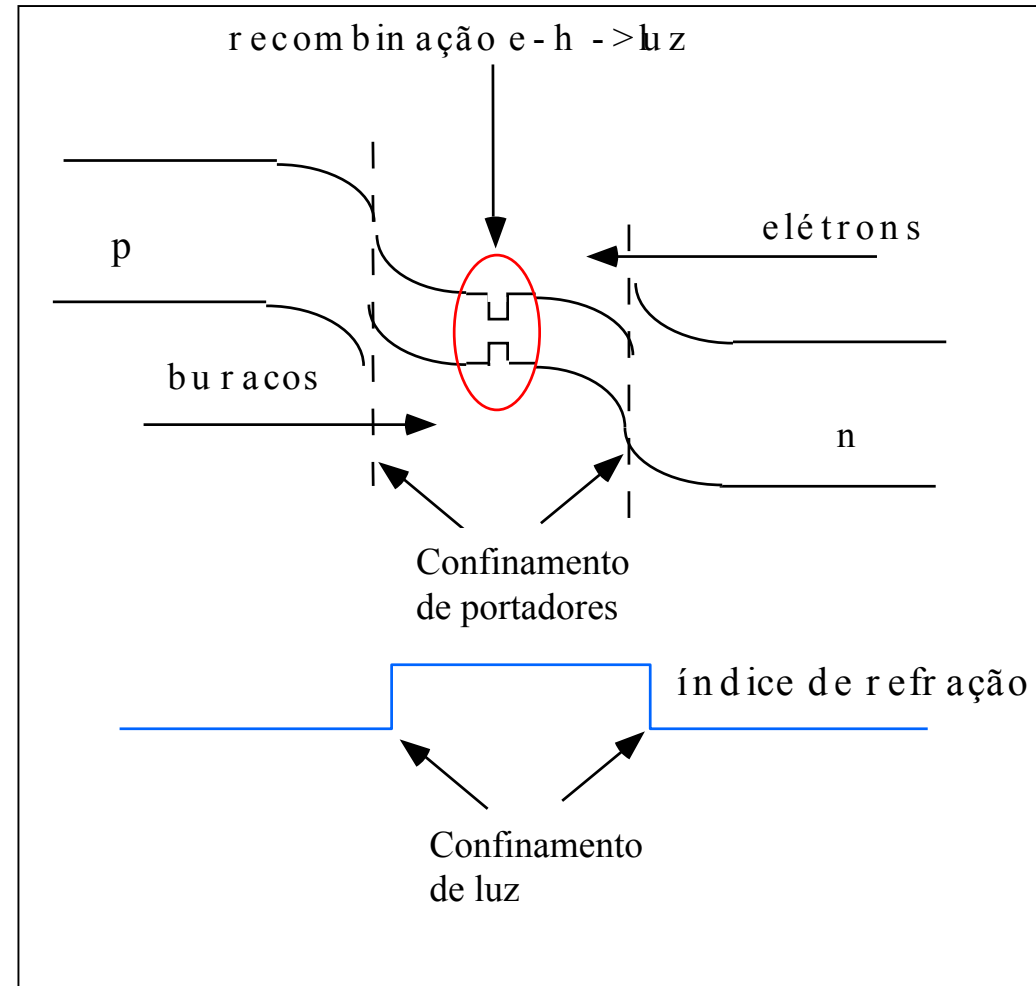
$k_{\text{fóton}} = h/\lambda$ muito pequeno: Transição preserva $\mathbf{k}$

Fóton $\rightarrow$ e - h, e - h $\rightarrow$ Fóton, e - h $\rightarrow$ e, h (Auger)



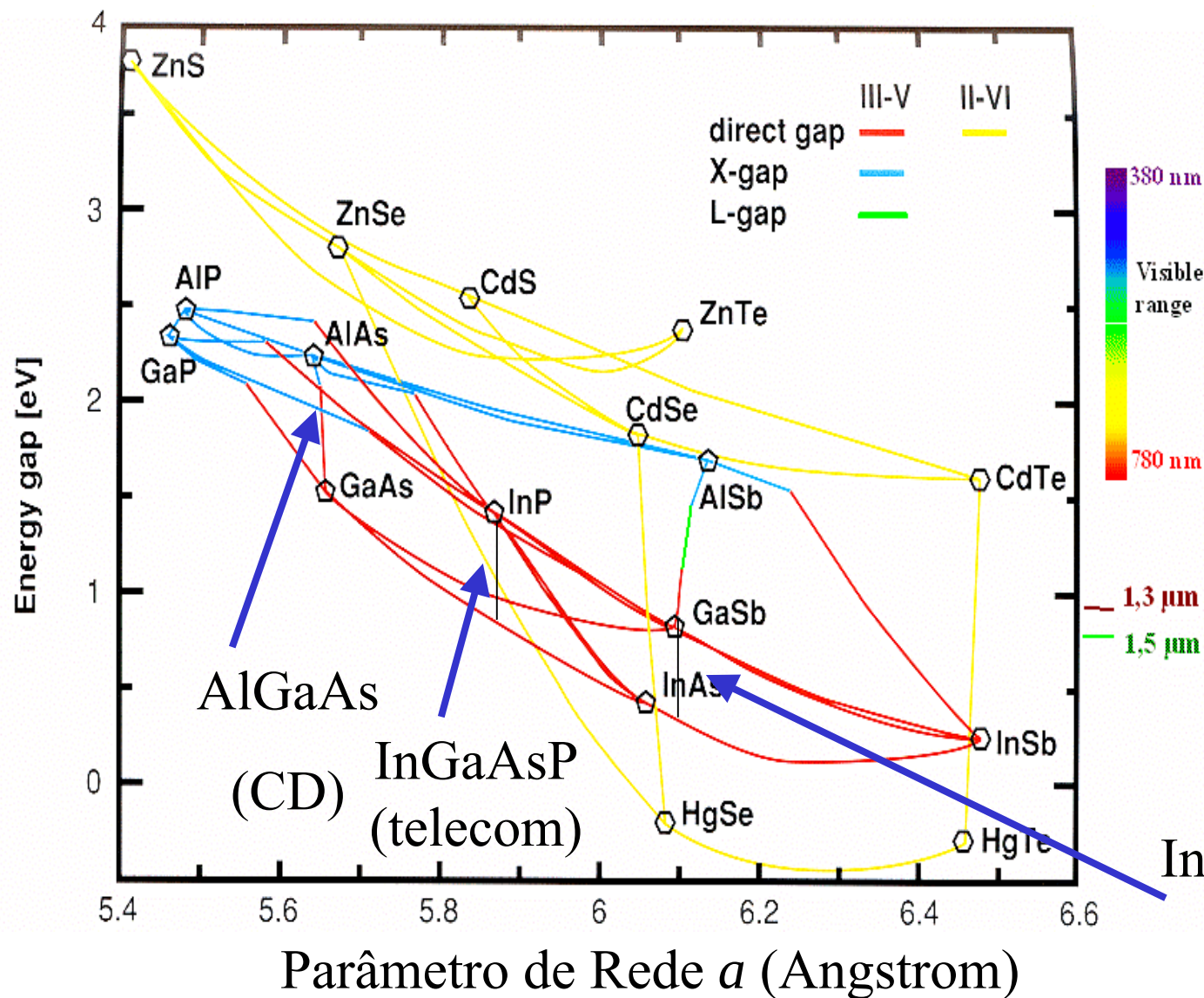


- Diodos de heterojunção:
 - Confinamento de portadores (barreira de potencial) e confinamento óptico (batente de índice de refração)
- Realimentação:
 - Espelhos clivados
 - Espelhos corroídos
 - Bandgap fotônico
 - Quasi reflexão total interna



Epitaxia



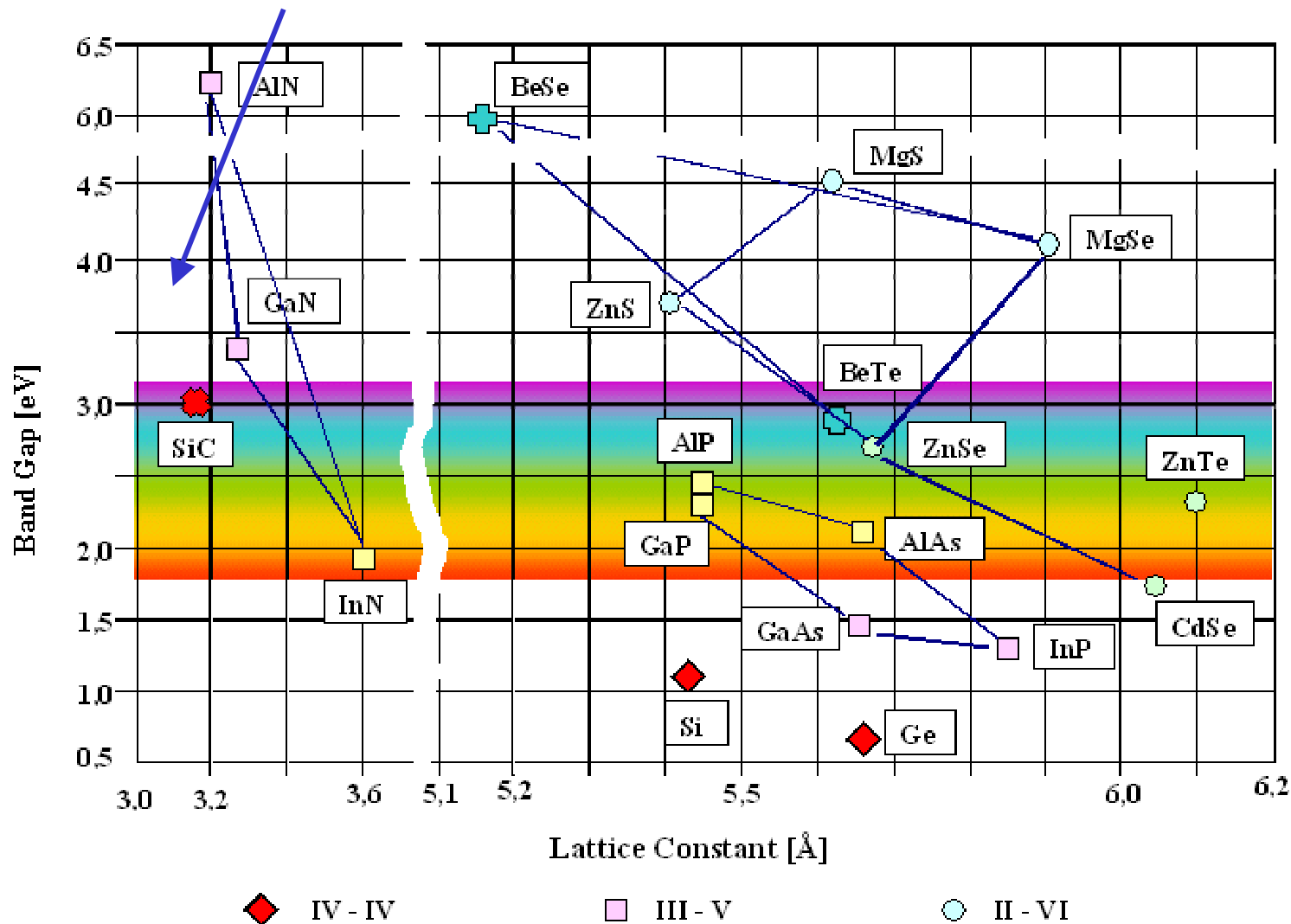


•Binários:
Eg vs. a : ponto

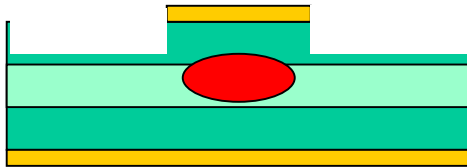
•Ternário:
É possível fixar a e variar Eg (para cada composição, um ponto)

Quaternário:
É possível obter vários Eg(a)

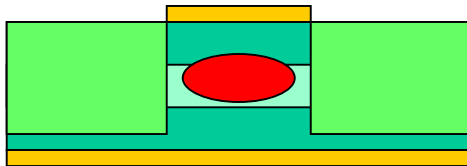
InGaAlN (visível, UV), luz branca



Lasers



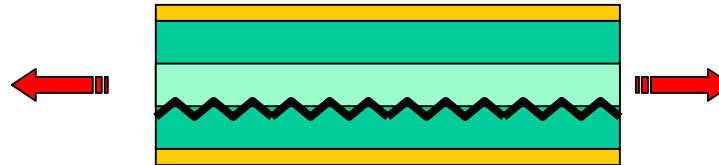
Confinamento fraco
(batente efetivo)



Confinamento forte
(batente real)



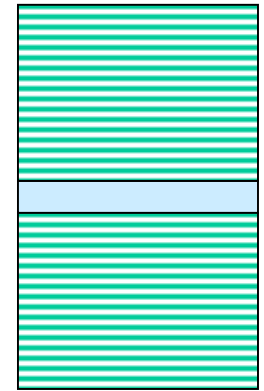
Fabry-Perot



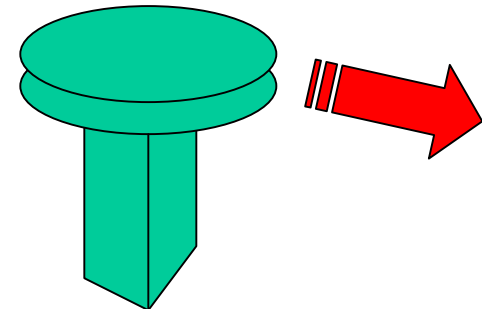
Distributed feedback (DFB)



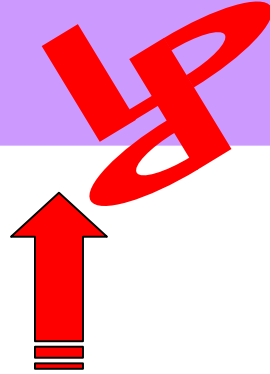
Distributed Bragg Reflector
(DBR)



Vertical Cavity Surface
emitting laser (VCSEL)



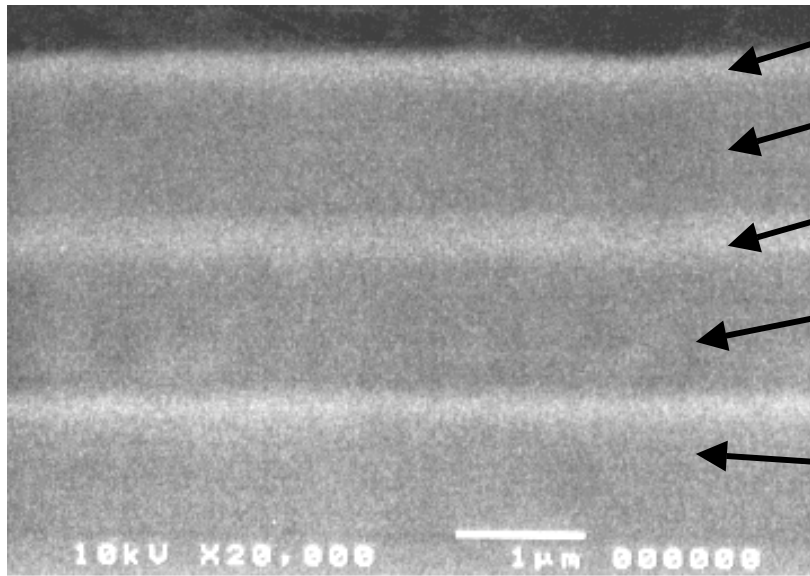
Micro-disk laser



II Laser : Laser faixa larga



↑
Epitaxia



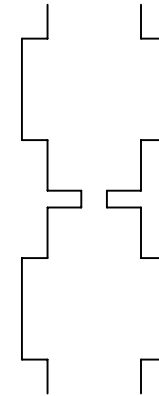
GaAs-p⁺⁺ (0.2 μm)

InGaP-p (1.15 μm)

GaAs-SI (2000 Å)
Cavity/ InGaAs QW

InGaP-p (1.2 μm)

Substrate [001]
GaAs-n⁺⁺



–p⁺GaAs cap etch for isolation.

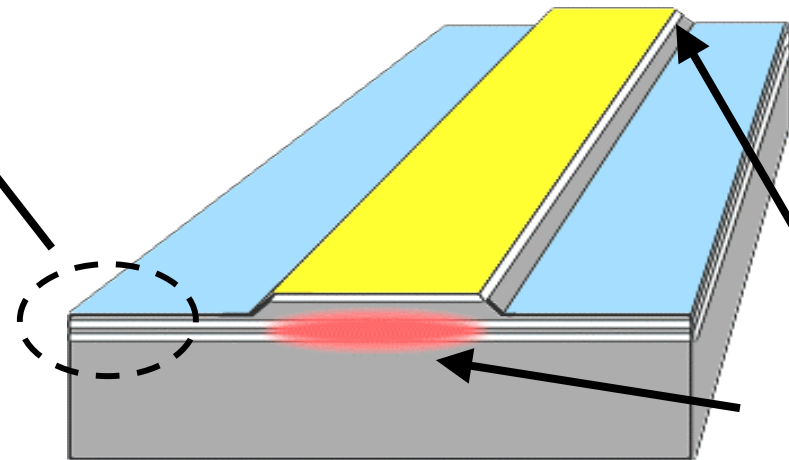
–SiN_x deposition

–SF₆ etching a window for contact

–Metallization:

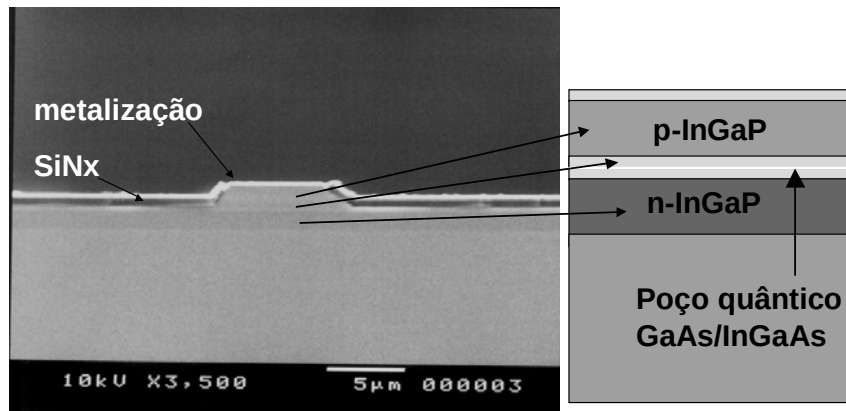
•Ti/Pt/AU

•Au/Ge/Ni (after substrate thinning)



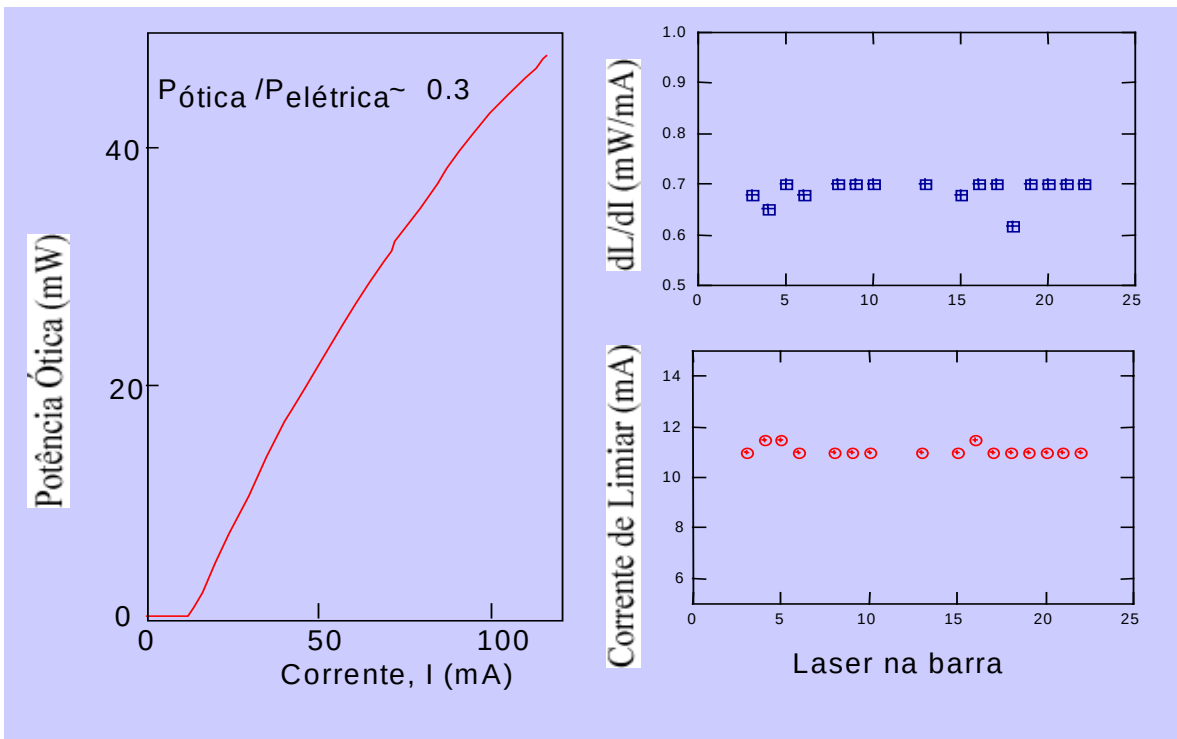
Espelho
clivados

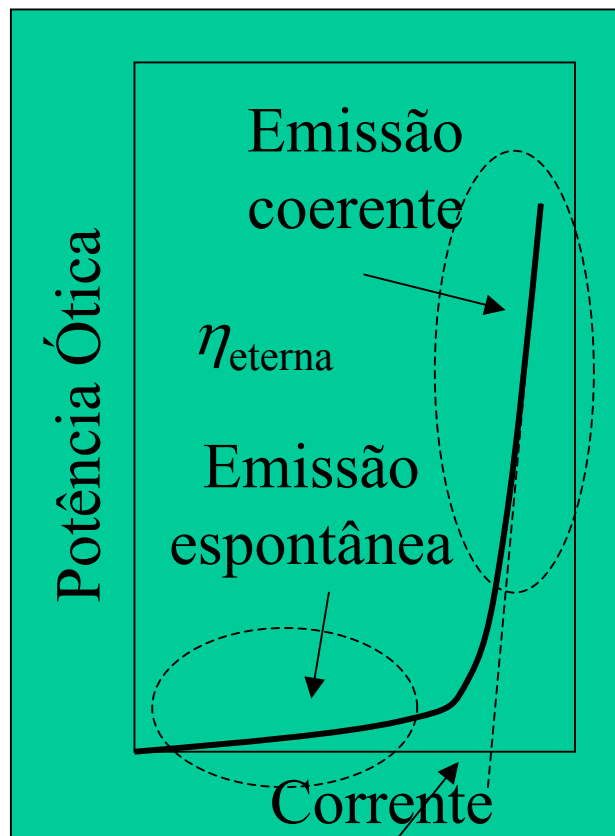
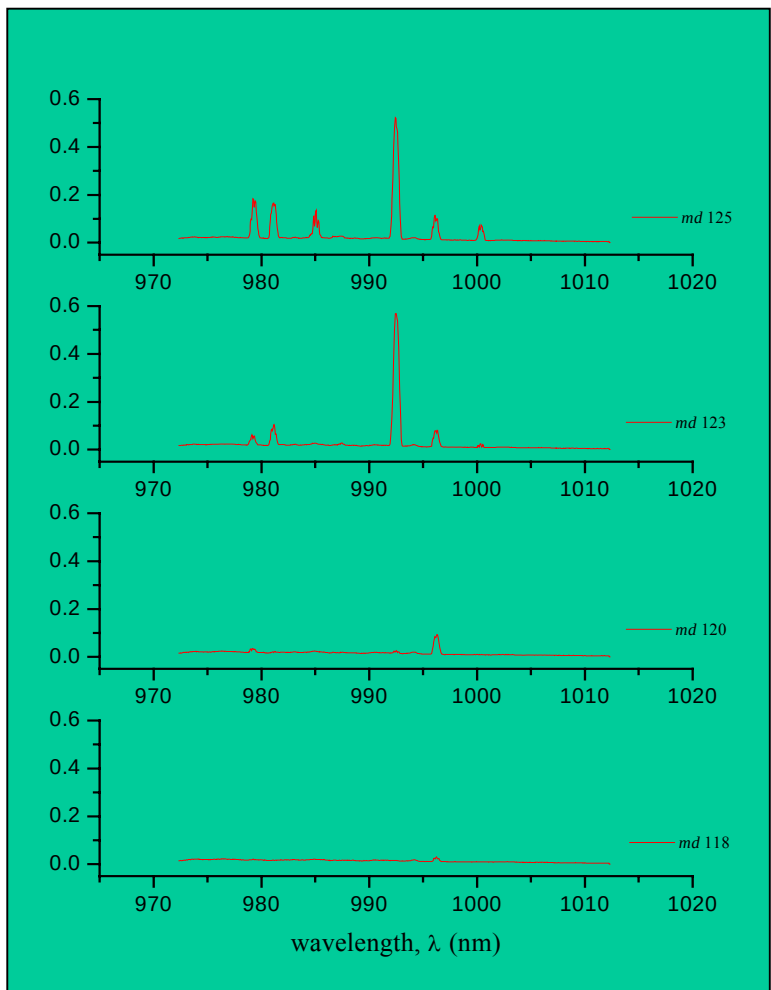
Laser: Ridge InGaP/GaAs/InGaAs



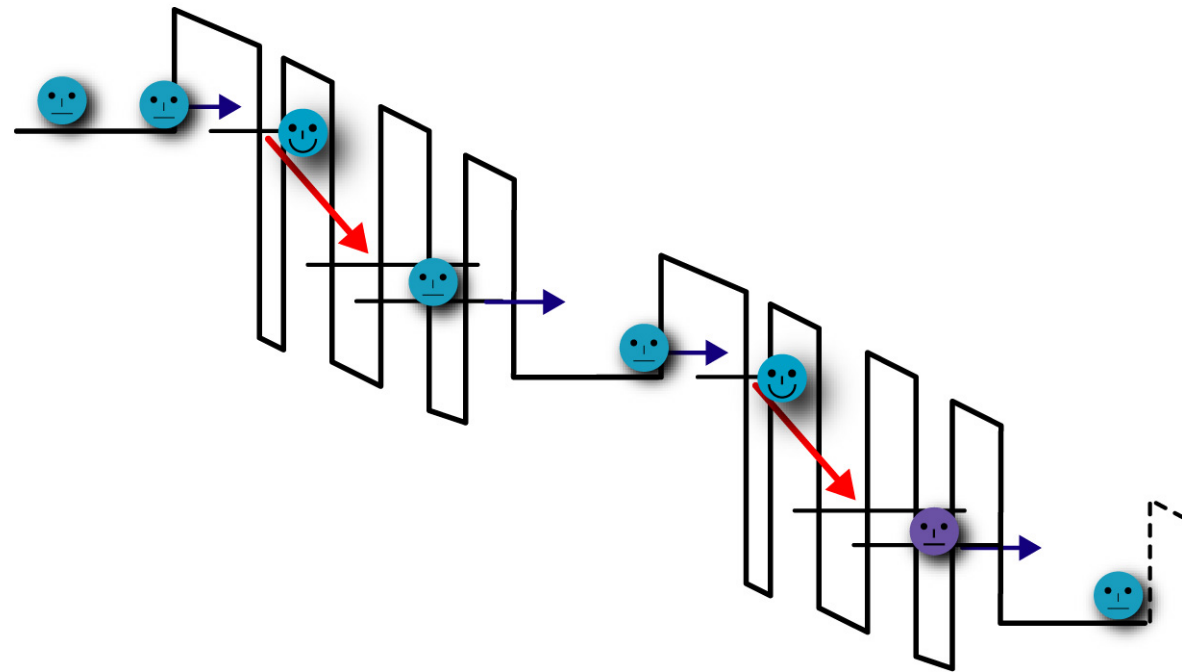
- Crescimento por CBE
- Para a interconexão paralela:

- Alta eficiência total (*wall plug efficiency*)
- Uniformidade em I_{th} e dL/dI

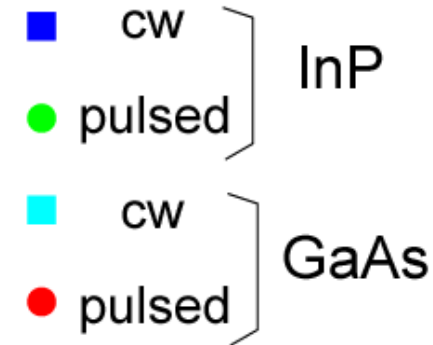
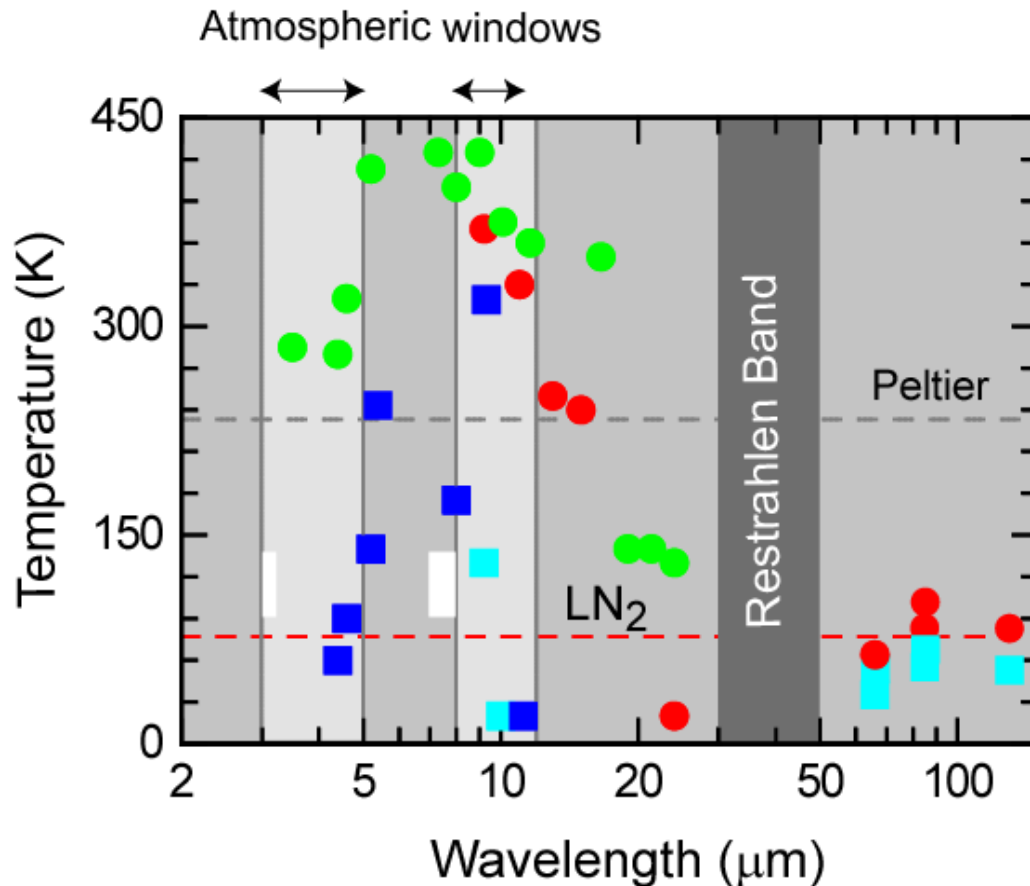




limiar



Cascade: N repetition of a period
 -> 1 electron may generate N photons, (Dr. *Jerome Faist*)

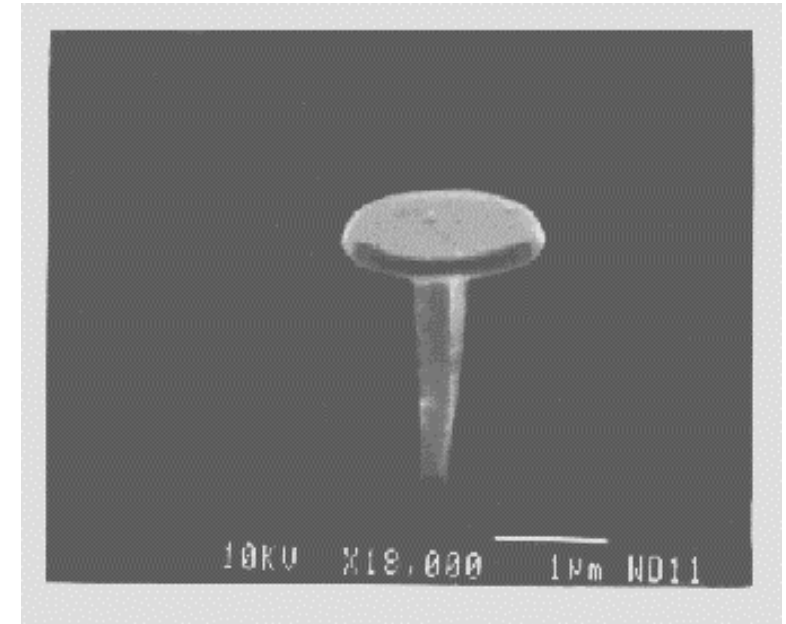
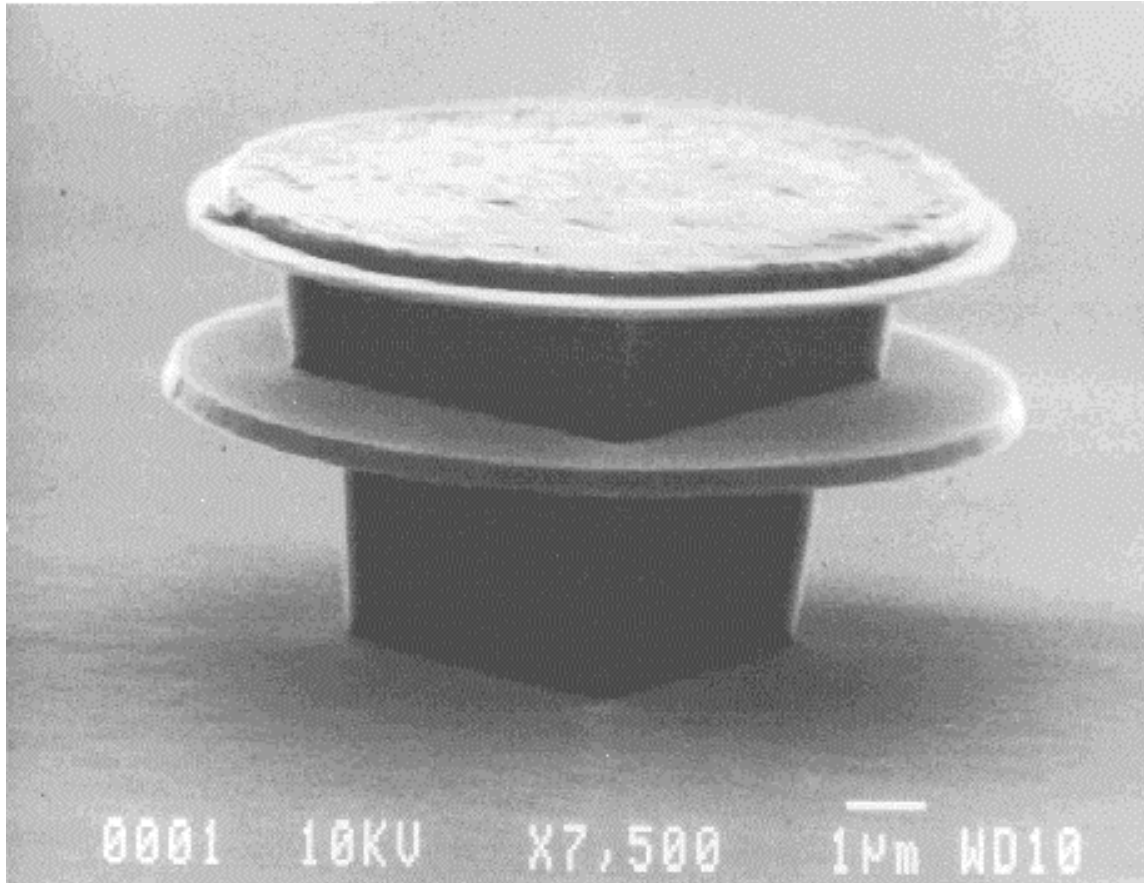


- Good Mid-IR coverage
- Terahertz promising

Data:

- Univ. Neuchatel
- Bell Labs
- Thales
- TU Vienna
- Northwestern
- W. Schottky
- INFN Pisa

Dr. Jerome Faist



- Laser UV
- Aplicação:
 - Cirurgia corretiva de olhos (principalmente)
 - Litografia (produção de microcircuitos)
- Operação:
- Pulsado: 10 ns em 100Hz
- Alta potência: $\sim 10^3$ Joule/pulso (100 bilhões de Watts)

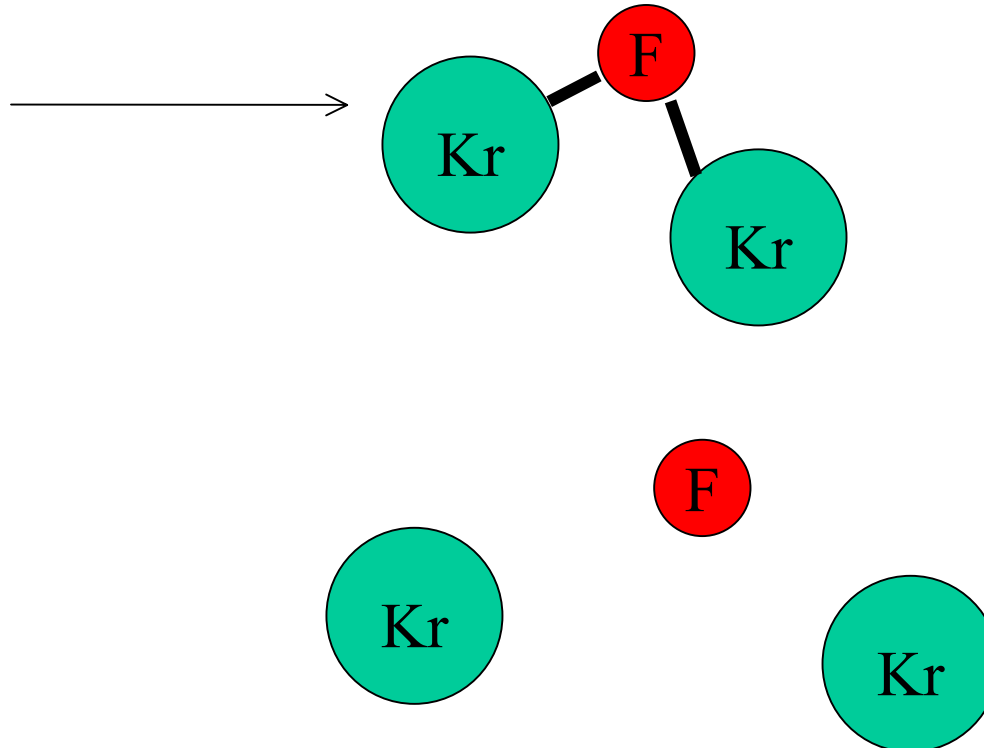
Excimer	Comprimento de onda	Potência relativa
Ar ₂ *	126 nm	
Kr ₂ *	146 nm	
F ₂	157 nm	10
Xe ₂ *	172 & 175 nm	
ArF	193 nm	60
KrF	248 nm	100
XeBr	282 nm	
XeCl	308 nm	50
XeF	351 nm	45
CaF ₂	193 nm	
KrCl	222 nm	25
Cl ₂	259 nm	
N ₂	337 nm	5

Baixa penetração, alta focalização, nenhum aquecimento: perfeito para tecidos delicados.

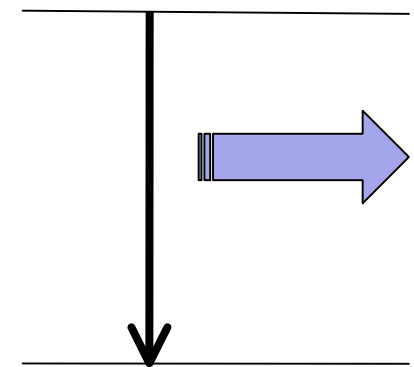


- Estados: dimer ou complexo : excitation +dimer
- Gás nobre e halogênio:

Descarga
elétrica ou
feixe de
elétrons



Estado excitado
molecular



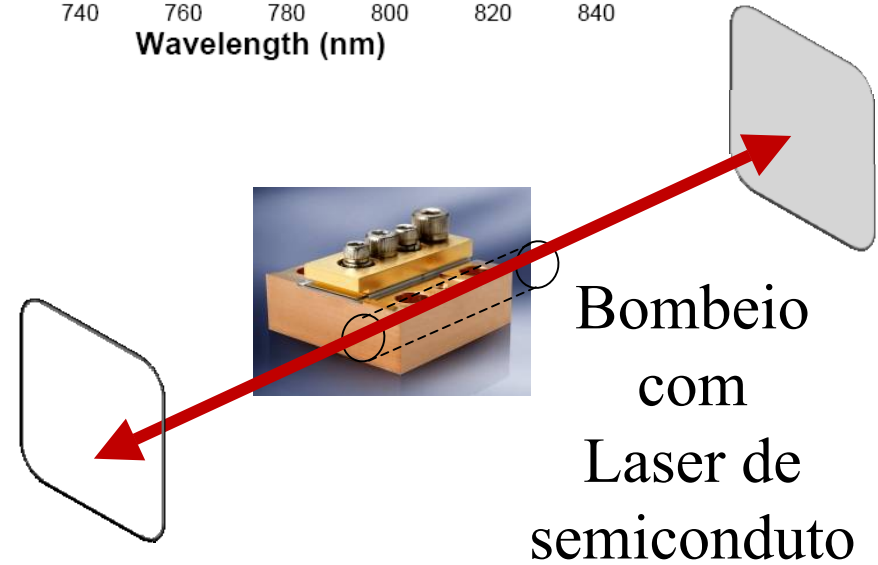
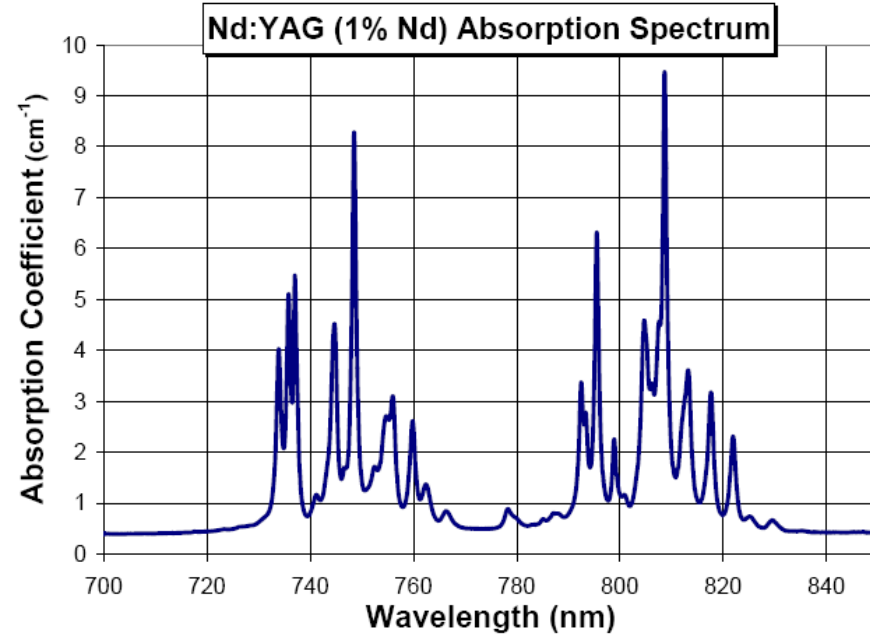
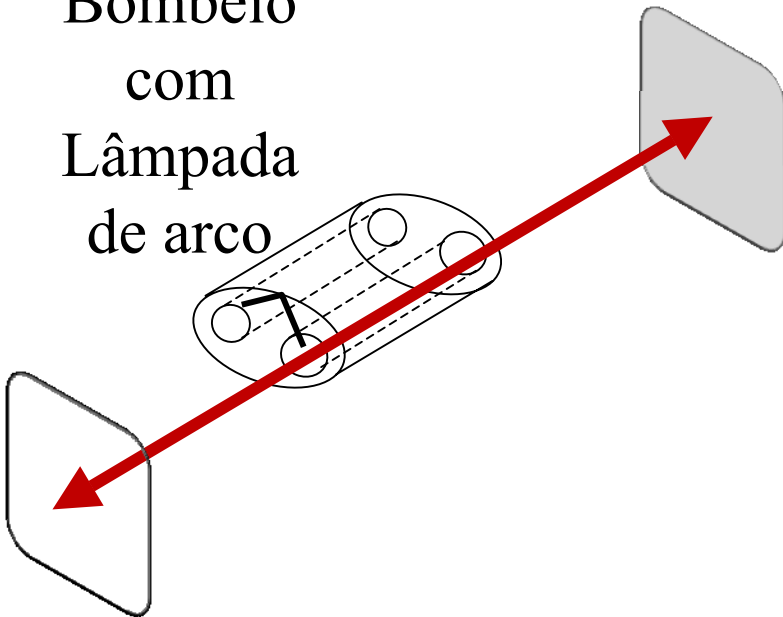
Estado atômico
desexcitado



- **$\text{Nd:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$:**
- **Nd^{3+} é um dopante substituindo o Y**
- **Comprimento de onda Mais comum:
 $1.064\text{ }\mu\text{m}$**
- **Aplicações:**
 - **Oftalmologia**
 - **Dermatologia**
 - **Odontologia**
 - **Industrial: Corte e solda**

- Bombeio Óptico;
- Estados do Nd^{3+} :
 - $^4\text{F}_{3/2}$
 - $^4\text{I}_{11/2}$

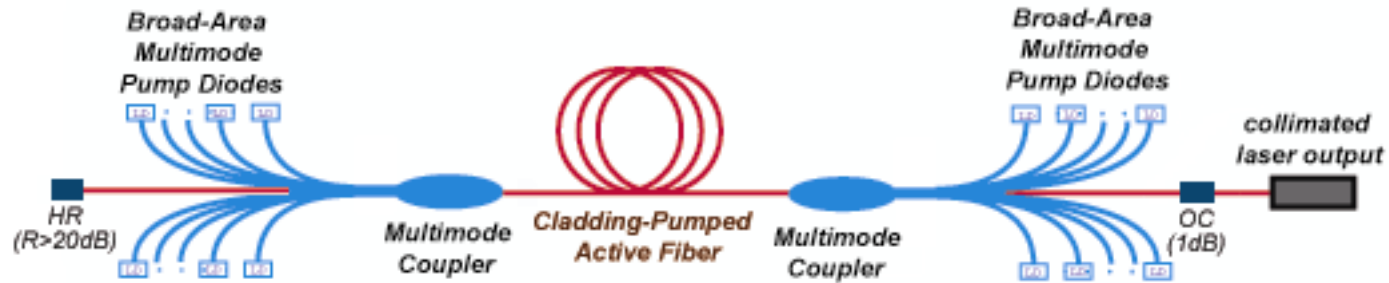
Bombeio
com
Lâmpada
de arco



Bombeio
com
Laser de
semiconduto



Solda a distância

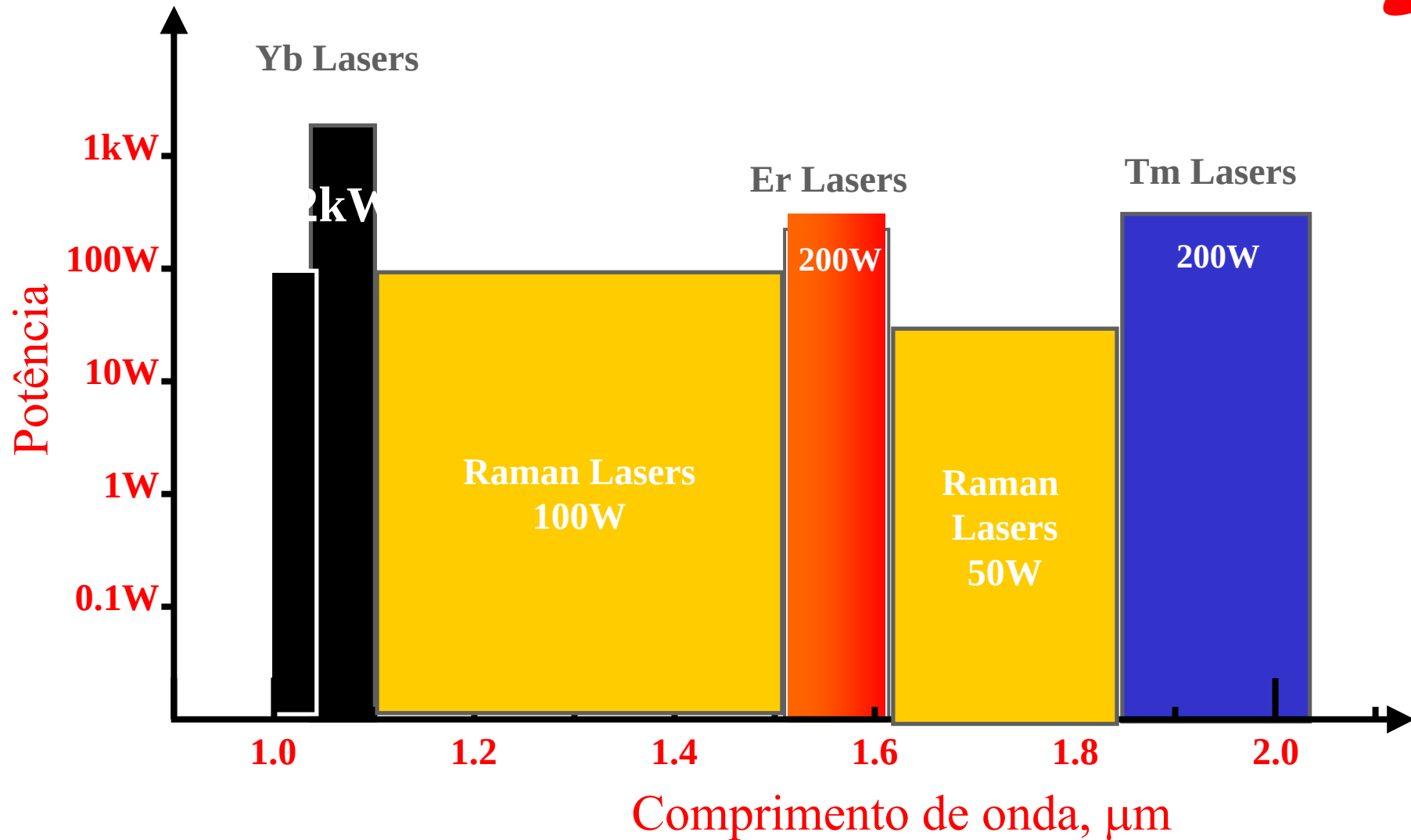


Active Fiber:

Multi-Clad, Circular Cladding,
Low Diameter, ~2-10m Total Length
High Yb³⁺ Concentration

Pump Diodes:

Multimode
90μm stripe
6W to 20W Output Power



Laser de fibra



OBRIGADO!

fratesch@ifi.unicamp.br