

<http://www.if.ufrgs.br/~marcia/textos.html>

*Light
Amplification by
Stimulated
Emission of
Radiation*

Amplificação da Luz por *Emissão
Estimulada* da Radiação

Características da luz laser

- Monocromática
- Colimada
- Coerente

Características específicas

- Comprimento de onda λ
- Potência
- Regime de operação
 - Contínuo (sempre ligado)
 - Pulsado (tempo de pulso)
- Qualidade do feixe

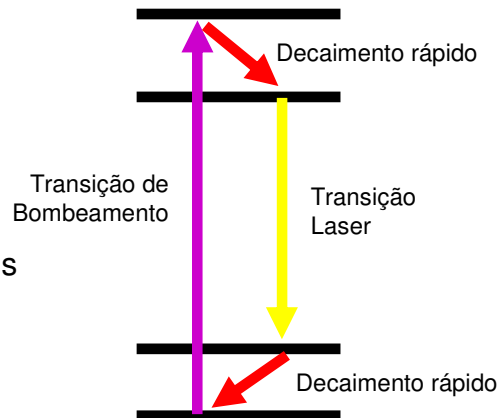
EXEMPLOS

Laser	λ (μm)	Potência (W)	Tempo
CO ₂	10,6	50 kW	Contínuo
Nd:YAG	1,06	5 kW	Contínuo
Nd:YAG	1,06	500 MW	ns, ps, fs
Diodo	vis, IR	3000W	Contínuo
Diodo (laser pointer)	0,8	0,5 mW	contínuo

Lasers

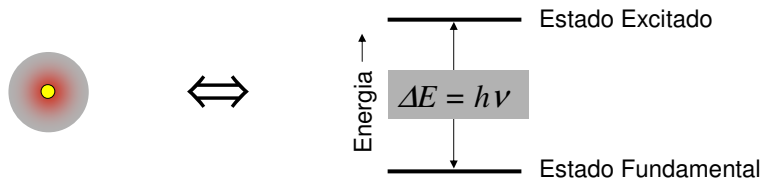
* Tradução e adaptação livre das aulas do Professor Rick Trebino em: www.physics.gatech.edu/frog

- Emissão Estimulada
- Ganho
- Inversão
- O Laser
- Sistema de quatro-níveis
- Limiar
- Alguns lasers



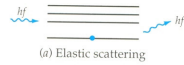
LEMBRETE: Vibrações atômicas e moleculares correspondem a níveis de energia excitados em mecânica quântica.

Níveis de energia são tudo em mecânica quântica!

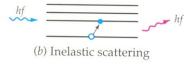


O átomo (ou molécula) está vibrando numa frequência ν .

Fenômenos que podem ocorrer quando um fóton incide sobre um átomo:



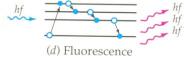
Espalhamento elástico



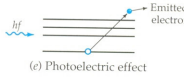
Espalhamento inelástico



Absorção ressonante



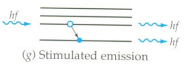
Fluorescência / Fosforescência



Efeito Fotoelétrico (luz UV-VIS)



Espalhamento Compton (raio X)

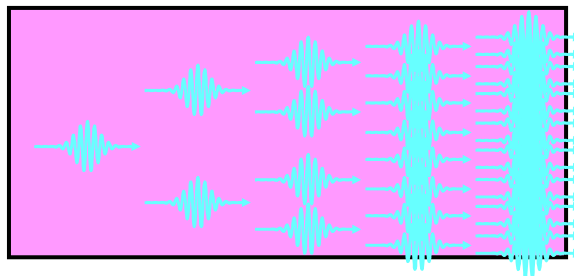


—————> **Emissão Estimulada**

Emissão Estimulada leva a uma reação em cadeia e a emissão laser.

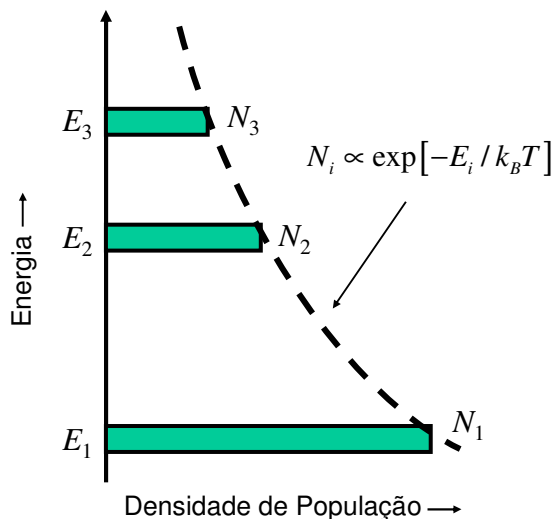
Se um meio tem muitas moléculas em estados excitados, um fóton pode se transformar em muitos fótons!!!

Meio Excitado



Esta é a essência do laser. O fator pelo qual um feixe incidente é amplificado pelo meio é chamado de **ganho** e é representado por G .

Em que estados de energia as moléculas se encontram?
 Boltzmann mostrou que a relação entre a densidade de moléculas N_i num estado i depende da energia e da temperatura



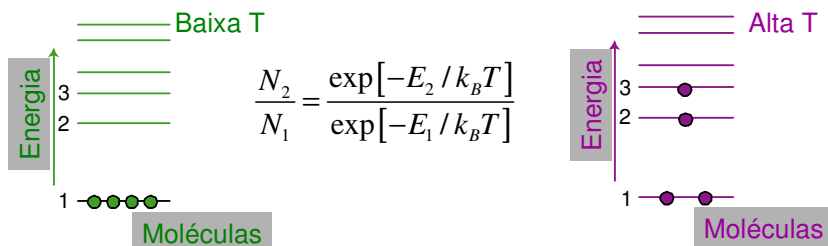
N_i densidade de moléculas num estado i (i.e., o número de moléculas por volume).

T é a temperatura, e k_B é a constante de Boltzmann.

Distribuição de Maxwell-Boltzmann

Sem colisões as moléculas tendem a permanecer no seu estado de mais baixa energia disponível.

Colisões podem levar a molécula para estados de energia mais altos. Quanto maior a temperatura, mais isto acontece.



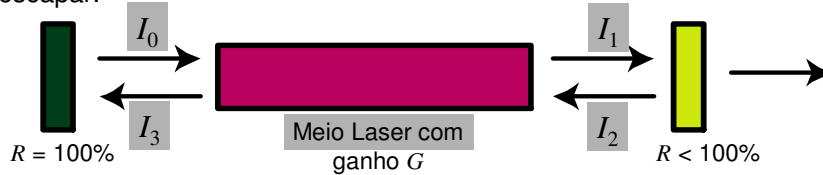
No equilíbrio, a taxa de população dos dois estados é: $N_2 / N_1 = \exp(-\Delta E / k_B T)$,
 onde $\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu$

e $k_B T$ é a energia média dos átomos à temperatura T

Como resultado, estados com energia mais alta são menos populados que o estado fundamental, e a taxa de absorção será muito mais alta que a taxa de emissão estimulada!

O Laser

O laser é um meio que armazena energia, rodeado por dois espelhos. Um espelho de saída parcialmente refletor deixa um pouco de luz escapar.



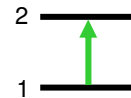
A emissão de laser acontece se o feixe aumenta sua intensidade durante um ciclo (ida e volta), isto é, se: $I_3 \geq I_0$

Geralmente, **perdas** adicionais em intensidade ocorrem, por causa de absorção, espalhamento e reflexões. Em geral, um laser irá emitir laser se num ciclo:

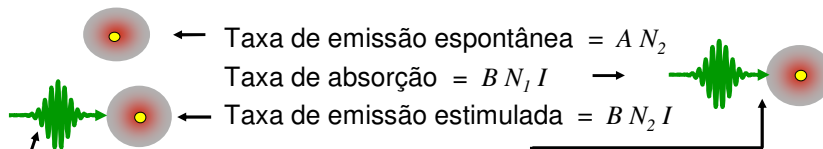
$$\text{Ganho} > \text{Perda}$$

Se diz que o laser atingiu o **Limiar (Threshold)**.

Calculando o ganho: Coeficientes A e B de Einstein



Em 1916, Einstein considerou as várias taxas de transição entre estados moleculares (por exemplo, estados 1 e 2) envolvendo a Irradiância I , onde N_1 e N_2 é a densidade de moléculas (número de moléculas por volume) em cada estado 1 e 2, respectivamente



No equilíbrio, a taxa de transições para cima ($1 \Rightarrow 2$) é igual a taxa de transições para baixo ($2 \Rightarrow 1$):

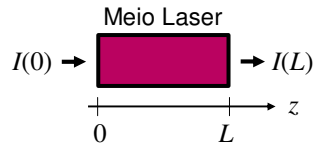
$$B_{12} N_1 I = A N_2 + B_{21} N_2 I$$

Lembre da Distribuição de Maxwell-Boltzmann

$$\text{Resolvendo para } N_2/N_1: (B_{12} I) / (A + B_{21} I) = N_2/N_1 = \exp[-\Delta E/k_B T]$$

Ganho do Laser

Desconsiderando a emissão espontânea:



$$\frac{dI}{dt} = c \frac{dI}{dz} \propto BN_2 I - BN_1 I \quad [\text{Emissão Estimulada menos absorção}]$$

$$\propto B[N_2 - N_1] I$$

A solução é:

$$I(z) = I(0) \exp\{\sigma [N_2 - N_1] z\}$$

Constante de proporcionalidade

Normalmente, $N_2 < N_1 \rightarrow$ temos perda (absorção)

Se $N_2 > N_1 \rightarrow$ temos ganho, que definimos como G :

$$G \equiv \exp\{\sigma [N_2 - N_1] L\}$$

$$\text{If } N_2 > N_1: \quad g \equiv [N_2 - N_1] \sigma$$

$$\text{If } N_2 < N_1: \quad \alpha \equiv [N_1 - N_2] \sigma$$

Inversão

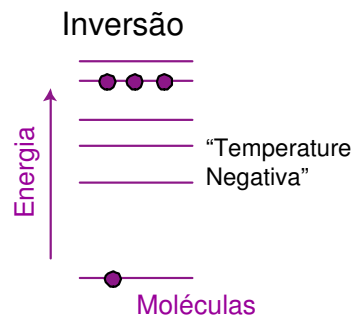
Para obter $G > 1$, isto é, emissão estimulada deve ser maior que a absorção:

$$BN_2 I > BN_1 I$$

Ou, equivalentemente,

$$N_2 > N_1$$

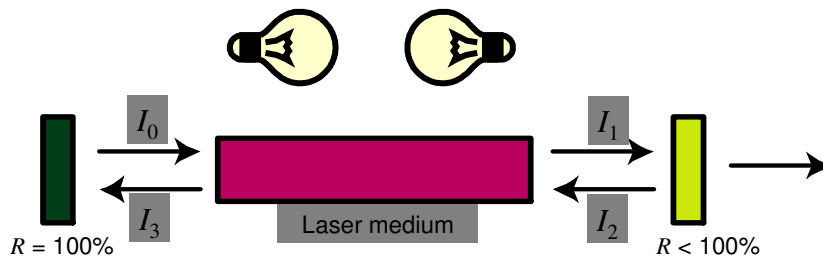
Esta condição é chamada de **inversão**. E não ocorre naturalmente. É uma condição inerente a um estado de não equilíbrio.



Para se conseguir inversão, é preciso atingir o meio laser com muita força e escolher este meio apropriadamente.

Conseguindo a inversão: Bombeando o meio laser

Seja I a intensidade de uma lâmpada (por exemplo, um flash) usada para bombear energia no meio laser:



Será que esta intensidade será suficiente para conseguir a inversão, $N_2 > N_1$?

Irá depender dos níveis de energia do meio laser.

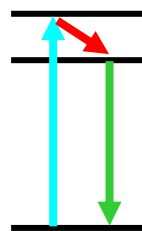
Sistema de três níveis

Considerando o número total de moléculas como N , onde:

$$N \equiv N_1 + N_2$$

$$\Delta N \equiv N_1 - N_2$$

↑
Nível 3 decai rápido, portanto a população é zero.



$$\Delta N = N \frac{1 - I/I_{sat}}{1 + I/I_{sat}}$$

onde: $I_{sat} = A/B$

I é a **intensidade de bombeamento**.

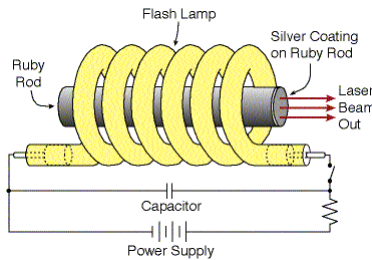
I_{sat} é a **intensidade de saturação**.

Se $I > I_{sat}$, ΔN é negativo! \rightarrow **Temos Inversão de População!**

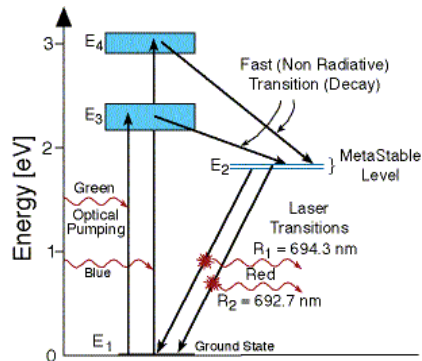
Laser de Rubi – 3 níveis

Inventado em 1960 por Ted Maiman no Hughes Research Labs, este foi o primeiro laser.

- Pequeno tubo de rubi (diâmetros de 6 mm até 20 mm e comprimentos de 20 cm) rodeado por uma lâmpada de flash (luz muito intensa)
- Rubi: cristal transparente de alumina com 0,05% de Cr (cor vermelha)



- Laser de estado sólido.
- Emite radiação no vermelho.
- Bombeamento óptico.
- Radiação emitida em pulsos.



Sistema de quatro-níveis

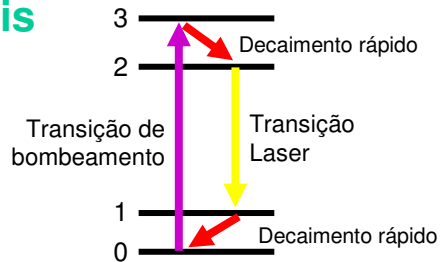
Vamos assumir que o estado mais baixo do laser é 1 que decai rapidamente para o nível 0.

O número total de moléculas é N :

$$N \equiv N_0 + N_2 \quad N_0 = N - N_2$$

$$\Delta N = -N \frac{I/I_{sat}}{1 + I/I_{sat}}$$

onde: $I_{sat} = A/B$

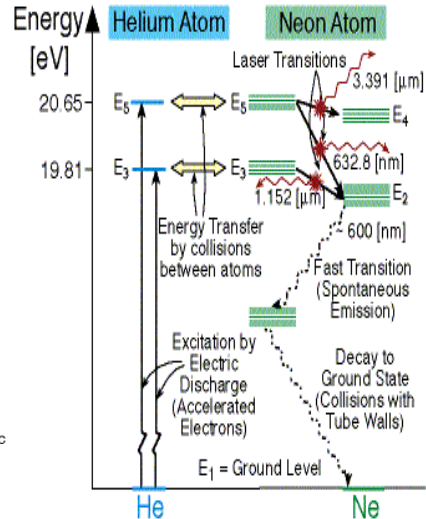
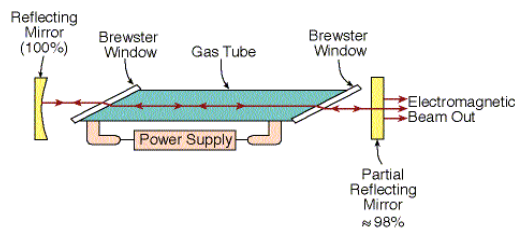


Agora, ΔN é negativo—sempre! \rightarrow Um sistema destes sempre vai gerar laser, pois sempre teremos inversão de população!

Laser de Hélio-Neônio: 4 níveis

Elétrons energéticos gerados numa descarga no gás colidem com átomos de He e excitam estes átomos, os quais colidem com átomos de Ne e transferem energia excitando estes átomos, um sistema ideal de 4 níveis.

A mistura do gás é de 85-90% de He, para 10-15% de Ne, numa taxa de 1:6 a 1:10.



Alguns dados sobre Lasers Comerciais de He-Ne :

Wavelength:	632.8 [nm]
Output Power:	0.5-50 [mW]
Beam Diameter:	0.5-2.0 [mm]
Beam Divergence:	0.5-3 [mRad]
Coherence Length:	0.1-2 [m]
Power Stability:	5 [%/Hr]
Lifetime:	>20,000 [Hours]

Tipos de Lasers

De Estado Sólido: o material para gerar laser é distribuído numa matriz sólida (como o rubi ou neodímio:ítrio-alumínio garnet "YAG"). Lâmpadas de flash são as fontes de potência. O laser Nd:YAG emite luz no infra-vermelho em 1064 nm.

Semicondutores: chamados também de lasers de diodo são junções pn. Corrente é a fonte de bombeamento. Aplicações: impressoras e CD players.

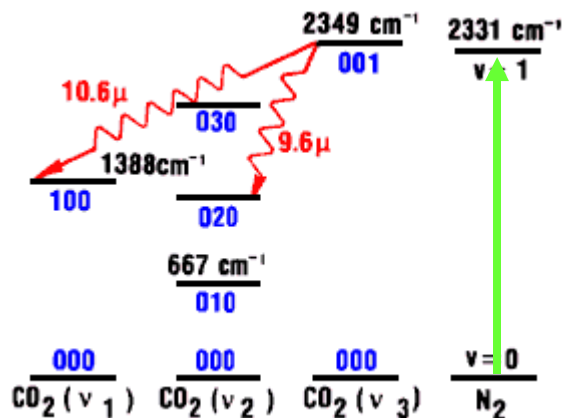
Corante (Dye): usa corantes orgânicos complexos, como rodamina 6G, numa solução líquida ou suspensão, como meio para gerar o laser. São sintonizáveis num intervalo grande de comprimentos de onda.

De Gás: são bombeados por descarga no gás. He-Ne gera laser no visível e no infra-vermelho. Laser de Argônio gera laser no visível e no UV. Lasers de CO₂ emitem luz no infra-vermelho distante (10.6 μm), e são usados para cortar materiais duros.

Excímeros (dos termos *excited* e *dimers*): usa gases reativos, como *chlorine* e *fluorine*, misturados com gases inertes como Ar, Kr, ou Xe. Quando estimulados eletricamente, uma pseudo molécula (dímero) é produzida. Emitem no UV.

Laser de Dióxido de Carbono

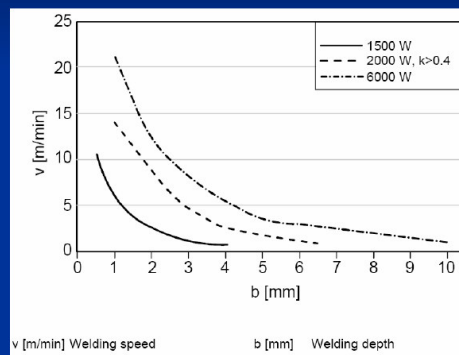
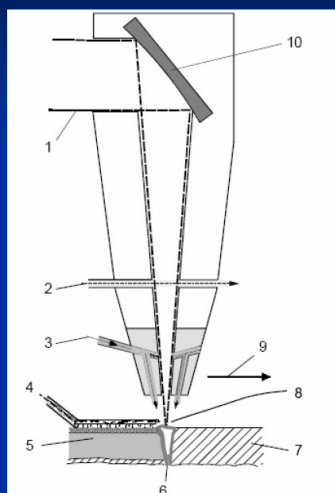
Laser de CO₂ (4 níveis). N₂ é bombeado, transferindo a energia para o CO₂.



Solda com laser de CO₂



Solda com laser - princípio



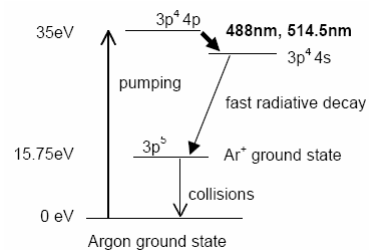
Laser de Hélio Cádmio

O esquema de inversão de população no HeCd é similar ao do HeNe, exceto que o meio ativo são os ions de Cd+.

As transições laser ocorrem no azul e no ultravioleta em 442 nm, 354 nm e 325 nm.

As linhas UV são úteis para aplicações que requerem lasers com comprimentos de onda curtos como em impressões de alta precisão em materiais fotosensíveis, como litografias de circuitos eletrônicos e para fazer cópias em CD's.

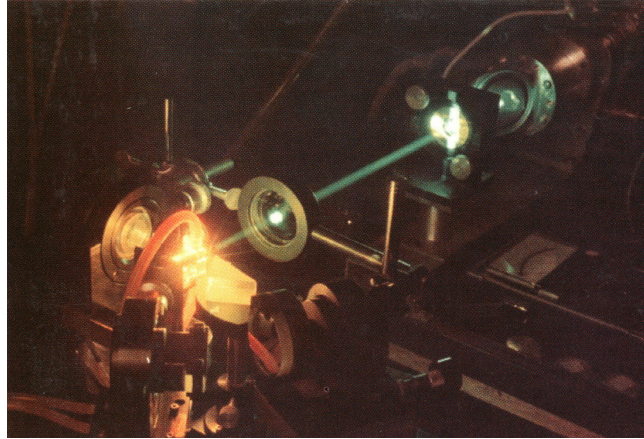
Laser de Ions de Argônio



Linhas do Argônio :

<u>Wavelength</u>	<u>Relative Power</u>	<u>Absolute Power</u>
454.6 nm	.03	.8 W
457.9 nm	.06	1.5 W
465.8 nm	.03	.8 W
472.7 nm	.05	1.3 W
476.5 nm	.12	3.0 W
488.0 nm	.32	8.0 W
496.5 nm	.12	3.0 W
501.7 nm	.07	1.8 W
514.5 nm	.40	10.0 W
528.7 nm	.07	1.8 W

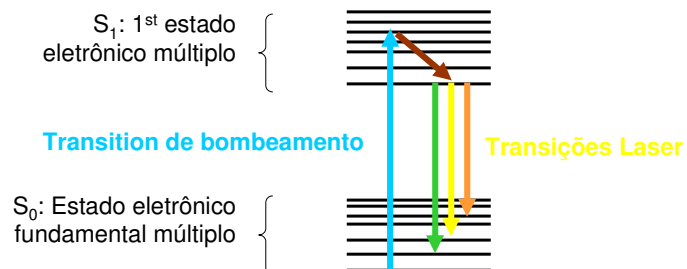
Lasers de Corante (Dye)



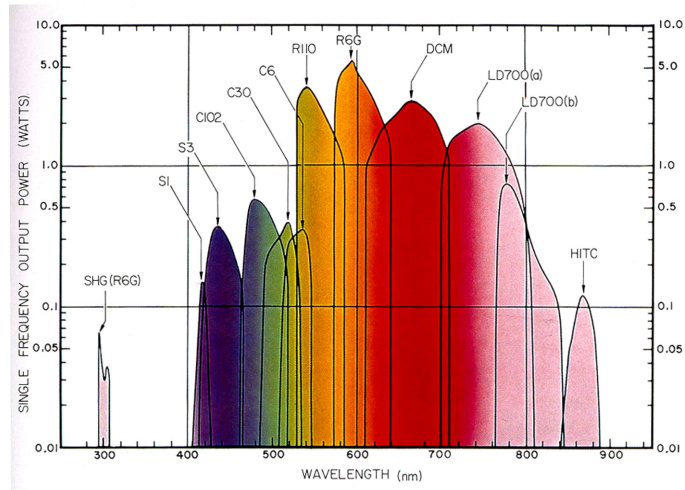
São sistemas ideais de 4 níveis gerando luz num intervalo de ~ 100 nm.

Níveis de energia de lasers de corante

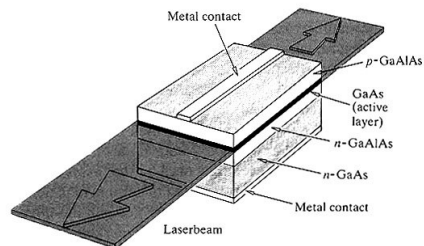
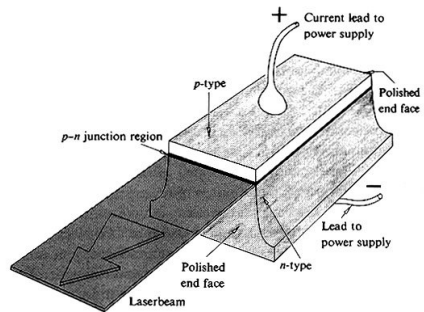
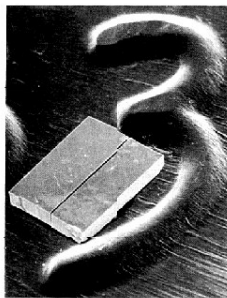
O estado mais baixo do laser pode ser qualquer nível num estado múltiplo S_0 .



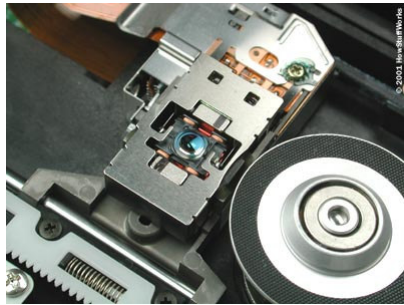
Corantes cobrem o intervalo do visível, infravermelho próximo, e UV próximo.



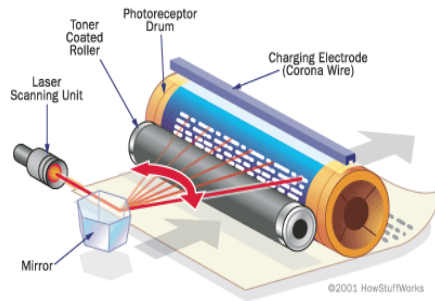
Lasers de Diode



Aplicações de lasers de diodo



Copiar CD's



Impressora