

Capítulo 3 – Laser

3.1 Histórico

A palavra *laser* significa amplificação da luz por emissão estimulada da radiação (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). A luz originada do sol ou de uma lâmpada é emitida espontaneamente quando átomos ou moléculas liberam o excesso de energia sem nenhuma intervenção externa. A emissão estimulada é diferente pois os átomos ou moléculas liberam o excesso de energia quando são estimulados.

No início dos anos 50 surgiu um sistema notável conhecido por *maser*, fruto dos esforços de numerosos cientistas, entre os quais se deve destacar Charles Townes, Alexander Prokhorov e Nikolai Basov, que vieram a dividir o prêmio Nobel de Física em 1964 [29]. O *maser*, que significa amplificação de microondas por emissão estimulada da radiação (*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) é um amplificador de microondas caracterizado por um nível de ruído extremamente reduzido.

O *maser* funciona de um modo pouco convencional e depende diretamente das características da interação quântica entre a matéria e a energia radiante. Em vez de átomos excitados, Townes usou moléculas de amônia como meio ativo. Ao ser excitada por um agente externo a molécula de amônia entra em vibração com uma frequência de microondas. Daí, o processo de emissão estimulada gera um feixe coerente de microondas.

Logo que o *maser* foi demonstrado começou imediatamente a busca por um *maser* ótico, isto é, um dispositivo que emitisse um feixe coerente com frequência na região da luz visível. Townes e Arthur Schawlow propuseram um arranjo com uma cavidade contendo o meio ativo e dois espelhos. Finalmente em 1960, Theodore Maiman anunciou o funcionamento do primeiro *maser* ótico [4], ou laser cujo o meio ativo era um cristal de rubi.

O *laser* é considerado uma das maiores invenções do século 20 sendo sinônimo de alta tecnologia. A tecnologia laser é uma ferramenta muito importante em diversas áreas, como por exemplo, na medicina onde é utilizado em cirurgias e em telecomunicação servindo de fonte nas transmissões de sinais ópticos. Até pouco tempo atrás, os *lasers* eram considerados objetos exóticos, usados apenas em laboratórios de pesquisa, projetos militares, grandes indústrias e filmes tipo Guerra nas Estrelas. Hoje, a grande maioria da população possui pelo menos um *laser* em casa: o que está no aparelho de tocar CDs (*compact disk*). Além disso, é possível encontrá-los na vida cotidiana, como por exemplo, em supermercados nos leitores ópticos de código de barras e em impressoras.

3.2 Princípio Básico de Funcionamento

Os lasers são dispositivos que geram ou amplificam radiação coerente da luz, nas regiões do visível, infravermelha (IR) e ultravioleta (UV) do espectro óptico. O campo de lasers é em geral tratado pela eletrônica quântica. Na verdade, assim como em geral se trata de transistores e válvulas como dispositivos eletrônicos clássicos que geram e amplificam sinais elétricos de baixa frequência, pode-se em geral tratar de lasers de uma maneira clássica e não-quântica.

Basicamente os lasers contêm um meio de ganho (amplificador), um mecanismo de bombeio, e um sistema de realimentação [30]. O tamanho da cavidade laser é definida pelos espelhos de entrada e saída. Um esquema típico de um laser é mostrado na Fig. 3.1.

Os lasers se distinguem pelo tipo de meio que produz o ganho óptico, pela maneira de se dar energia ao sistema, isto é, pelo bombeio, e pela realimentação. A condição fundamental para o funcionamento é que o ganho seja maior que as perdas. A oscilação laser (lasers também são chamados de osciladores) só pode ocorrer quando há ganho suficiente. Esta condição depende do bombeio, da realimentação, e da eficiência do meio de ganho laser. A realimentação pode ser modificada usando espelhos mais ou menos refletivos, e o ganho, bombeando o meio de ganho mais ou menos intensamente, aumentando a concentração de átomos ativos.

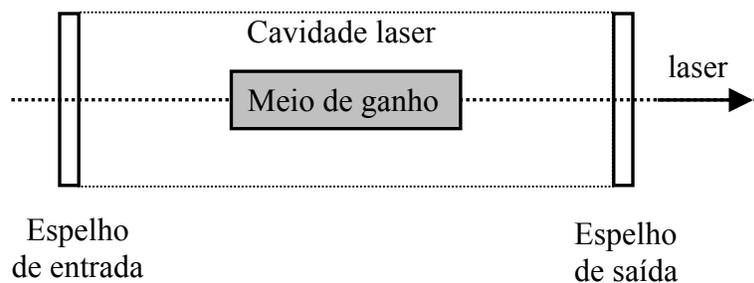


Fig. 3.1. Cavidade típica de um laser.

3.3 Emissão e Absorção

Para descrever os fenômenos de emissão espontânea, emissão estimulada e absorção, vamos considerar dois níveis de energia, E_1 e E_2 , de algum átomo ou molécula, como observado na Fig. 3.2. Os níveis E_1 e E_2 correspondem aos níveis fundamental e excitado, respectivamente, além disso, $E_2 > E_1$.

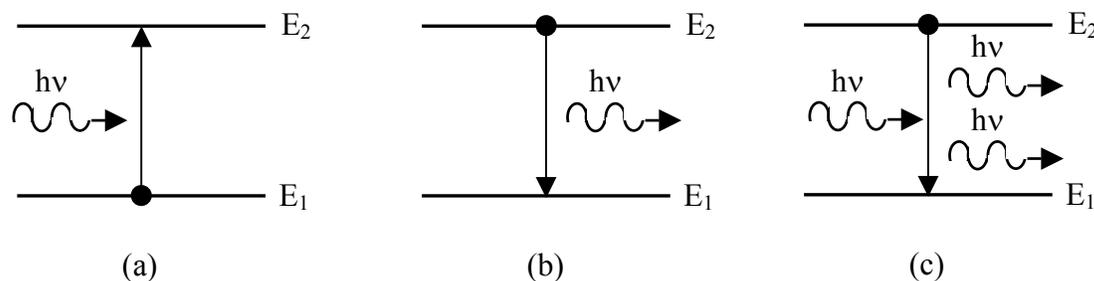


Fig. 3.2. Ilustração esquemática dos três processos: (a) absorção, (b) emissão espontânea e (c) emissão estimulada.

Considerando inicialmente que o átomo esteja no estado fundamental, o átomo irá permanecer neste nível a menos que um estímulo externo seja aplicado. Se uma onda de frequência $\nu = \nu_0$ incide no material, existirá uma probabilidade finita do átomo mudar para o nível excitado E_2 . A energia necessária para que essa transição ocorra é dada pela diferença de energia $E_2 - E_1$. Este processo é chamado de *absorção*, Fig. 3.2a.

Os átomos excitados, isto é, inicialmente no nível E_2 , eventualmente decaem para o estado fundamental e emitem radiação durante este processo. A emissão de luz pode ser de duas formas: espontânea ou estimulada. No caso da emissão espontânea, fótons são emitidos em todas as direções e sem relação de fase entre si. A emissão estimulada só é inicializada na presença de um outro fóton. Os fótons emitidos durante este processo possuem a mesma energia (ou frequência), polarização e direção de propagação da radiação estimulante. A luz emitida por um laser é coerente devido ao fato dos fótons emitidos estarem todos em fase e possuírem a mesma direção. A frequência ν_0 da radiação emitida é definida por [30]:

$$\nu_0 = \frac{E_2 - E_1}{h} \quad (3.1)$$

onde h é a constante de Planck ($h = 6.63 \times 10^{-34}$ J.s).

Se N_1 e N_2 são as densidades no estado fundamental e excitado respectivamente e ρ_f é a densidade espectral da radiação, as taxas de emissão espontânea, emissão estimulada e absorção podem ser escritas como:

$$R_{esp} = AN_2 \quad (3.2)$$

$$R_{est} = BN_2\rho_f \quad (3.3)$$

$$R_{abs} = B'N_1\rho_f \quad (3.4)$$

onde A , B e B' são constantes. No equilíbrio térmico, a densidade atômica é distribuída de acordo com a estatística de Boltzmann, que é dada pela equação:

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right) = \exp\left(-\frac{h\nu_0}{k_B T}\right) \quad (3.5)$$

onde k_B é a constante de Boltzmann ($k_B = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K) e T a temperatura absoluta. No equilíbrio térmico, N_1 e N_2 não variam no tempo, e a taxa de transição entre o decaimento e a excitação é igual a:

$$AN_2 + BN_2\rho_f = B'N_1\rho_f \quad (3.6)$$

Utilizando as equações 3.5 e 3.6, a densidade espectral da radiação ρ_f é determinada através da relação:

$$\rho_f = \frac{A/B}{(B/B') \exp(h\nu/k_B T) - 1} \quad (3.7)$$

No equilíbrio térmico, ρ_f deve ser igual a densidade espectral do corpo negro dada pela relação de Planck:

$$\rho_f = \frac{8\pi h \nu^3 / c^3}{\exp(h\nu/k_B T) - 1} \quad (3.8)$$

Comparando as duas equações de ρ_f obtém-se que:

$$A = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} B \quad (3.9)$$

$$B' = B \quad (3.10)$$

Essas relações foram obtidas primeiramente por Einstein, por esta razão A e B são chamadas de coeficientes A e B de Einstein, sendo A o coeficiente de emissão espontânea e B o coeficiente de emissão estimulada.

Duas importantes conclusões podem ser tiradas das equações 3.2 – 3.10. Primeiro, R_{esp} pode exceder R_{est} e R_{abs} se $k_B T \sim h\nu$. Segundo, para radiação no visível ou na região perto do infravermelho ($h\nu \sim 1\text{eV}$), emissão espontânea é sempre

dominante se comparada com a emissão estimulada no equilíbrio térmico a temperatura ambiente ($k_B T \approx 25 \text{meV}$) desde que:

$$\frac{R_{est}}{R_{esp\ f}} = \frac{1}{\exp(h\nu/k_B T) - 1} \ll 1 \quad (3.11)$$

então fontes térmicas nunca podem emitir luz coerente, em outras palavras, lasers devem necessariamente operar fora do equilíbrio térmico. Entretanto, para um sistema bombeado externamente, emissão estimulada pode não ser um processo dominante. R_{est} excede R_{abs} apenas quando $N_2 > N_1$. Essa condição é chamada de inversão de população e nunca pode ocorrer no equilíbrio térmico.

Quando existe uma inversão de população, emissão estimulada pode produzir uma cascata de luz. O primeiro fóton emitido espontaneamente pode estimular a emissão de mais fótons. Quanto maior a população no nível superior, a emissão estimulada será maior que a absorção. Esta inversão é um pré-requisito para a operação do laser.

Em sistemas atômicos, a inversão é obtida por sistemas de três e quatro níveis de energia. Em sistemas de três níveis de energia ($E_1 < E_2 < E_3$), os átomos são transferidos do estado fundamental para o nível de maior energia (E_3). Estes decaem rapidamente de forma não-radioativa para o nível E_2 , então a inversão de população pode ser obtida entre os níveis E_1 e E_2 .

Nesta tese, o elemento sensor a ser testado nas experiências é um laser de cristal líquido cuja a cavidade laser não possui espelhos. Isso é possível devido à propriedade de reflexão seletiva da banda de reflexão do cristal líquido colestérico. Uma descrição do princípio de funcionamento do laser sem espelhos de cristal líquido será apresentada na capítulo 5.

Neste capítulo foi feita uma revisão do princípio básico de um laser e os processos envolvidos numa emissão laser.