

第二章 介质中的光增益

§ 2-1 粒子数的反转分布

一、激发态能级寿命

自发辐射过程中 E_m 能级上的粒子数 N_m 变化为:

$$dN_m = -A_{mn} N_m dt \quad (2.1)$$

由上式可得激发态的粒子数:

$$N_m(t) = N_m \exp(-A_{mn}t) = N_m \exp(-\frac{t}{\tau_{mn}}) \quad (2.2)$$

τ_{mn} : 经过 $t = \tau_{mn}$ 时间后, 停留在激发能级上的粒子数由于自发跃迁已减少到 $t = 0$ 时刻该能级粒子数的 $1/e$ (约 36%)。反映了粒子在该能级上的平均寿命。考虑多个下能级和无辐射跃迁过程, 粒子在激发态能级的实际寿命为:

$$\tau'_m = \frac{1}{D + \sum_{j=1}^{m-1} A_m j}。$$

二、粒子数密度的差值

热平衡状态下处于两能级 E_1 和 E_2 的粒子数服从玻耳兹曼分布:

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp(-\frac{E_2 - E_1}{kT}) \quad (2.3)$$

例: 室温下的氢原子 $\frac{N_2(\text{第一激发态})}{N_1(\text{基态})} \approx 10^{-180}$ 。

三能级系统受非外来光的外界作用时, 在平衡状态下第二激发态和第一激发态两能级粒子数密度差为:

$$\Delta n^0 = n_2^0 - n_1^0 = R_2 \tau_2 - (R_1 + R_2) \tau_1 \quad (2.4)$$

粒子数反转: $\Delta n^0 > 0$ 。

实现粒子数反转的方式: 激励、抽运或泵浦。完成该任务的器件称为泵浦源。

从能量转换效率考虑, 固体物质: 光泵浦; 气体物质: 电泵浦。

激活物质: 处于粒子数反转分布的物质。

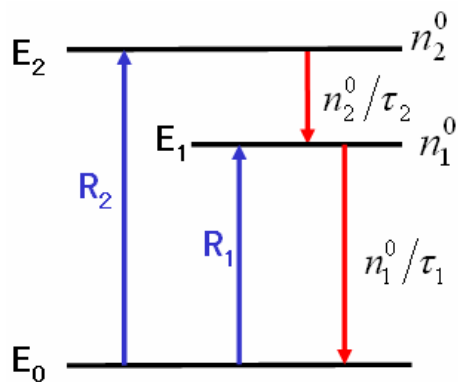


图 2.1 三能级系统受非外来光的外界作用时的情况

三、三能级系统与四能级系统

1. 三能级系统

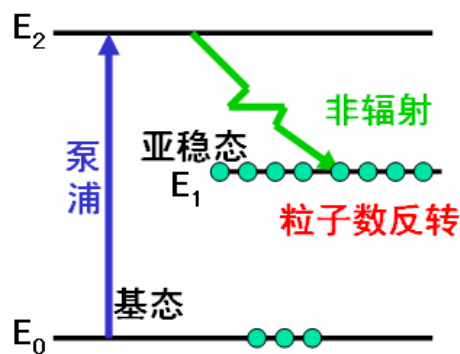


图 2.2 三能级系统产生粒子数反转情况

注：因基态粒子数量较多，需激励能量足够强、抽运速度足够快才能实现粒子数反转分布。将基态作为粒子数反转下能级的介质不是实现粒子数反转分布的理想材料。

2. 四能级系统

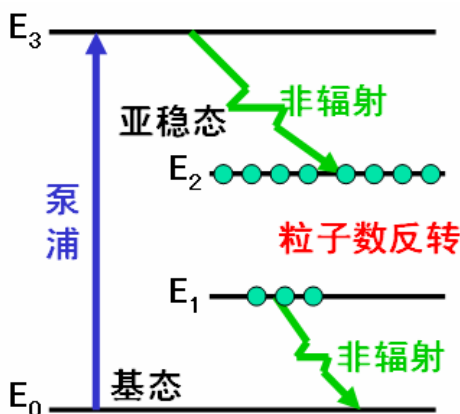


图 2.3 四能级系统产生粒子数反转情况

§ 2-2 光在介质中的小信号增益

一、光的吸收与放大

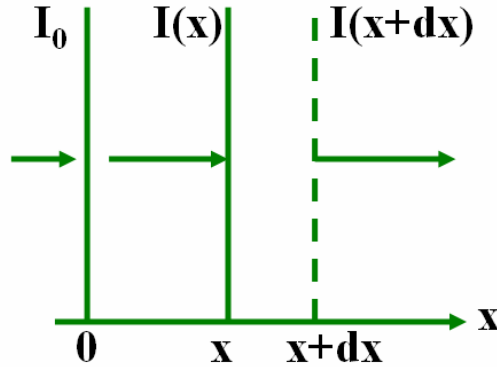


图 2.4 光在介质中传播时光强变化示意图

$$\text{吸收系数 } \alpha(x) = -\frac{dI(x)}{dx} \frac{1}{I(x)} \quad (2.5)$$

$$\text{增益系数: } G(x) = \frac{dI(x)}{dx} \frac{1}{I(x)} = \frac{1}{x} \ln \frac{I(x)}{I_0} \quad (2.6)$$

G : 表示通过单位长度激活物质后光强增长的百分数。

1. 热平衡状态下, 高能级粒子数恒小于低能级粒子数, 当频率为 $\nu = (E_2 - E_1)/h$ 的光通过物质时, 只能吸收光子。
2. 在粒子数处于反转分布的非平衡状态下, 在物质的受激辐射过程中可实现光放大。一段激活物质就是一个光放大器。

二、小信号增益

若 $(n_2 - n_1)$ 不随 x 变化, 则增益系数为一常数 G^0 , 由式 (2.6) 可得

$$I(x) = I_0 \exp(G^0 x) \quad (2.7)$$

此时对应的是线性增益或小信号增益情况。

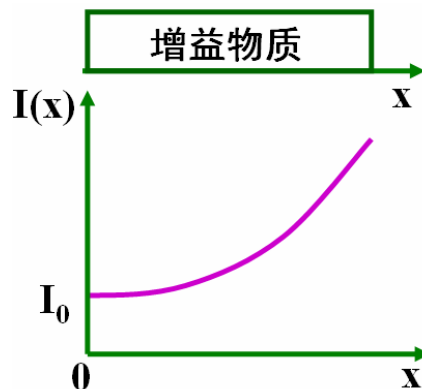


图 2.5 小信号增益示意图

影响增益系数的因素:

1. 若其它条件不变, 则粒子数密度反转差值越大, 增益也越大。当 I 很小时,

$\Delta n \approx \Delta n^0$ ，增益系数与光强的变化无关，此时增益未达到饱和状态，为小信号增益。

2. G^0 通过 $g(\nu)$ 而随 ν 变化，即不同频率的光在介质中传播时增益系数不同。 G^0 随 ν 的变化规律为上能级与下能级跃迁辐射谱线的线型函数规律。

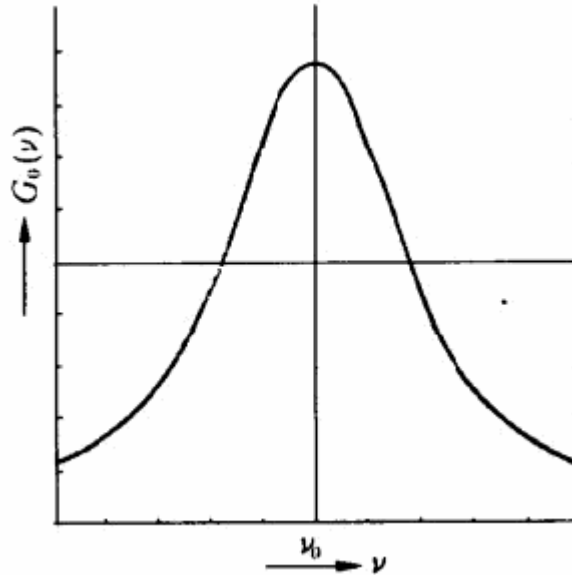


图 2.6 均匀加宽谱线的小信号增益曲线

3. 频率为两能级间跃迁辐射谱线中心频率的外来光的增益系数大小与此谱线频率宽度成反比。

§ 2-3 介质中的增益饱和与烧孔效应

光强的增加是由于高能级粒子向低能级受激跃迁的结果，光放大是以单位体积内粒子反转数差值 $n_2(x) - n_1(x)$ 的减小为代价的。光强越大， $n_2(x) - n_1(x)$ 减少越多， $n_2(x) - n_1(x)$ 随 I 的增加而减少， G 也随 I 的增加而减少，该现象称为**增益饱和**。

一、反转粒子数的饱和

1. 均匀加宽

$$\Delta n = \frac{(\nu - \nu_0)^2 + \left(\frac{\Delta\nu_H}{2}\right)^2}{(\nu - \nu_0)^2 + \left(\frac{\Delta\nu_H}{2}\right)^2 \left(1 + \frac{I}{I_s}\right)} \Delta n^0 \quad (2.8)$$

外来频率 ν = 谱线中心频率 ν_0 时， Δn 值最小，饱和效应最强，有

$$\Delta n = \frac{\Delta n^0}{1 + \frac{I}{I_s}} \quad (2.9)$$

2. 非均匀加宽

特点：谱线中的每一个频率都可以辐射一条均匀加宽谱线，二能级粒子数密度差值中的 $\Delta n g(\nu) d\nu$ 部分所引起的辐射频率 ν 至 $\nu + d\nu$ 的光是一条频率宽度为 $\Delta \nu_H$ 的均匀加宽谱线。

烧孔效应：当外来光的频率为 ν_A 时，对光频率为 ν_A 的粒子引起最强的饱和效应，使其 $\Delta n(\nu)$ 由原来的 Δn^0 下降到 $\Delta n^0 / (1 + I/I_s)$ ，如下图。图中 $\Delta n(\nu)$ 值从A点下降到A₁点，而这个外来光对 ν_B 粒子引起的效应较弱，即B点下降到B₁点。对于频率为 ν_C 的粒子，可认为没有发生饱和效应。下图中曲线形成一个以 ν_A 为中心的洞，称为烧孔效应。

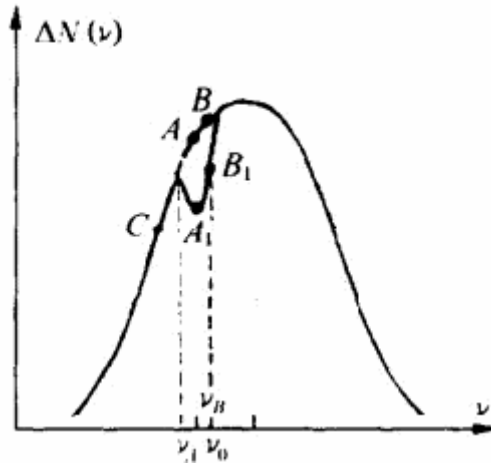


图 2.7 非均匀加宽工作物质中反转粒子数与频率的关系

二、饱和增益

1. 均匀加宽

$$G(\nu) = G_0(\nu_0) \frac{\left(\frac{\Delta \nu_H}{2}\right)^2}{(\nu - \nu_0)^2 + \left(\frac{\Delta \nu_H}{2}\right)^2 \left(1 + \frac{I}{I_s}\right)} \quad (2.10)$$

外来频率 ν = 谱线中心频率 ν_0 时，

$$G(\nu_0) = \frac{G_0(\nu_0)}{1 + \frac{I}{I_s}} \quad (2.11)$$

(1) $I \ll I_s$ ：增益为常数，对应小信号增益。

(2) $I \ll I_s$ 不满足时：对应大信号（饱和）增益。

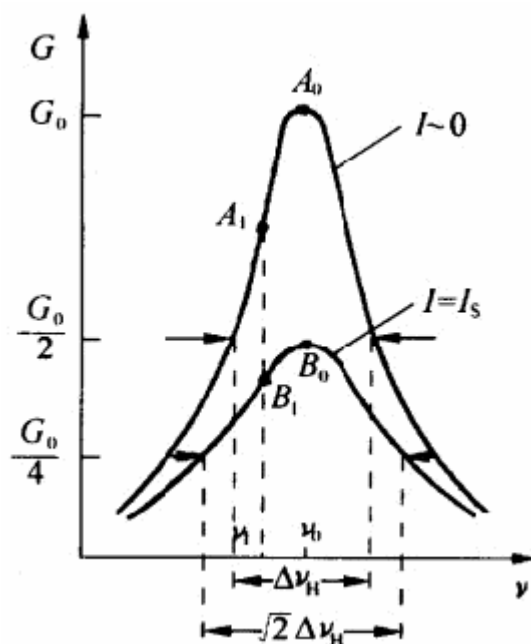


图 2.8 均匀加宽谱线的增益饱和效应

2. 非均匀加宽

$$G(\nu) = \frac{G_{j0} g_j(\nu)}{\sqrt{1 + \frac{I}{I_s}}} \quad (2.12)$$

在增益曲线上同样会出现烧孔效应。

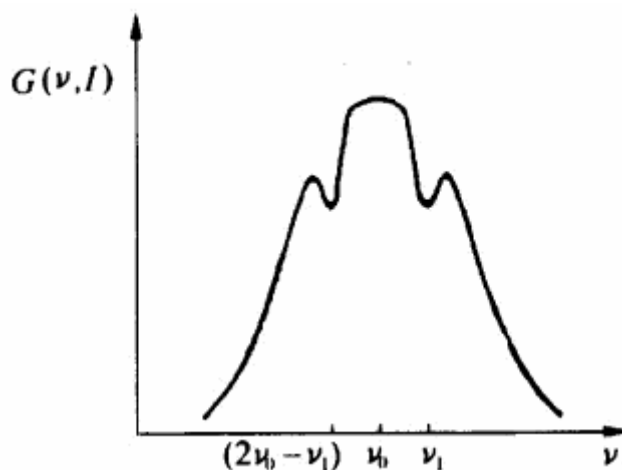


图 2.9 非均匀加宽气体激光器的增益曲线

出现两个烧孔的原因：气体中由于同一频率具有两个传播方向，又存在速度大小相等、方向相反的粒子，从而使得有一定数量关系的两个振荡模的频率（ $\nu_1 - \nu_0 = \nu_0 - \nu_2$ ）之间会有较强的相互作用。