

量子力学应用 (3) 激光原理

- 激光原理
- 激光器工作原理
- 激光器应用

► 激光原理

激光是20世纪以来人类的又一重大发明，1960年世界上第一台激光器红宝石激光器诞生。

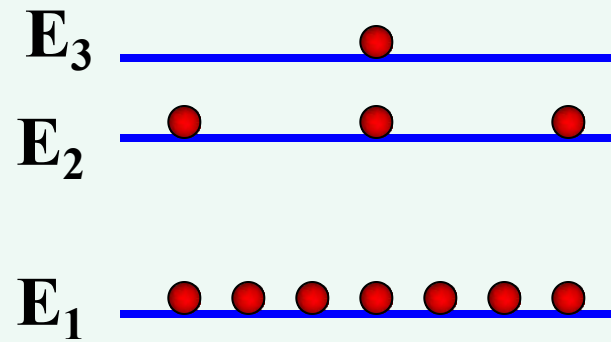
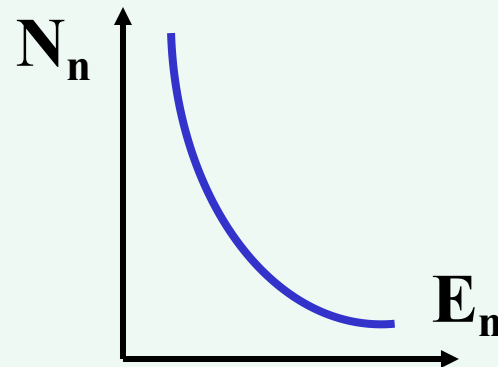
一、原子在能级上的统计分布

由大量原子组成的系统，在温度不太低的平衡态，原子数目按能级的分布服从玻耳兹曼统计分布：

$$N_n \propto e^{-\frac{E_n}{k_B T}}$$

若 $E_2 > E_1$ ，则两能级上的原子数目之比

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{E_2 - E_1}{k_B T}} < 1$$



[例] 对于氢原子, $E_n = -E_1/n^2$, 求在常温下($T = 300\text{K}$), 处在第一激发态的氢原子数与处在基态的原子数比

解:
$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{E_2 - E_1}{k_B T}}$$

$$E_1 = -13.6\text{eV} \quad E_2 = -\frac{13.6}{4} = -3.4\text{eV} \quad k_B T = 0.025\text{eV}$$

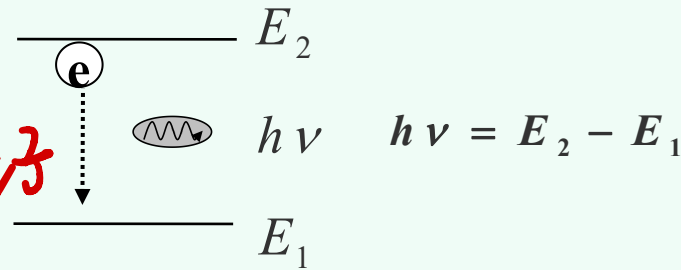
$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-408} \ll 1$$

几乎所有电子都处于基态上

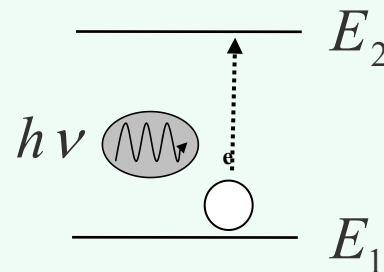
二、自发辐射、受激辐射和受激吸收

按照原子的量子理论，光和原子相互作用可能产生下列三种跃迁过程

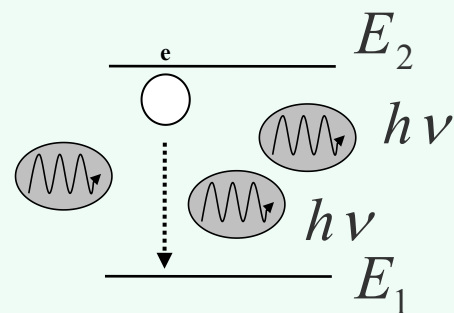
处于激发态的原子可自发从高能态跃迁到低能态而发光，称为**自发辐射** \rightarrow 释放频率为 ν 的光子



受到频率为 ν 的光照下原子吸收光子后可从低能态跃迁到高能态（**受激吸收**）



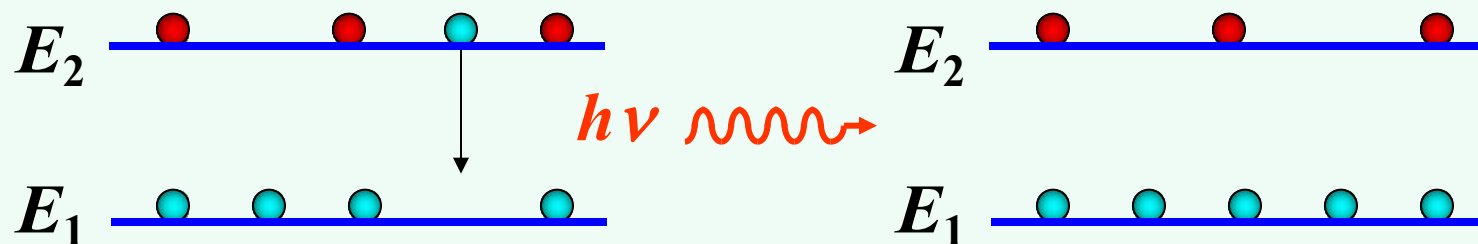
处于激发态的原子在外来光(ν)的诱发作用下也可从高能态跃迁到低能态（**受激辐射**）



光与原子作用上述三种过程同时发生。

爱因斯坦辐射理论

1. 自发辐射(spontaneous radiation)



设 N_1 、 N_2 为处于 E_1 、 E_2 能级的原子数，单位时间内从 $E_2 \rightarrow E_1$ 自发辐射的原子数应与初始原子数成正比：

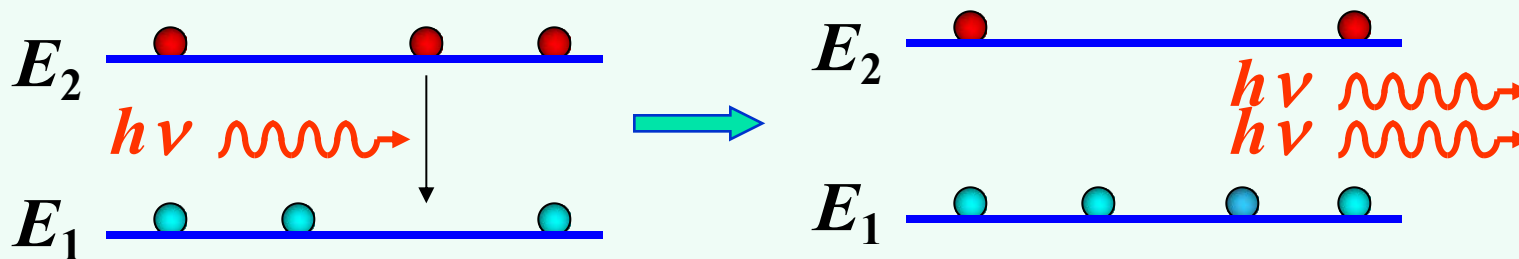
$$-\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{\text{自发}} = A_{21} N_2$$

A_{21} 称为爱因斯坦自发发射系数，为单个原子在单位时间内发生自发辐射概率。

各原子自发辐射的光是独立的、无关的非相干光。

2. 受激辐射 (stimulated radiation)

当频率为 $\nu = (E_2 - E_1)/h$ 的外来光入射时，会引起高能态的原子跃迁到低能态



单位时间内，从 $E_2 \rightarrow E_1$ 受激辐射的原子数：

$$\left(\frac{dN_{21}}{dt} \right)_{\text{受激辐射}} = B_{21} u(\nu) N_2$$

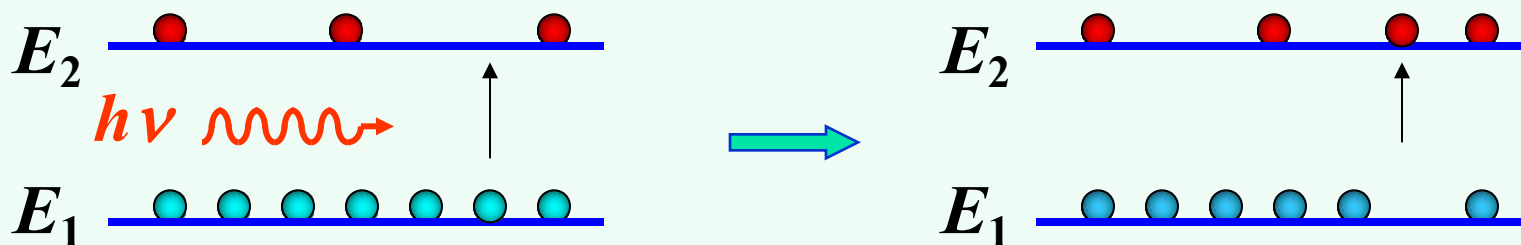
$u(\nu)$ 辐射场的能谱密度 $\text{J/m}^3\text{Hz}$

$B_{21}u(\nu)$ 为单个原子在单位时间内发生受激辐射过程的概率。

受激辐射光与外来光的频率、偏振方向、相位及传播方向均相同(全同光子)的相干光，有光放大作用。

3. 受激吸收(stimulated absorption)

当频率为 $\nu = (E_2 - E_1) / h$ 的外来光入射时，也会引起低能态的原子跃迁到高能态。



单位时间内因吸收外来光而从 $E_1 \rightarrow E_2$ 的原子数：

$$\left(\frac{dN_{12}}{dt} \right)_{\text{受激吸收}} = B_{12} u(\nu) N_1 \quad u(\nu) \quad \text{辐射场的能谱密度 } \text{J/m}^3\text{Hz}$$

$B_{12}u(\nu)$ 为单个原子在单位时间内发生吸收过程的概率。

A_{21}, B_{21}, B_{12} 是原子能级的特征量，不同原子或不同能级爱因斯坦系数不同。

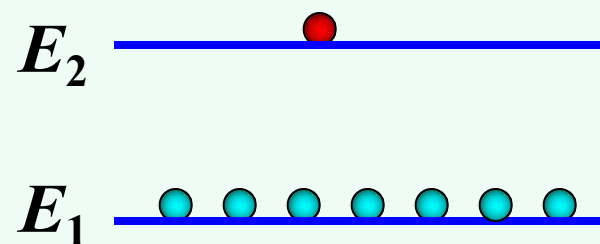
A_{12} 、 B_{21} 和 B_{12} 并不独立

爱因斯坦给出了 $B_{21} = B_{12}$ $A_{21} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} B_{21}$

为激光的发明（受激辐射的光放大）奠定了理论基础。

三、粒子数反转和光放大

实际的发光媒质由大量原子构成，在热平衡时遵从玻耳兹曼分布，大部分原子处在基态上。



少数原子处在激发态上，当一束光射入媒质后，可同时引起受激吸收和受激辐射。因为 $N_1 > N_2$ ，所以

$$\left(\frac{dN_{12}}{dt} \right)_{\text{受激吸收}} > \left(\frac{dN_{21}}{dt} \right)_{\text{受激辐射}}$$



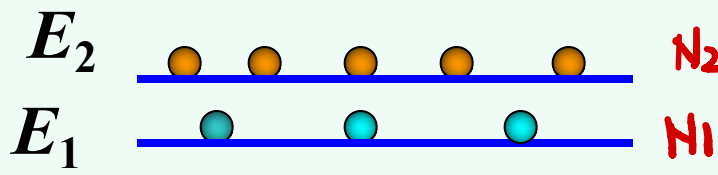
宏观上表现为对光的吸收，达不到对光的放大目的

三、粒子数反转和光放大

如果原子的分布是 $N_2 > N_1$ ，称为粒子数分布反转，则

$$\left(\frac{dN_{12}}{dt} \right)_{\text{受激吸收}} < \left(\frac{dN_{21}}{dt} \right)_{\text{受激辐射}}$$

更多的粒子从 $E_2 \rightarrow E_1$



E_2 N_2
 E_1 N_1

受激辐射占主导地位，宏观上表现为辐射，可实现光的放大



处于粒子数反转分布的介质称为激活介质，它正是激光器的工作物质。

产生激光的前提条件

➤ 激光器工作原理

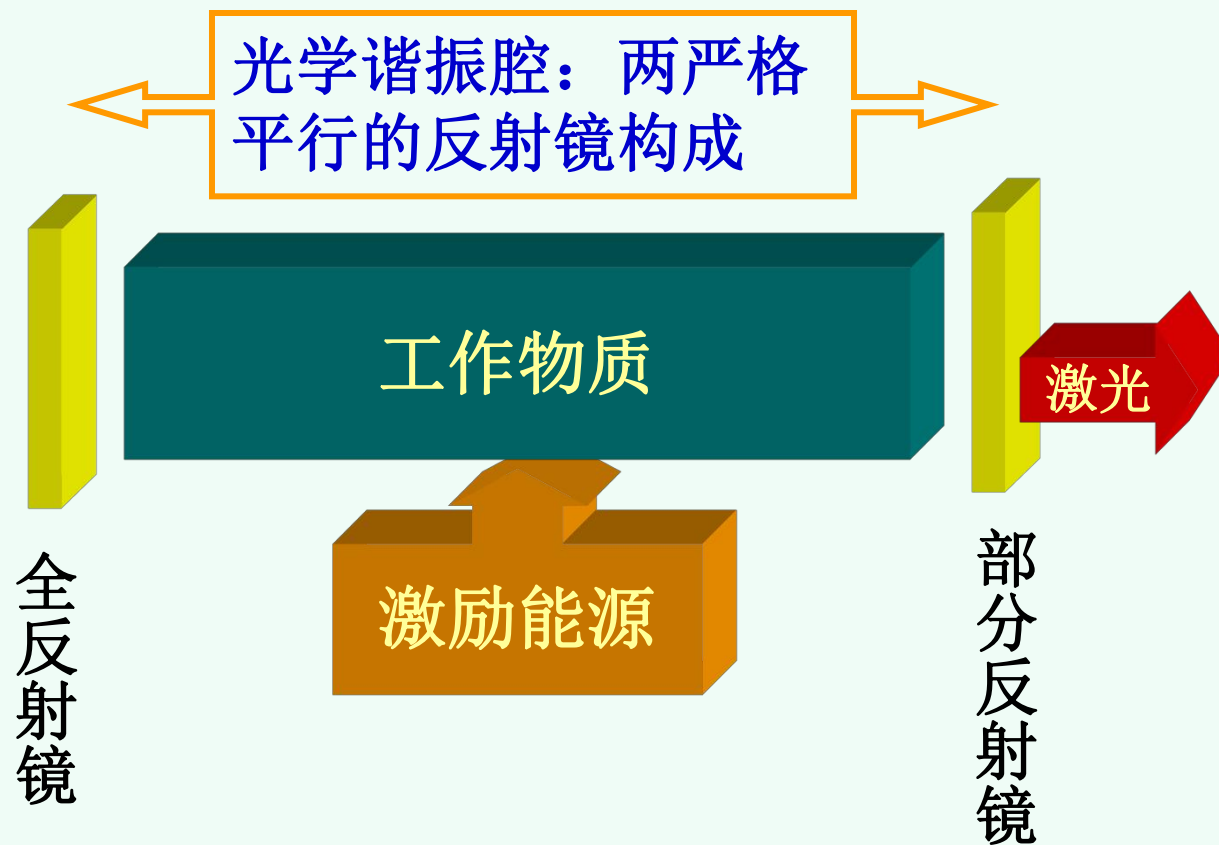
- 普通光源：蜡烛、太阳、白炽灯等，光是自发辐射的。
- 激光光源：如红宝石激光器，光是受激发而辐射的。

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (Laser)

- 激光的特点：方向性好（发散角 $\sim 10^{-4}$ rad）；单色性好（ $\Delta\lambda \sim 10^{-8}$ Å）；强度大（脉冲瞬时功率可达 $\sim 10^{14}$ W）
- 激光器的种类(工作物质)
 - 固体（如红宝石 Al_2O_3 ）激光器
 - 气体（如He-Ne, CO_2 ）激光器
 - 半导体激光器（激光二极管）
 - 液体（如某些染料.....）
 - 自由电子激光器

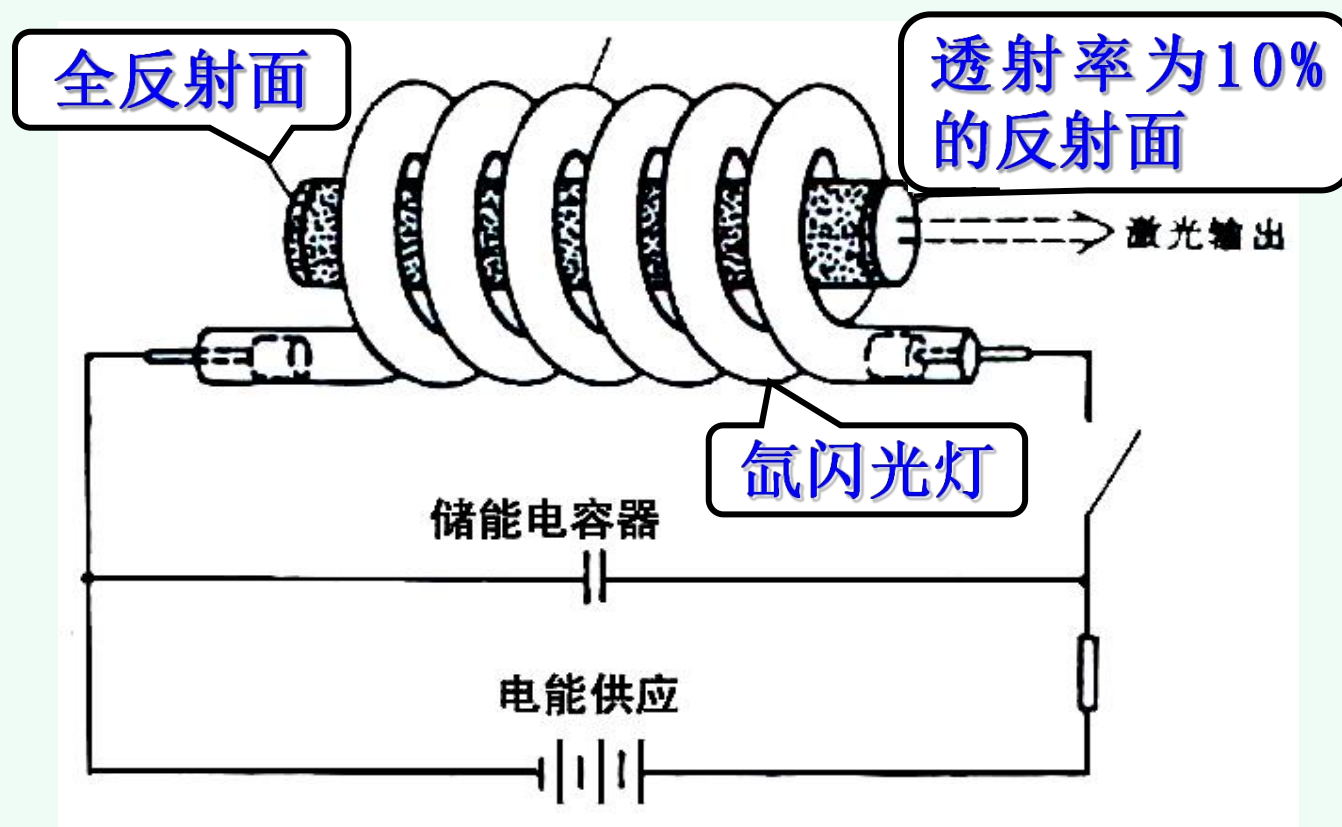
1. 激光器的结构

一台激光器主要由三部分组成：工作物质、光学谐振腔和激励能源



1. 激光器的结构

以红宝石激光器为例



2. 工作物质粒子数反转的实现

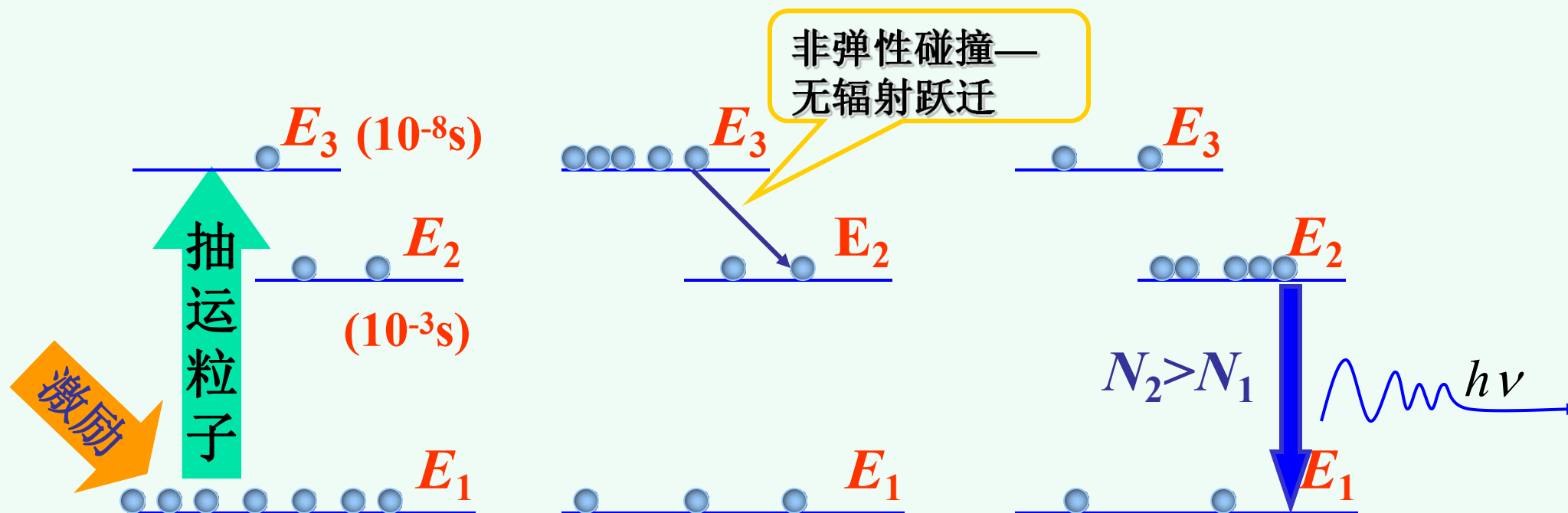
不同种类的激光器实现激活介质粒子数反转分布方式不同。

对于He-Ne气体激光器主要是利用Ne原子的亚稳态实现的
(一般原子激发态的寿命为 10^{-8} s, 但也有些激发态的寿命长达 10^{-3} s甚至长达1s, 称这种长寿命的激发态为亚稳态)

为简单, 假设原子只有三个能级 E_1 、 E_2 和 E_3 , E_2 为亚稳态

三能级模式

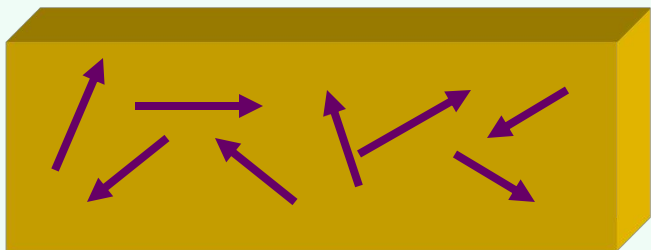
非弹性碰撞： 激发态原子和其它原子或器壁碰撞而将自己的内能变为其它原子的动能或给予器壁，而自己回到下一个能级，称作无辐射跃迁



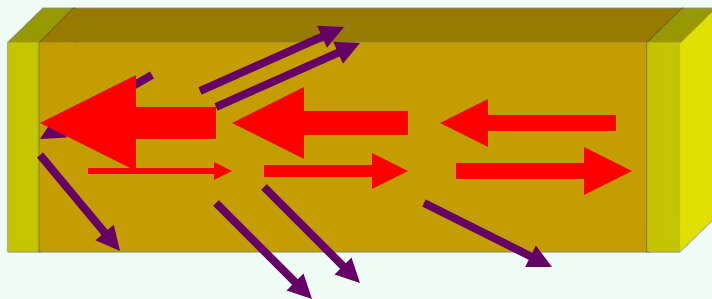
实际工作物质原子能级结构要复杂的多，可能存在几对能级之间的粒子数分布反转，相应地有发射几种波长的激光。例如，氦氖激光器可以发射 $0.6328\mu\text{m}$, $1.15\mu\text{m}$, $3.39\mu\text{m}$ 等波长的激光。

3. 光学谐振腔(optical harmonic oscillator)的作用

(1) 谐振腔的定向作用



若无谐振腔，激活介质初始自发辐射的光是传播方向各向同性的非相干光

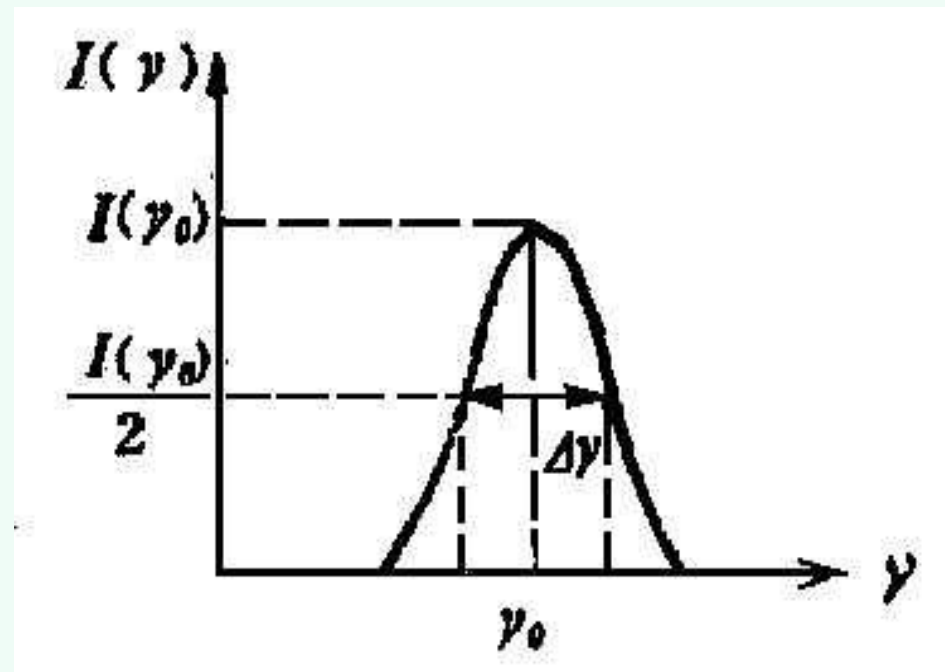


抑制了传播方向与轴线不平行的光，放大了沿轴线方向传播的光。

(2) 谐振腔的选频作用

图示为氦氖激光器 Ne 原子的
 $0.6328\ \mu\text{m}$ 受激辐射光的谱线自然
展宽示意图，自然宽度高达

$$\Delta\nu \approx 1.3 \times 10^9\ \text{Hz}$$



通过调节谐振腔的作用还可对沿轴向传播的光进一步选频，只让某几种满足共振条件的单色光得到放大，共振条件就是如下驻波条件：

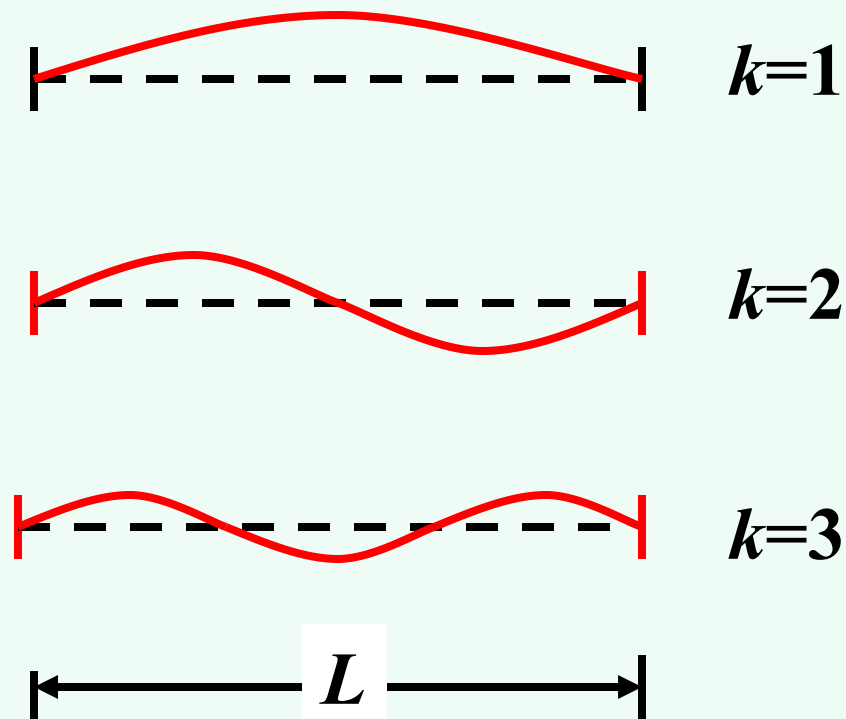
(2) 谐振腔的选频作用

驻波条件 $nL = k \frac{\lambda_k}{2}$

($k=1、2、3、....$)

n —谐振腔内媒质的折射率，
 λ_k —真空中的波长

$$\lambda_k = \frac{2nL}{k}$$



因此，在光学谐振腔内只有某些确定波长的光才能形成稳定的驻波——波长与腔的纵向长度有关——这样的每一个振动模式称为一个“纵模”。

可以存在的纵模频率为

$$\nu_k = \frac{c}{\lambda_k} = k \frac{c}{2nL}$$

相邻两个纵模频率的间隔为

$$\Delta \nu_k = \frac{c}{2nL}$$

例在氦氖激光器 $0.6328\mu\text{m}$ $L=1\text{m}$ $n=1$

$$\Delta \nu_k = 1.5 \times 10^8 \text{ Hz}$$

例在氦氖激光器 $0.6328 \mu\text{m}$ 谱线宽度 $\Delta \nu = 1.3 \times 10^9 \text{ Hz}$ 内可以存在的纵模个数为

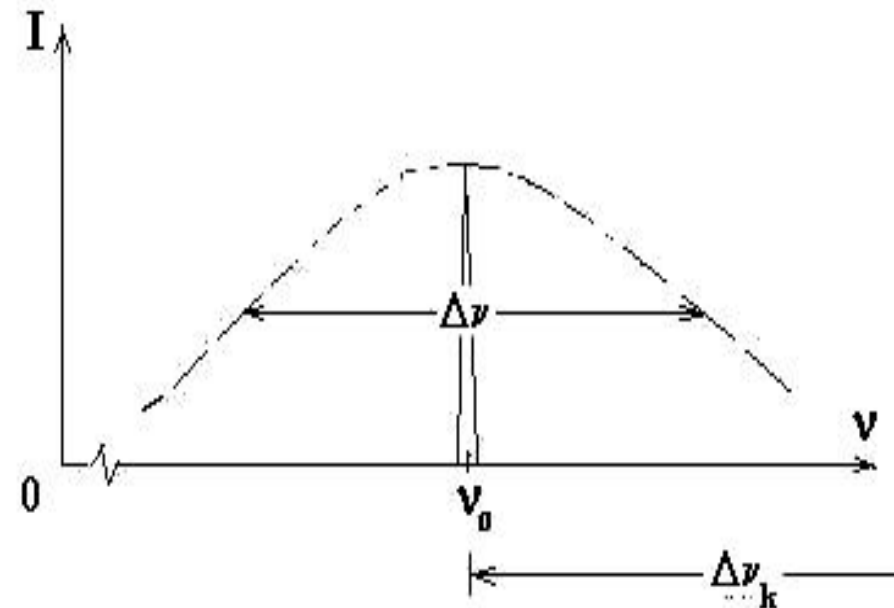
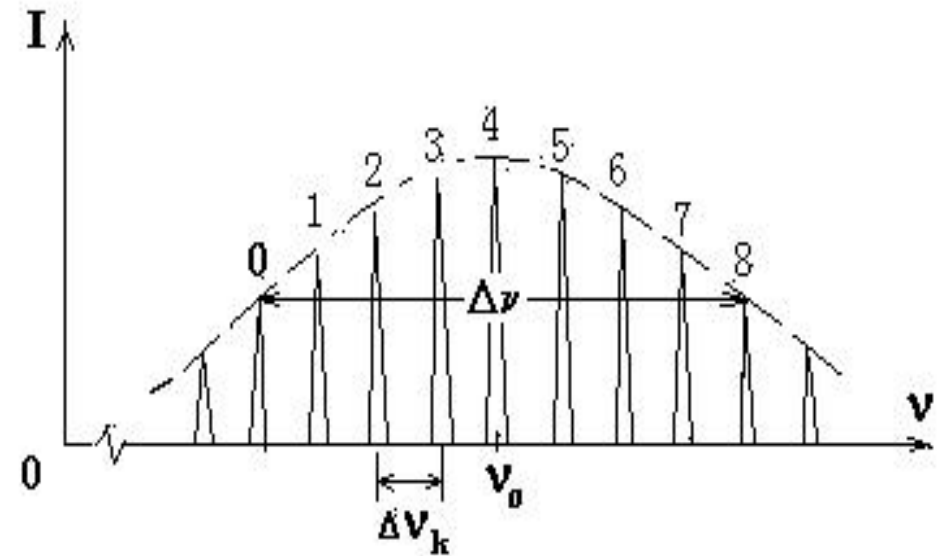
$$N = \frac{\Delta \nu}{\Delta \nu_k} = \frac{1.3 \times 10^9}{1.5 \times 10^8} \cong 8$$

利用加大纵模频率间隔 $\Delta\nu_k$ 的方法，可以使 $\Delta\nu$ 区间中只存在一个纵模频率。

比如缩短管长 $L \rightarrow L/10$, 则
 $\Delta\nu_k \rightarrow 10 \Delta\nu_k$

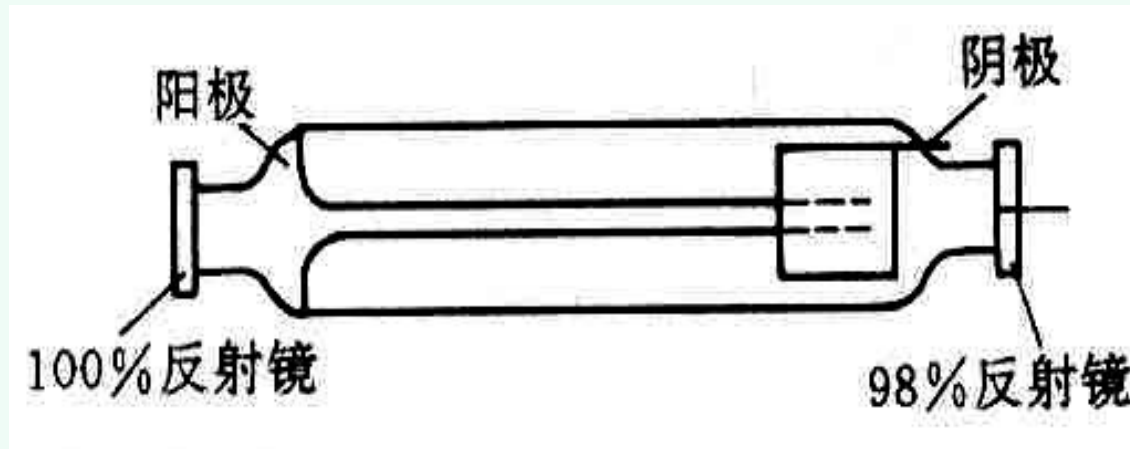
在 $\Delta\nu$ 区间中，只可能存在的纵模个数为 $N=1$ 。

最后使激光具有极好的单色性

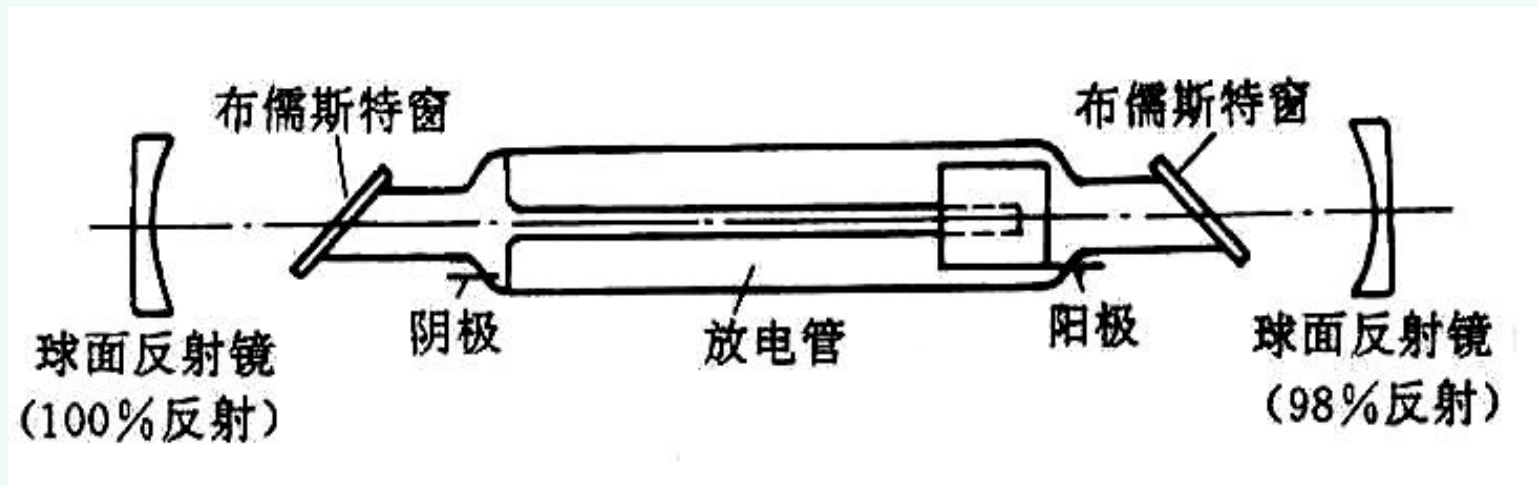


(3) 谐振腔内布儒斯特窗口的作用

在气体激光器中，由于谐振腔的结构不同可分为内腔式和外腔式激光器。



- 内腔式激光器两个端面上的反射镜是放电管的一部分。其结构简单，但由于谐振腔长度不可调节，产生激光的频率是固定的，而且是非偏振的。



- **外腔式**激光器的两个反射镜安放在放电管的外侧。其优点是谐振腔长度可调节。但因为增加了两个放电管的封口，会增加激光器的反射损耗。但若每个封口倾斜角正好等于布儒斯特角时，两个封口对于偏振方向平行于入射面的光是透明的，减少了反射损耗，这种偏振光可被放大而形成激光。

外腔式激光器产生的激光频率是可调的，而且是偏振的。

总之，光学谐振腔主要有如下三个作用

- (1) 使激光具有极好的方向性（沿轴线）；
- (2) 增强光放大作用（“延长”了工作物质）；
- (3) 使激光具有极好的单色性（选频）。

➤ 激光器应用

1. 激光的特性

- (1) 方向性好(发散角小)
- (2) 单色性好($\Delta\nu$ 小)
- (3) 高亮度
- (4) 相干性好 相干长度 $\frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}$

2. 应用

激光的应用主要是利用其如上特点，包括：测距、准直、定向；焊接、钻孔、切割；全息存储...

2018年美国物理学家阿什金（Arthur Ashkin）获得诺贝尔物理学奖，表彰他所发明的**光镊技术**，并将此技术应用于生物体系。另一半被法国籍科学家莫卢(G rard Mourou)和加拿大科学家斯特里克兰(Donna Strickland)所分享。他们提出的啁啾脉冲放大技术（Chirped Pulse Amplification，简称**CPA**）是产生超强超短脉冲激光的独创性方法。

光镊

光镊是以激光的力学效应为基础的一种物理工具，是利用**强会聚**的光场与**微粒**相互作用时形成的光学势阱来**俘获**、**操纵**粒子的。

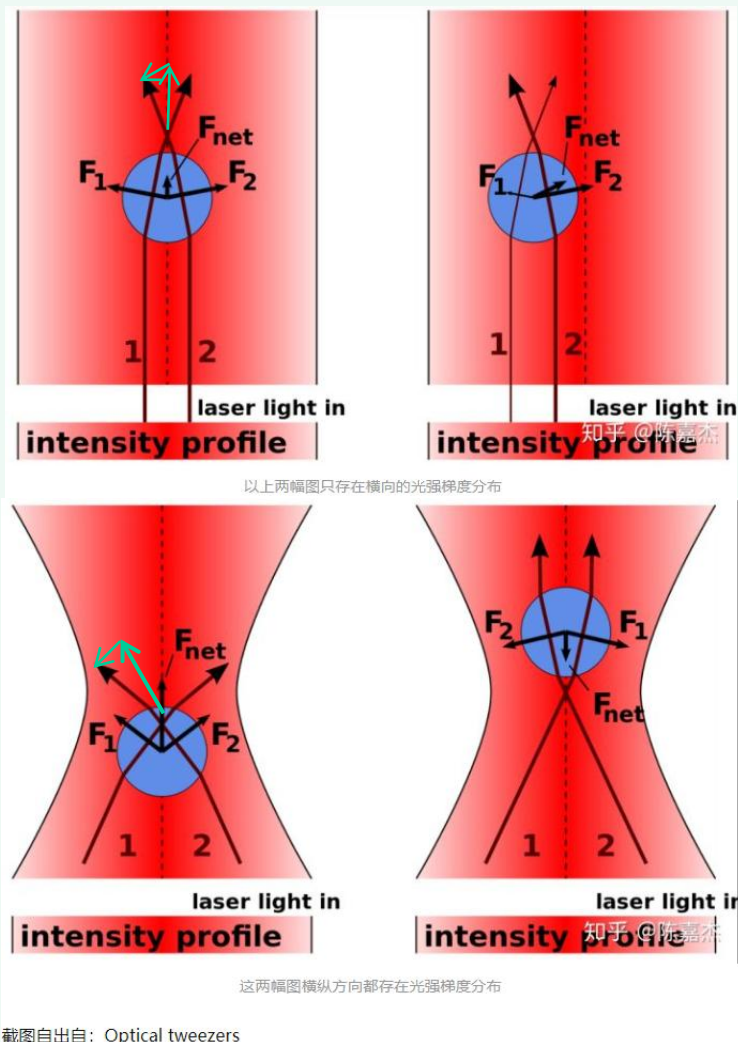
光子与物质作用就有能量、动量的传递

当光照射到透明介质小球 ($n > 1$)，在几何光学近似下 ($\lambda \ll d$)

由于光的折射，在不均匀光场下，小球受到沿着光场强度增长方向的**梯度力**，被约束在光强最强处。

考虑到小球对光的反射、散射、吸收等，小球还会受到沿光的对称轴方向的力，使小球逃逸势阱——**散射力**。

当梯度力大于散射力，小球就会被捕获在光强最强的地方。



光镊

光镊捕获微粒子的条件

- 光束的强聚焦
- 微粒相对折射率大于1
- 微粒透光性好

光镊操纵具有精确控制、非接触、无损伤的特点被广泛应用于物理、生物医学领域，并取得很大成果。

➤ 激光原理

20-3

-5

➤ 激光器工作原理

➤ 激光器应用