

§ 4 激光

激光又名镭射 (**Laser**), 它的全名是“辐射的受激发射光放大”。

(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

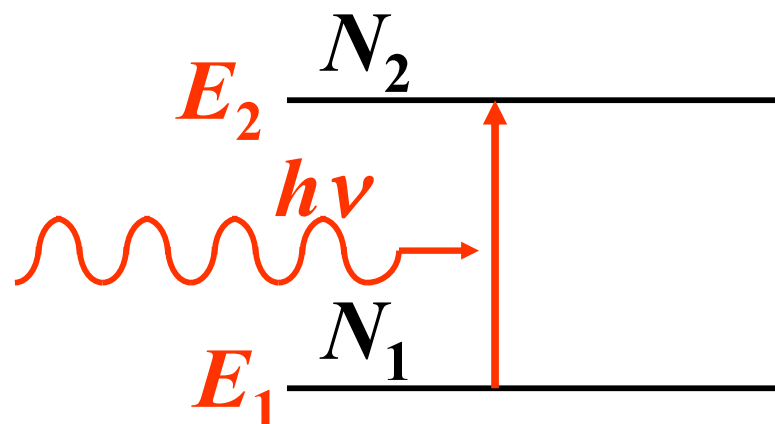
1960年问世, 不但引起技术层面的变革, 还为物理学和其它学科的发展提供了新的手段。

一、光和原子的相互作用

光和原子的相互作用过程主要有光的吸收、自发辐射和受激辐射三种。

1.光的吸收（受激吸收）

设 N_1 、 N_2 — 单位体积中处于 E_1 、 E_2 能级的原子数。



处于基态（或低能态） E_1 的原子，在吸收能量为 $h\nu$ 的一个光子后跃迁到高能态 E_2 ，这一过程叫做光的吸收。

单位体积中单位时间内，从 $E_1 \rightarrow E_2$ 跃迁的原子数：

$$\left(\frac{dN_{12}}{dt} \right)_{\text{吸收}} \propto \rho(\nu, T) N_1$$

写成等式 $\left(\frac{dN_{12}}{dt} \right)_{\text{吸收}} = B_{12} \rho(\nu, T) N_1$

B_{12} —吸收系数

这里 $\rho(\nu, T)$ 为照射光的能量密度

令 $W_{12} = B_{12} \rho(\nu, T)$

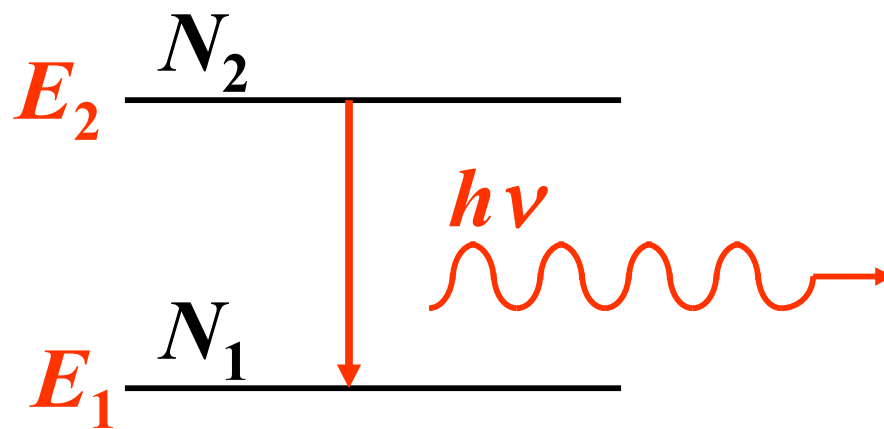
$$\left(\frac{dN_{12}}{dt} \right)_{\text{吸收}} = W_{12} N_1$$

W_{12} —单个原子在单位时间内发生吸收过程的概率。

2. 自发辐射

处于高能态 E_2 的原子，在没有任何外界作用的情况下，自发地向基态（或低能态） E_1 跃迁，同时辐射出能量为

$h\nu = E_2 - E_1$
的光子，这种光辐射称为自发辐射。



设 N_1 、 N_2 — 单位体积中处于 E_1 、 E_2 能级的原子数。

单位体积中单位时间内，
从 $E_2 \rightarrow E_1$ 自发辐射
的原子数：

$$\left(\frac{dN_{21}}{dt} \right)_{\text{自发}} \propto N_2$$

写成等式

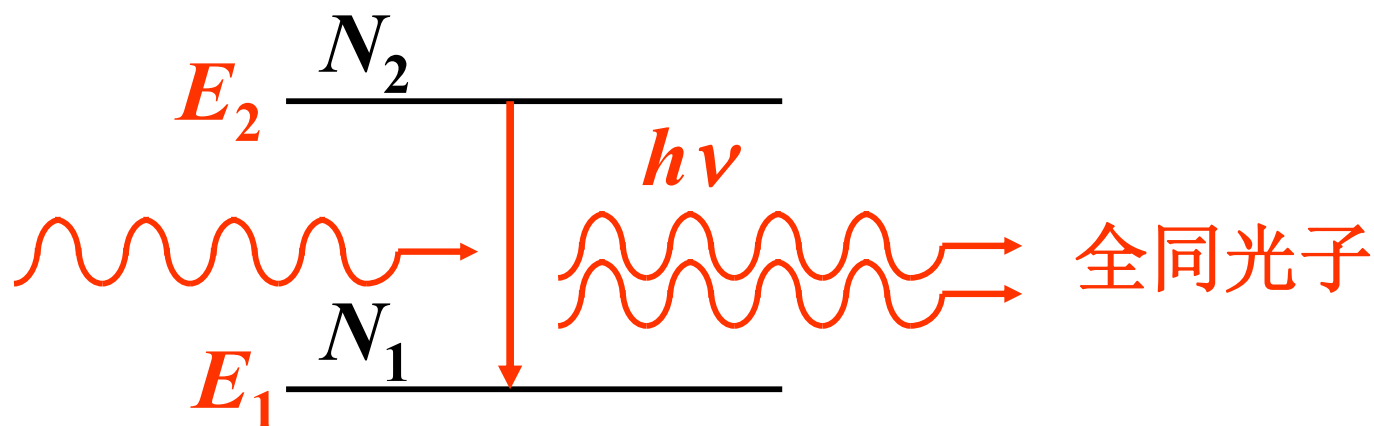
$$\left(\frac{dN_{21}}{dt} \right)_{\text{自发}} = A_{21}N_2$$

A_{21} —自发辐射系数，单个原子在单位时间内发生自发辐射过程的概率。

各原子自发辐射的光是独立的、
无关联的非相干光。

3. 受激辐射

处于高能态 E_2 的原子，在能量为 $h\nu = E_2 - E_1$ 的外来光子的诱发下，跃迁到基态（或低能态） E_1 ，同时辐射出光子，这种光辐射称为受激辐射。



设 $\rho(\nu, T)$ 温度为 T 时, 频率为 $\nu = (E_2 - E_1) / h$ 附近, 单位频率间隔的外来光的能量密度。

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

$$\left(\frac{dN_{21}}{dt} \right)_{\text{受激}} \propto \rho(\nu, T) N_2$$

写成等式

$$\left(\frac{dN_{21}}{dt} \right)_{\text{受激}} = B_{21} \rho(\nu, T) N_2$$

B_{21} ——受激辐射系数

令

$$W_{21} = B_{21} \cdot \rho(\nu, T)$$

则

$$\left(\frac{dN_{21}}{dt} \right)_{\text{受激}} = W_{21} N_2$$

W_{21} ——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
-----有光的放大作用。

平衡时: $\left(\frac{dN_{12}}{dt}\right)_{\text{吸收}} = \left(\frac{dN_{21}}{dt}\right)_{\text{自发}} + \left(\frac{dN_{21}}{dt}\right)_{\text{受激}}$

即: $B_{12}\rho(\gamma, T)N_1 = A_{21}N_2 + B_{21}\rho(\gamma, T)N_2$

$B_{12}; A_{21}; B_{21}$ 称为爱因斯坦系数

爱因斯坦在 1917 年从理论上得出  $\sim 10^{-15}$

$B_{21} = B_{12}$ 单个原子,受激辐射和吸收的概率相同 $A_{21} = \frac{8\pi h\nu^3}{C^3} B_{12}(B_{21})$

爱因斯坦的受激辐射理论为六十年代初实验上获得激光奠定了理论基础。

MB分布

没有实验家,理论家就会迷失方向。

没有理论家,实验家就会迟疑不决。

$$N_i \propto \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right)$$

二、激光原理

1. 粒子数反转

为何要粒子数反转 (population inversion)

从 $E_2 \rightarrow E_1$ 自发辐射的光, 可能引起受激辐射过程, 也可能引起吸收过程。

$$\left(\frac{dN_{21}}{dt} \right)_{\text{受激}} = B_{21} \rho(\nu, T) N_2 = W_{21} N_2$$

$$\left(\frac{dN_{12}}{dt} \right)_{\text{吸收}} = B_{12} \rho(\nu, T) N_1 = W_{12} N_1$$

氢原子: 室温 $E_1 = -13.6\text{eV}; E_2 = -3.4\text{eV}, kT \approx 0.025\text{eV}$

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-403} \sim 0 \quad N_1 \gg N_2$$

产生激光必须 $\left(\frac{dN_{21}}{dt}\right)_{\text{受激}} > \left(\frac{dN_{12}}{dt}\right)_{\text{吸收}}$

因 $B_{21}=B_{12} \rightarrow W_{21}=W_{12}$

\therefore 必须 $N_2 > N_1$ (粒子数反转)

高能级 E_2 上的粒子数密度 N_2 超过低能级 E_1 的粒子数密度 N_1 的这种分布叫做粒子数的反常分布，简称粒子数反转。

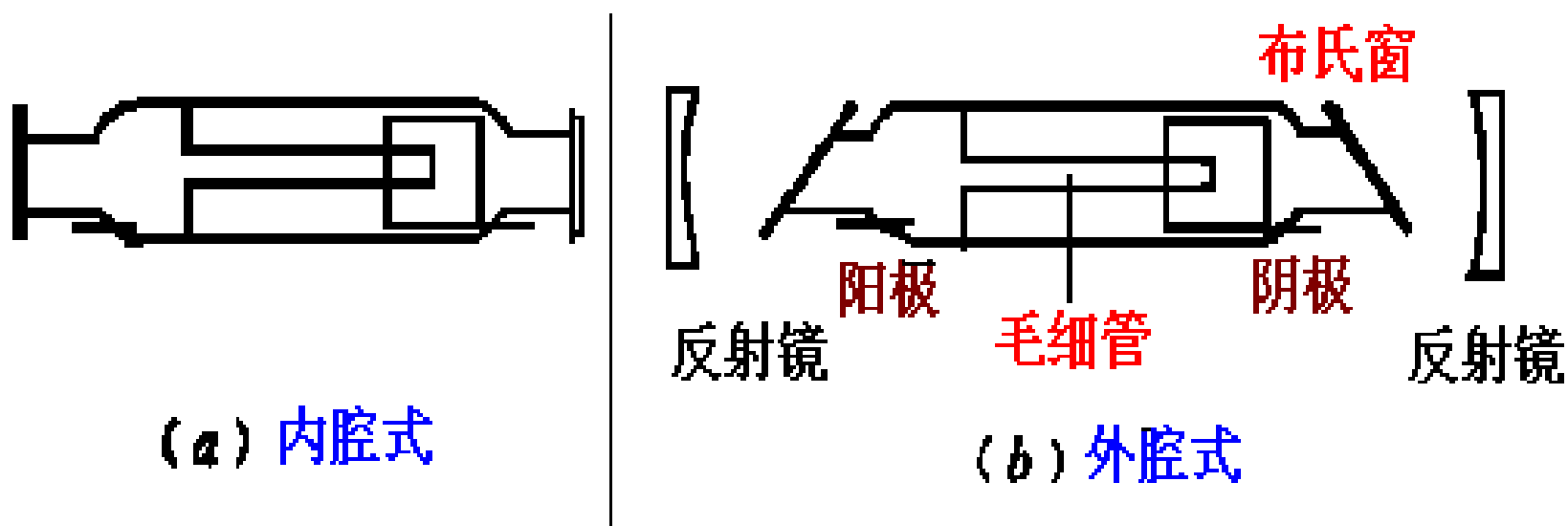
为了得到光放大，就必须实现粒子数反转

而要粒子数反转，必须从外界给工作物质提供能量。可使用气体放电．光照．化学反应等，把处于基态 E_1 的原子激发到高能态 E_2 上去，这个过程叫**激励**，俗称**泵浦**。

2. 能实现粒子数反转的物质，称为激活物质；
这些物质都具有亚稳态的能级结构。

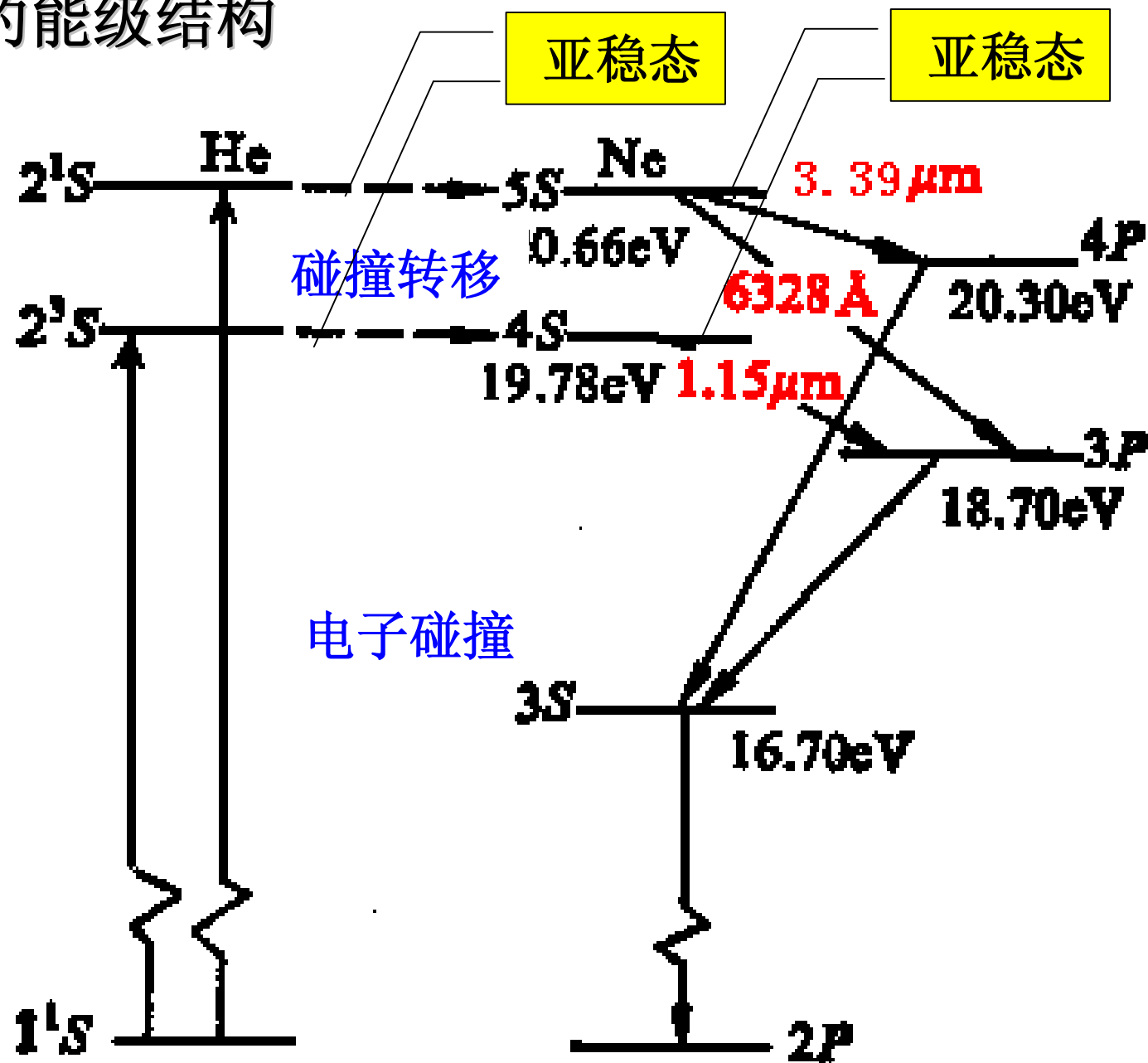
粒子数反转举例

例. He—Ne 气体激光器的粒子数反转



He -Ne 激光器中He是辅助物质，Ne是
激活物质，He与 Ne之比为5：1 ~ 10：1。

激活物质的能级结构



He-Ne激光管的工作原理:

由于电子的碰撞, He被激发(到 2^3S 和 2^1S 能级)的概率比 Ne 原子被激发的概率大;

在He 的 2^3S , 2^1S 这两个能级都是亚稳态, 很难回到基态



在He的这两个激发态上集聚了较多的原子。

由于Ne的 $5S$ 和 $4S$ 与 He的 2^1S 和 2^3S 的能量几乎相等, 当两种原子相碰时非常容易产生能量的“共振转移”;

在碰撞中 He 把能量传递给 Ne而回到基态，
而 Ne则被激发到 $5S$ 或 $4S$ ；

（要产生激光，除了增加上能级的粒子数外，
还要设法减少下能级的粒子数）

正好Ne的 $5S$ ， $4S$ 是亚稳态，下能级 $4P$ ，
 $3P$ 的寿命比上能级 $5S$ ， $4S$ 要短得多，
这样就可以形成粒子数的反转。

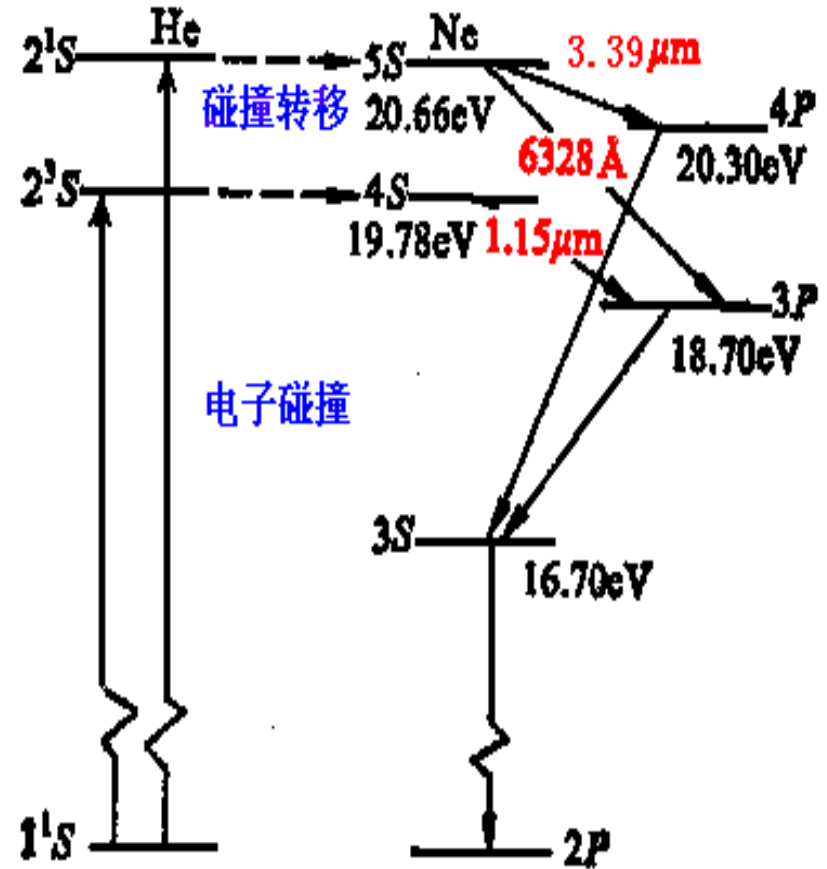
放电管做得比较细（毛细管），可使原子与管壁碰撞
频繁。借助这种碰撞， $3S$ 态的Ne原子可以将能量交给
管壁发生“无辐射跃迁”而回到基态，

以及时减少 $3S$ 态的Ne原子数，

有利于激光下能级 $4P$ 与 $3P$ 态的抽空。

Ne原子可以产生多条激光谱线, 图中标明了最强的三条:

- 0. 6328 μm
- 1. 15 μm
- 3. 39 μm

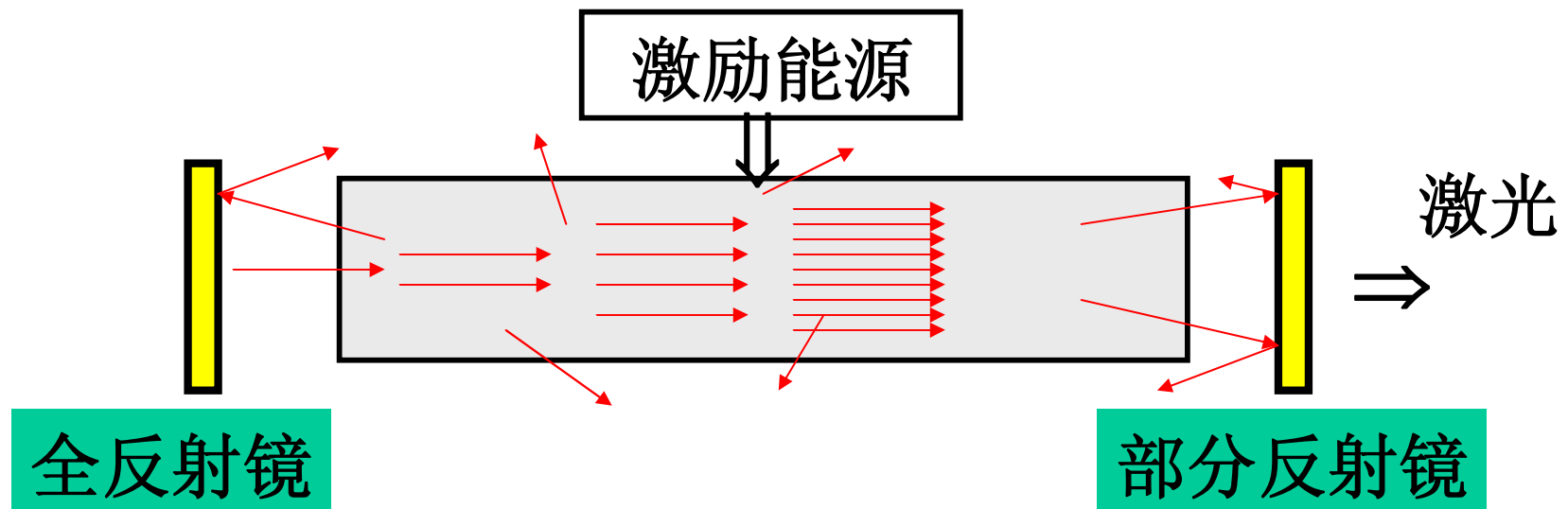


它们都是从亚稳态到非亚稳态、非基态之间发生的，
因此较易实现粒子数反转。

工作物质应是三能级或四能级，要有亚稳态。四能级比三能级系统有更多的优势。红宝石激光器是三能级，氦氖激光器是四能级。

3. 光学谐振腔 (optical harmonic oscillator)

激光器有两个反射镜，
它们构成一个光学谐振腔。



光学谐振腔的作用：

- 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）。

激光具有很好的方向性是由于谐振腔对光束方向性的选择作用所致。

总结：激光器的三大基本组成部及其作用可归纳如下：

工作物质——具有适当的能级结构，能够产生受激辐射的光放大；

光学谐振腔——维持光振荡；

激励能源——供给能量，使粒子数反转。

五、激光器

1、种类 按工作物质分

固体（如红宝石 Al_2O_3 ）

液体（如某些染料）

气体 (如He-Ne, CO₂)

半导体（如砷化镓 GaAs）

● ● ● ● ● ●

按工作方式分

连续式（功率可达 10^4 W）

脉冲式（瞬时功率可达 10^{14} W）

2、波长 极紫外——可见光——亚毫米

(100 nm)

(1.222 m m)

3、特点

相干性好

（单色性好）时间相干性好（ $\Delta\lambda \sim 10^{-8}$ 埃），
相干长度可达几十公里。

空间相干性好，有的激光波面上
各个点都是相干光源。

方向性好（发散角 $\sim 10^{-4}$ 弧度）

脉冲瞬时功率大（强度大）（可达 $\sim 10^{14}$ 瓦）

亮度高 1 mw 的氦氖激光器亮度是太阳亮度的100倍

4、 激光的特性及其应用

方向性极好的强光束

---准直、测距、切削、武器等。

相干性极好的光束

--精密测厚、测角，全息摄影等。

强度大、单色性好、方向性好和相干性好
是激光的优点。