

激光原理与技术

第二章 激光器基本原理

丁铭

仪器科学与光电工程学院

1、原子发光机理

1.1 原子能级与跃迁

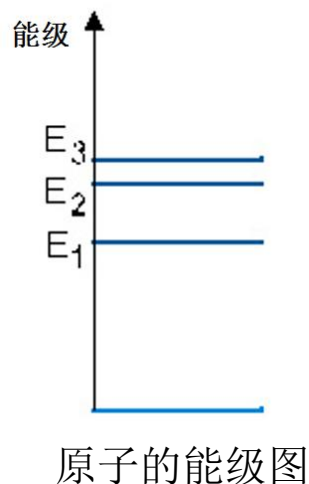
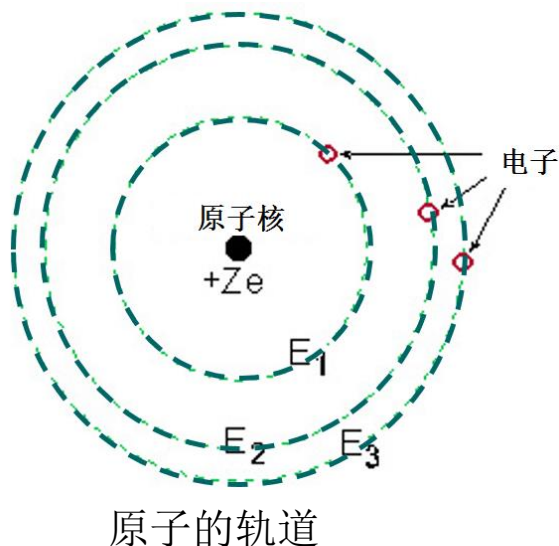


图2-1 原子结构的波尔模型

跃迁：原子从某一能级吸收或释放能量，变成另一能级。

$$\left. \begin{array}{l} \text{吸收跃迁: 低} \xrightarrow{\text{吸收能量}} \text{高} \\ \text{辐射跃迁: 高} \xrightarrow{\text{辐射能量}} \text{低} \end{array} \right\} h\nu = E_1 - E_2$$

1、原子发光机理

1.2 自发辐射、受激吸收和受激辐射

□ 自发辐射

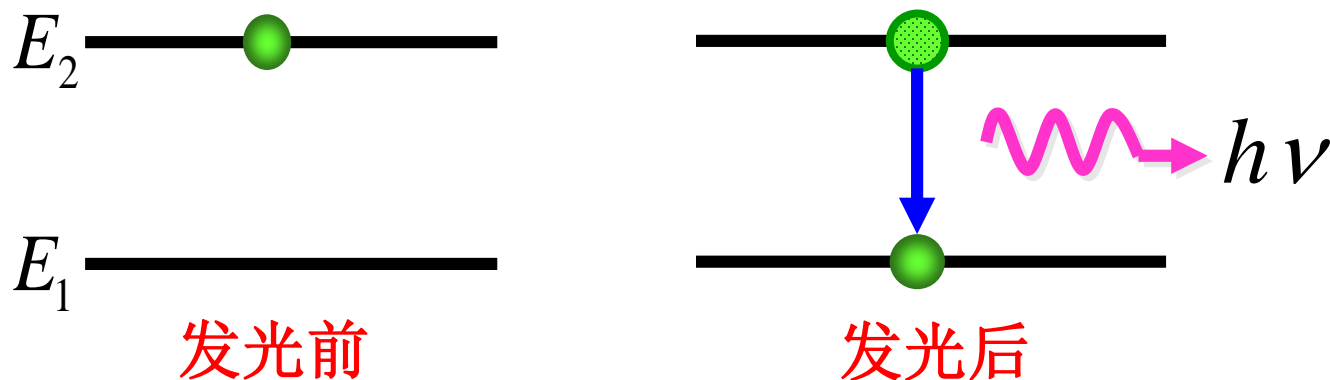


图2-2 自发辐射示意图

$$h\nu = E_2 - E_1$$

普通光源（白炽灯、日光灯、高压水银灯）的发光过程为自发辐射。各原子自发辐射发出的光彼此独立，频率、振动方向、相位不一定相同——为**非相干光**。

主要特征：无需外来光，随机发光，发出的光子不相干，即相位、偏振态、传输方向是随机的；发出的光子能量分布在许许多多多个模式上。

自发辐射几率 A_{21} ：能级 $2 \rightarrow 1$ 跃迁的特征参数

$$A_{21} = \left(\frac{dn_{21}}{dt} \right)_{sp} \frac{1}{n_2}$$

E_2 能级平均寿命 τ_s ：

$$\tau_s = \frac{1}{A_{21}}$$

几个毫秒 亚稳态

推导 A_{21} 和 τ_s 的关系式

$$\frac{dn_2}{dt} = -\left(\frac{dn_{21}}{dt}\right)_{sp} = -\frac{n_2}{\tau_s} \quad \Rightarrow \quad n_2 = n_{20}e^{-t/\tau_s}$$
$$A_{21} = \left(\frac{dn_{21}}{dt}\right)_{sp} \frac{1}{n_2}$$
$$\frac{dn_2}{dt} = -\left(\frac{dn_{21}}{dt}\right)_{sp} = -A_{21}n_2 \quad \Rightarrow \quad n_2 = n_{20}e^{-A_{21}t}$$
$$A_{21} = \frac{1}{\tau_s}$$

- 在自发辐射过程中， E_2 能级上粒子随时间按指数衰减；
- 自发辐射几率 A_{21} 与自发辐射（能级）寿命 t_s 呈倒数关系；
- t_s 可以通过实验测得，由 $A_{21} = 1/\tau_s$ 可获得自发辐射几率；
- A_{21} 只决定于物质本身性质，与辐射场 ρ_ν 无关。

□ 受激吸收

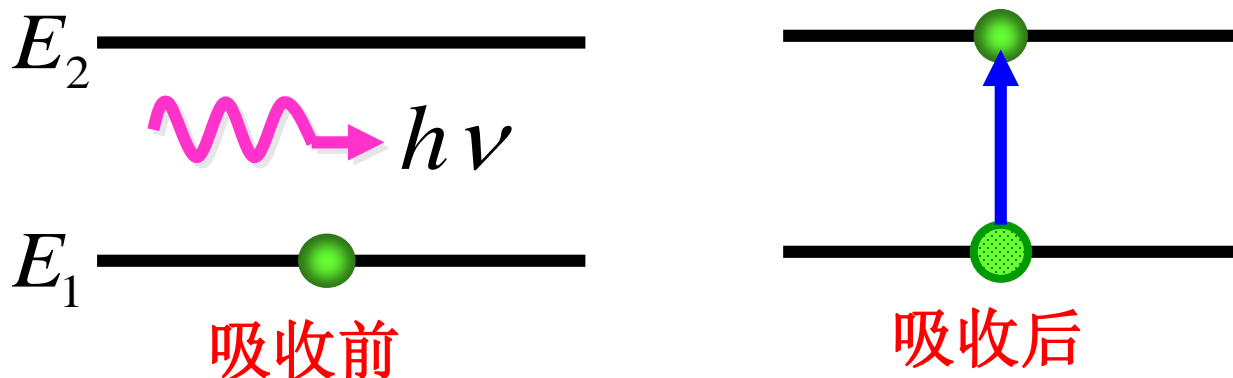


图2-3 受激吸收示意图

$$h\nu = E_2 - E_1$$

受激吸收跃迁几率：
$$W_{12} = \left(\frac{dn_{12}}{dt} \right)_{st} \frac{1}{n_1}$$

在辐射场作用下：

$$W_{12} = B_{12} \rho_\nu$$

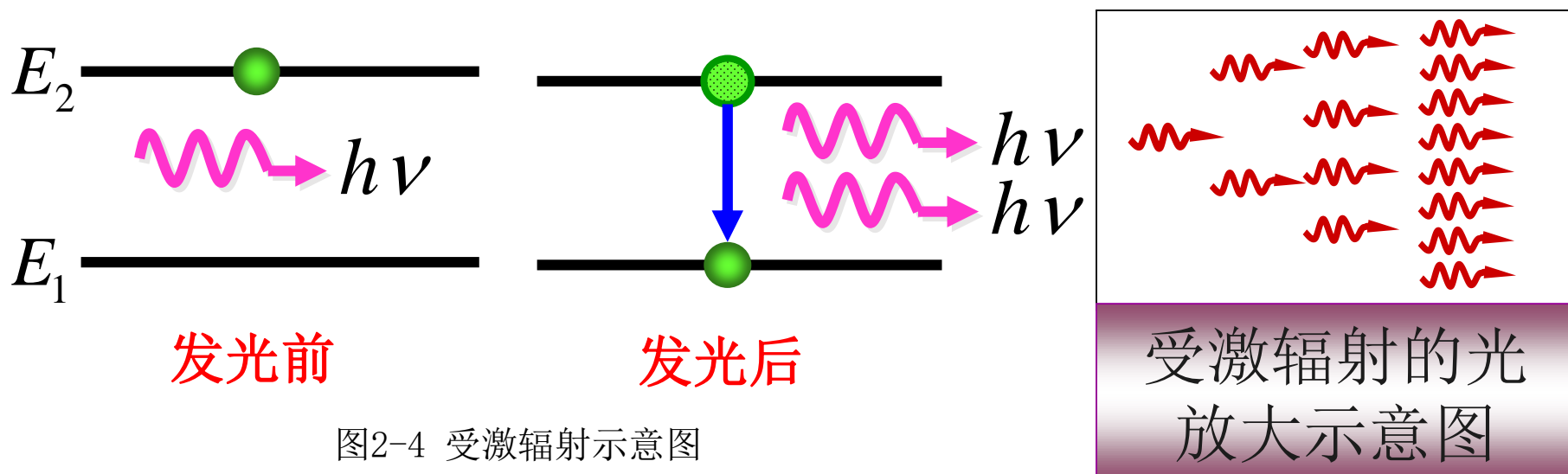
与原子本身性质和辐射场能量密度有关

B_{12} ：受激吸收跃迁爱因斯坦系数

只与原子本身性质有关

□ 受激辐射

当外来光子的频率满足 $h\nu = E_2 - E_1$ 时，使原子中处于高能级的电子在外来光子的激发下向低能级跃迁而发光。



$$h\nu = E_2 - E_1$$

受激辐射光具有与外来光子一样的特征：**相位、偏振态、传输方向完全相同**，所以受激辐射光是相干光。

受激辐射跃迁几率：

$$W_{21} = \left(\frac{dn_{21}}{dt} \right)_{st} \frac{1}{n_2}$$

$$W_{21} = B_{21} \rho_\nu$$

与原子本身性质和辐射场能量密度有关

B_{21} ：受激辐射跃迁爱因斯坦系数

只与原子本身性质有关

当光与原子相互作用时，总是同时存在这**三种**过程

1.3 爱因斯坦系数之间的关系

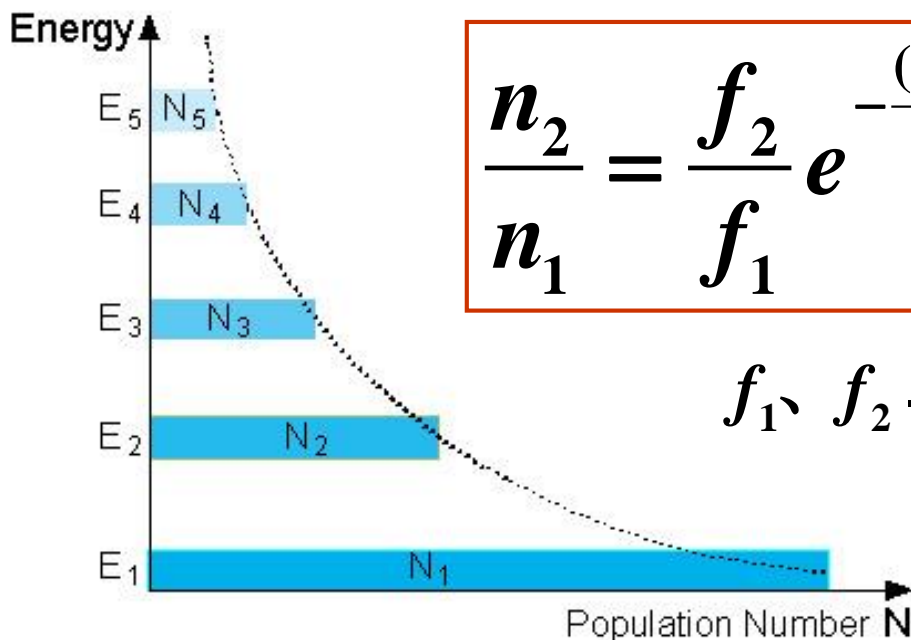
□ 热平衡状态:

辐射率 = 吸收率 （辐射场总光子数保持不变）

$$n_2 A_{21} + n_2 B_{21} \rho_\nu = n_1 B_{12} \rho_\nu \quad (1)$$

n_1 、 n_2 、 n_3 —— 各能级上的原子数密度（集居数密度）

□ 玻尔兹曼统计分布:



$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{f_2}{f_1} e^{-\frac{(E_2 - E_1)}{KT}} \quad (2)$$

f_1 、 f_2 —— 能级 E_1 和 E_2 的简并度，
或称统计权重

图2-5 集居数按能级的玻尔兹曼分布

由（1）和（2）可得：
单色辐射能量密度

$$\rho(\nu, T) = \frac{A_{21} / B_{21}}{\frac{B_{12} f_1}{B_{21} f_2} e^{\frac{h\nu}{KT}} - 1}$$

黑体辐射Planck公式为：

$$\rho_\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{KT}} - 1}$$

与Planck公式比较得：

$$\begin{aligned} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} = m_\nu h\nu \\ B_{12} f_1 = B_{21} f_2 \end{array} \right. & \xrightarrow{f_1 = f_2} \left\{ \begin{array}{l} B_{12} = B_{21} \\ W_{12} = W_{21} \\ A_{21} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} B_{21} \end{array} \right. \end{aligned}$$

结论：

1. 其他条件相同时，受激辐射和受激吸收具有相同几率。
2. 热平衡状态下，高能级上原子数少于低能级上原子数，故正常情况下，吸收比发射更频繁，其差额由自发辐射补偿。
3. 自发辐射的出现随 ν^3 而增大，故波长越短，自发辐射几率越大。

【例 2-1】氢原子的某一激发态和基态能级的能量差 ΔE 为 16.9eV ，若该原子体系处于室温 ($T = 300\text{K}$)，它处于激发态的原子态与处于基态的原子数之比是多少？ ($f_1 = f_2$)

解：

$$\frac{n_2}{n_1} = e^{-\frac{(E_2 - E_1)}{KT}} = e^{-\frac{27.07 \times 10^{-19}}{1.38 \times 10^{-23} \times 300}} = e^{-653} \ll 1$$

$$1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$$

【例 2-2】室温下 ($T = 300\text{K}$)，某物质中E1和E2两能级的能量差为0.5eV。计算E2能级粒子数与E1能级粒子数之比。当原子从E2能级跃迁到E1能级时，辐射出的光子波长为多少？

解：

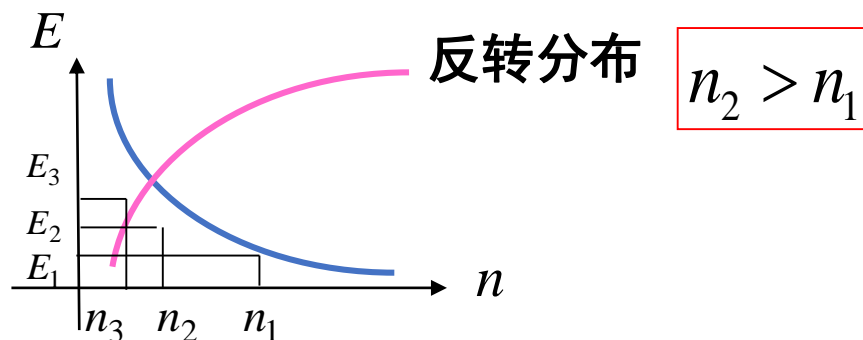
$$\frac{n_2}{n_1} = e^{-\frac{(E_2 - E_1)}{KT}} = e^{-\frac{0.5 * 1.6 * 10^{-19}}{1.38 * 10^{-23} * 300}} = 4 * 10^{-9}$$

计算波长：

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E} = \frac{6.626 * 10^{-34} * 3 * 10^8}{0.5 * 1.6 * 10^{-19}} = 2.48(\mu m)$$

2、激光产生条件

2.1 受激辐射占优势的条件 - 集居数反转



粒子数反转分布 \rightarrow 受激辐射占主导 \rightarrow 光放大

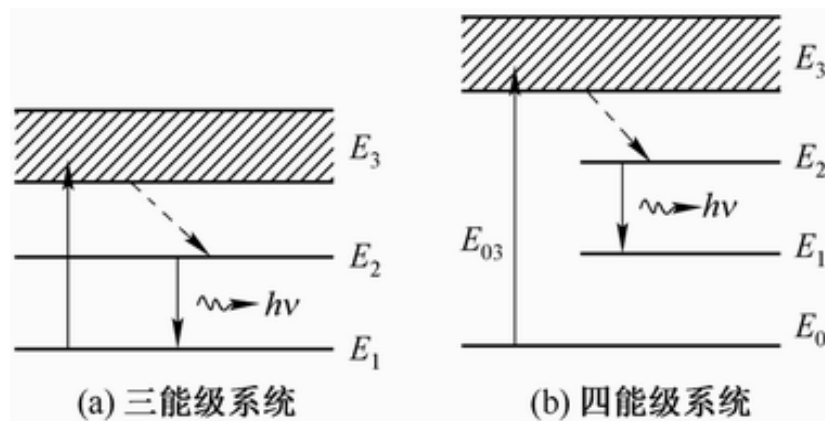
- 实现粒子数反转的工作物质称为**增益（或激活）粒子**。
- 粒子数反转分布是产生激光的前提条件。
- 如何实现粒子数反转分布？

※ 只有依靠外界向物质提供能量（泵浦或称激励）才能打破热平衡，实现粒子数反转。

实现粒子数反转必须要有合适的能级系统：

1. 实现上下能级之间粒子数反转产生激光的物理过程：三能级和四能级系统。

2. **三能级系统：**如图，下能级 E_1 是基态能级，上能级 E_2 是亚稳态能级， E_3 为抽运高能级。其主要特征是激光的下能级为基态，发光过程中下能级的粒子数一直保存有相当的数量。



三能级系统和四能级系统示意图

3. **四能级系统：**如图，下能级 E_1 不是基态能级，而是一个激发态能级，在常温下基本上是空的。其激励能量要比三能级系统小得多，产生激光要比三能级系统容易得多。

2.2 激活粒子的增益与损耗

□ 增益系数:

增益系数是描述激光工作物质放大特性的参数。

定义：光通过单位长度激活介质后光强增长的百分数。

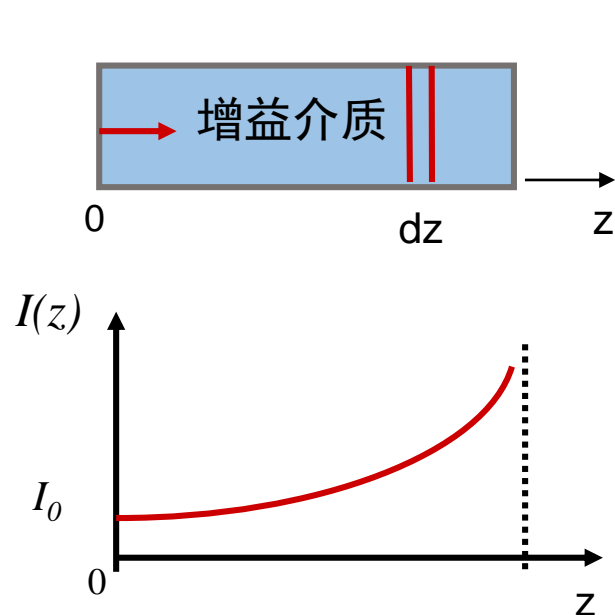


图2-7 光放大示意图

$$G(z) = \frac{dI(z)}{dz} \cdot \frac{1}{I(z)}$$

当G不随 z 变化, 是常数时,
有:

$$I(z) = I_0 e^{G^0 z}$$

□ 损耗系数 α :

激活介质中不仅存在增益，还有损耗。

损耗系数—单位长度光强衰减的百分比（负增益系数）

$$\alpha(z) = -\frac{dI(z)}{dz} \cdot \frac{1}{I(z)} \quad \Rightarrow \quad I(z) = I_0 e^{-\alpha z}$$

G & α 并存的介质中，光强的变化：

$$dI(z) = [G(z) - \alpha] I(z) dz$$
$$\Rightarrow \quad I(z) = I_0 e^{(G^0 - \alpha)z}$$

自激振荡的阈值条件： $G \geq \alpha$

2.3 光学谐振腔

从上面的讨论可以知道，当 $G \geq \alpha$ 时，只要增益介质足够长，无论多微弱的入射光，都可以被放大为饱和光强 I_m 。

然而，要产生**高强度、方向性好的**激光，还有两个问题要解决：

- 要获得最大的放大效果，需要近似无穷长度的增益介质，然而这在工程上不可实现的，如何尽可能的增加增益物质的长度？
- 自发辐射产生的光子的前进方向是随机的，如果直接对其进行受激辐射放大，得到的激光在方向上也是随机的，如何选择特定方向的光来进行放大得到方向性很好的激光？

2.3 光学谐振腔

利用各种不同结构的**光学谐振腔**来解决上述两个问题。

平行平面腔：通过让需要放大的光在两块平面镜之间反射，实现了近似于无限长的增益介质；

方向性的选择：通过限制平面镜的尺度，使得在谐振腔内反射的过程中，只有靠近平面镜中心而且方向垂直于平面镜的那部分光才能在其中多次反射放大而形成激光，其它方向的光则逸出谐振腔外，无法形成正反馈过程。

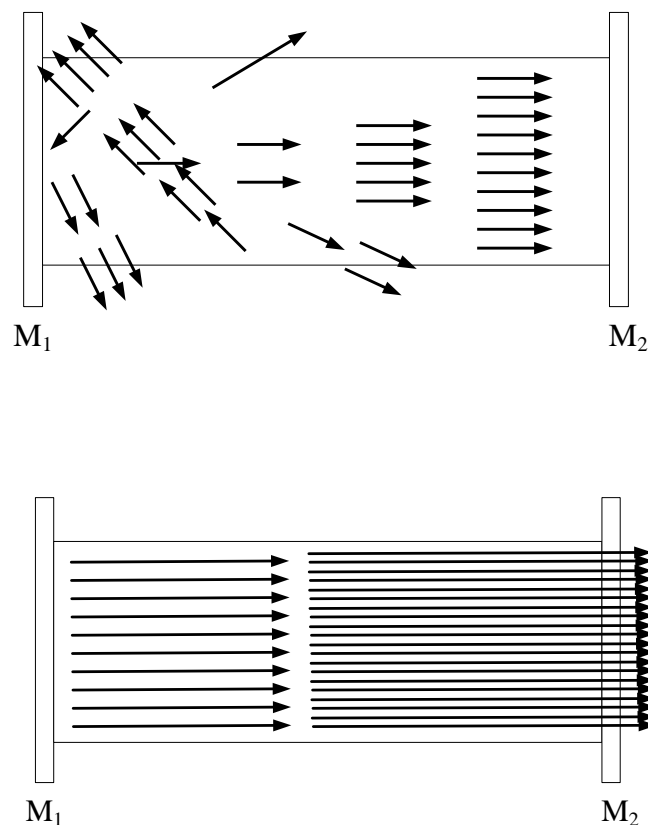


图2-8 谐振腔工作示意图

产生激光的条件：

- (1) **增益介质：**其激活粒子有合适的能级结构。
- (2) **外界激励源：**使激光上、下能级产生集居数反转。
- (3) **光学谐振腔：**使受激辐射的光能在谐振腔内维持振荡。

3、激光器的基本组成

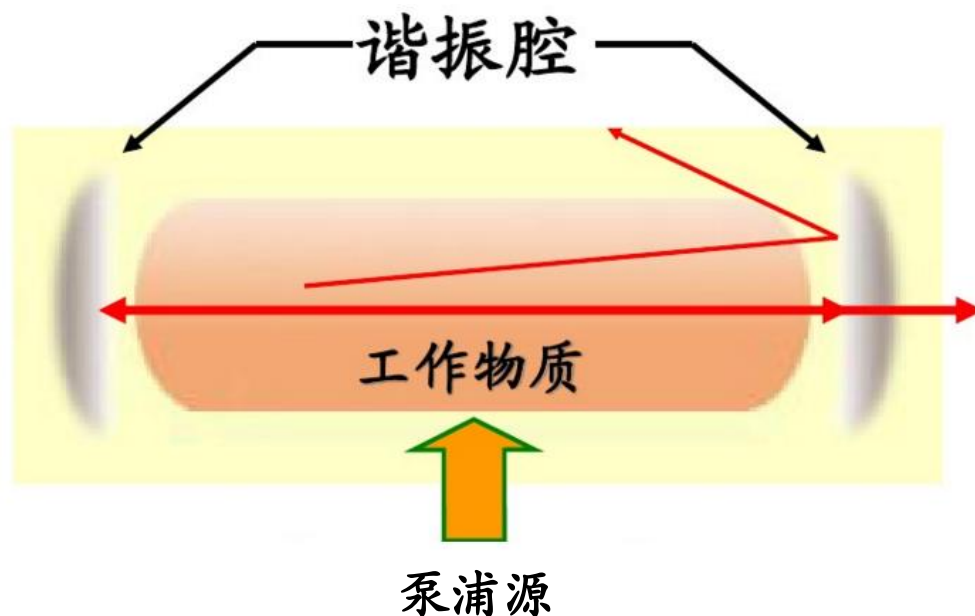


图2-9 激光器组成示意图

工作物质：通过外界泵浦，处于粒子数反转状态的物质

泵浦源：形成粒子数反转

谐振腔：提供正反馈，在腔内形成自激振荡

➤ 激光工作物质

1. 固体：晶体、玻璃
2. 气体：原子气体、离子气体、分子气体
3. 半导体
4. 液体
5. 掺稀土光纤

➤ 泵浦源

1. 光学激励
2. 气体放电激励
3. 化学激励
4. 核能激励
5. 半导体激光器

➤ 光学谐振腔

产生与维持激光振荡
控制输出激光特性

4、激光器的分类

➤ 按工作物质分类

1. 气体激光器
2. 固体激光器
3. 液体激光器
4. 自由电子激光器
5. 半导体激光器
6. 光纤激光器

➤ 按工作方式分类

连续激光器、脉冲激光器

➤ 按激光技术分类

调Q激光器、锁模激光器、稳频激光器、可调谐激光器

➤ 按谐振腔分类

平面腔激光器、球面腔激光器、非稳腔激光器