

第七章 激光

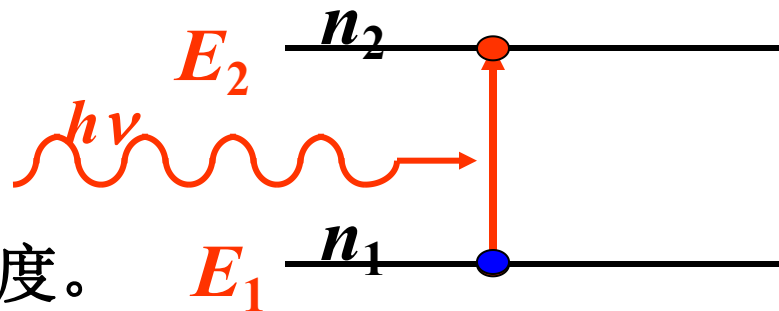
§ 7.1 光与原子相互作用

光与物质的相互作用有三种主要过程：
吸收，自发辐射和受激辐射。

I. 吸收(absorption)

条件: $h\nu_{21} = E_2 - E_1$

设 n_1 、 n_2 — E_1 、 E_2 能级的原子密度。



单位体积单位时间内, 吸收光子: 从 $E_1 \rightarrow E_2$ 的光子数:

$$\left(\frac{dn_{12}}{dt} \right)_{\text{吸收}} \propto u(\nu, T) n_1$$

光的辐射能量密度为 $u(\nu)$ $I(\nu) = cu(\nu)$

写成等式 $\left(\frac{dn_{12}}{dt}\right)_{\text{吸收}} = B_{12} u(\nu, T) n_1$

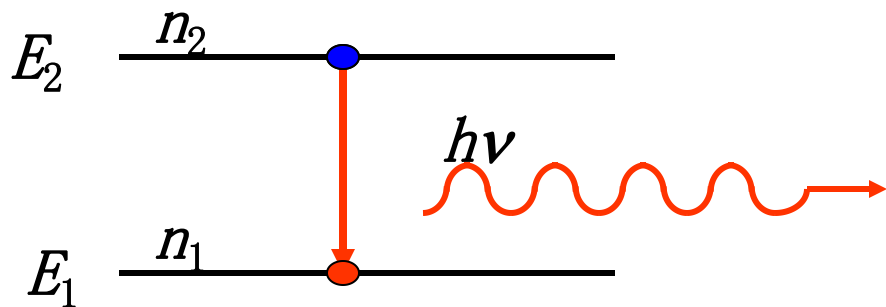
B_{12} ——受激吸收爱因斯坦系数

令 $W_{12} = B_{12} u(\nu, T)$

$$\left(\frac{dn_{12}}{dt}\right)_{\text{吸收}} = W_{12} n_1 \rightarrow n_{12} = n_1 W_{12}$$

W_{12} ——吸收速率。

2. 自发辐射



各原子所发光子的位相、
方向、偏振态各不相同。
自发辐射独立进行。

普通光源为不相干光。

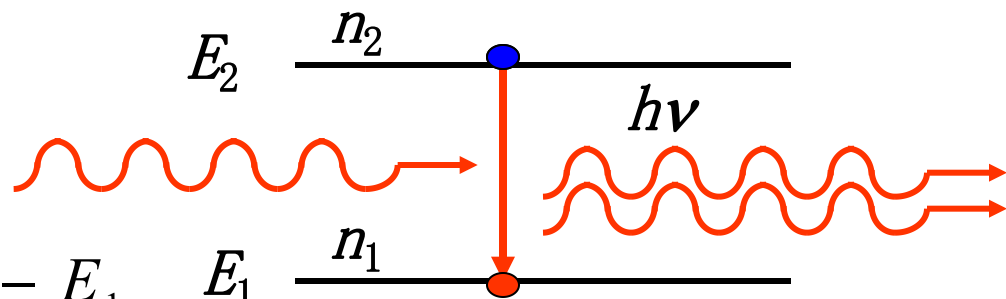
设 n_1 、 n_2 — E_1 、 E_2 原子密度。

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

$$\left(\frac{dn_{21}}{dt} \right)_{\text{自发}} \propto n_2 \quad n_{21} = n_2 A_{21}$$

A_{21} 为自发辐射爱因斯坦系数

3. 受激辐射



全同光子

条件: $h\nu_{21} = E_2 - E_1$

$$\left(\frac{dn_{21}}{dt} \right)_{\text{受激}} = B_{21} u(\nu T) n_2$$

令

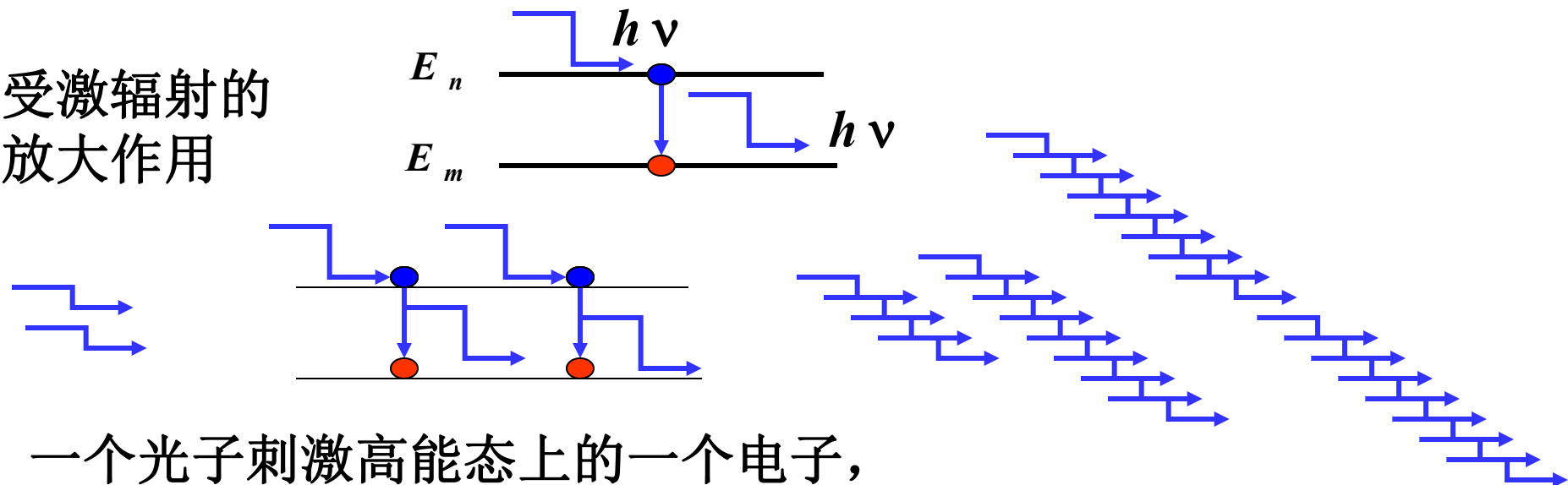
$$W_{21} = B_{21} \cdot u(\nu, T)$$

B_{21} —爱因斯坦受激辐射系数

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

W_{21} —受激辐射速率。

受激辐射的放大作用



一个光子刺激高能态上的一个电子，
电子跃迁形成二个光子，二个光子刺激高能态上的二个电子形成四个光子……光子数成几何级数增加，
受激辐射引起光放大。

$$n'_{21} = B_{21} n_2 u(\nu) \quad n'_{21} = n_2 W_{21} \quad \left(\frac{dn_{21}}{dt} \right)_{\text{受激}} = W_{21} n_2$$

B_{21} : 受激辐射爱因斯坦系数, W_{21} 为受激辐射速率。

4 吸收、自发辐射和受激辐射之间的关系

平衡条件下： $n_{12} = n_{21} + n'_{21}$

$$n_1 B_{12} u(\nu) = n_2 A_{21} + n_2 B_{21} u(\nu)$$

$$u(\nu) = \frac{A_{21}}{\frac{n_1}{n_2} B_{12} - B_{21}}$$

玻尔兹曼定律：

$$\frac{n_2}{n_1} = \exp\left[-\frac{E_2 - E_1}{kT}\right] = \exp\left[-\frac{h\nu}{kT}\right]$$

$$u(\nu) = \frac{A_{21}}{B_{12} e^{h\nu/kT} - B_{21}}$$

对于黑体辐射：

$$u(\nu) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad \text{单色能量密度}$$

比较：

$$u(\nu) = \frac{A_{21}}{B_{12}e^{h\nu/kT} - B_{21}} = \frac{A_{21} / B_{21}}{\frac{B_{12}}{B_{21}}e^{h\nu/kT} - 1}$$

得：

$$B_{12} = B_{21} = B \quad \frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3}$$

§ 7.3 粒子数翻转

普通光源-----自发辐射

激光光源-----受激辐射

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)



一. 为何要粒子数反转 (population inversion)

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

$$\left(\frac{dn_{21}}{dt} \right)_{\text{受激}} = B_{21} u(\nu, T) n_2 = W_{21} n_2$$

$$\left(\frac{dn_{12}}{dt} \right)_{\text{吸收}} = B_{12} u(\nu, T) n_1 = W_{12} n_1$$

要产生激光, 就必须 $\left(\frac{dn_{21}}{dt} \right)_{\text{受激}} > \left(\frac{dn_{12}}{dt} \right)_{\text{吸收}}$

因为:

$$B_{21} = B_{12}$$

$$W_{21} = W_{12}$$

\therefore 必须 $N_2 > N_1$ (粒子数反转)。

吸收光能量为 $n_1 u(\nu) B h \nu$ 产生光能量为 $n_2 u(\nu) B h \nu$

单位体积净能量: $\frac{dE}{tdV} = \frac{dE}{tSdz} = (n_2 - n_1) u(\nu) B h \nu$

光强: $I(\nu) = \frac{E}{St} = c u(\nu)$

$$\frac{dI}{dz} = (n_2 - n_1) \frac{I(\nu)}{c} B h \nu$$

$$\frac{dI(\nu)}{dz} = (n_2 - n_1) I(\nu) \frac{c^2 A_{21}}{8 \pi \nu^2}$$

$$\frac{dI(\nu)}{dz} = \alpha(\nu) I(\nu)$$

$$\alpha(\nu) = (n_2 - n_1) \frac{c^2 A_{21}}{8 \pi \nu^2}$$

$$I(\nu, z) = I_0(\nu) e^{\alpha(\nu) z}$$

$n_2 > n_1$: $\alpha(\nu) > 0$ 指数增强

二、能实现粒子数反转的物质

(1) 要有合适的能级结构。

(2) 要具备必要的能量输入系统。

能量供应过程叫做“激励”“激发”“抽运”“泵浦”。

三、二级系统

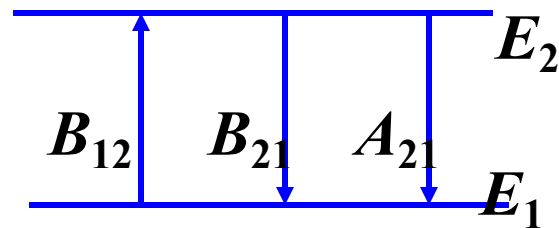
$$B_{12} = B_{21} = B$$

$$w_{12} = w_{21} = w$$

$$\frac{dn_2}{dt} = w(n_1 - n_2) - n_2 A_{21}$$

稳定时：

$$\frac{dn_2}{dt} = 0 \quad \frac{n_2}{n_1} = \frac{w}{A_{21} + w}$$



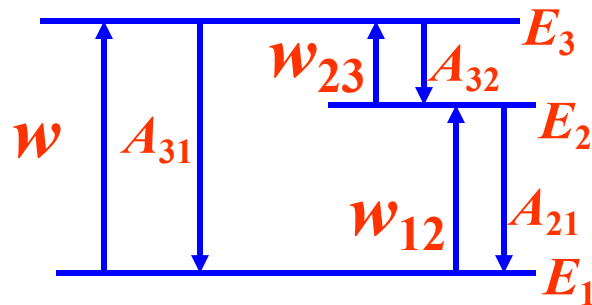
对二能级物质，不能实现粒子数反转。

四、三能级系统

粒子翻转条件:

$$A_{32} \gg A_{31}, A_{21}$$

$$w \gg w_{23}, w_{12}$$



$$\frac{dn_3}{dt} = wn_1 - A_{31}n_3 + w_{23}n_2 - A_{32}n_3$$

$$\frac{dn_2}{dt} = w_{12}n_1 - A_{21}n_2 - w_{23}n_2 + A_{32}n_3$$

稳定时: $\frac{dn_3}{dt} = \frac{dn_2}{dt} = 0,$

$$n_3 = \frac{wn_1 + w_{23}n_2}{A_{31} + A_{32}}, \quad \frac{n_2}{n_1} = \frac{w_{12} + \frac{wA_{32}}{A_{31} + A_{32}}}{-\frac{w_{23}A_{32}}{A_{31} + A_{32}} + A_{21} + w_{23}}$$

为什么E₂, E₃之间不能实现?

可得: $\frac{n_2}{n_1} = \frac{w}{A_{21}}$

基态上集聚大量粒子, 须抽运很强,
是一个显著缺点。红宝石激光器

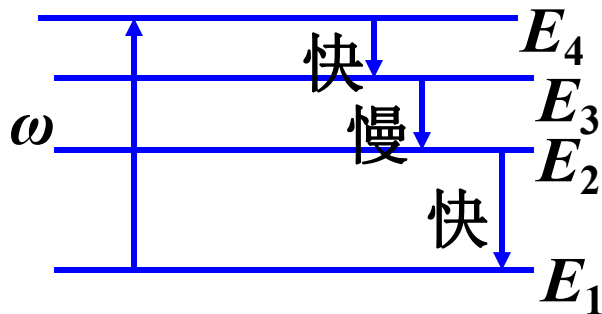
五、四能级系统

YAG激光器，氦氖激光器、
CO₂激光器：四能级系统激光器。

粒子数翻转在 E_3 ， E_2 之间实现。

E_2 不是基态，易实现。

与激光器运转过程中直接有关的能级有关，不是说某种物质只具有二个能级、三个能级或四个能级。



六十年代初对发明激光有贡献的三位科学家。

1964年获诺贝尔物理奖。



Charles H. Townes

巴索夫



Arthur L. Schawlow

汤斯



Николай Г. Басов

普罗恰洛夫

§ 7.4 光震荡

$$n'_{21} = B_{21} n_2 u(\nu) \quad n_{21} = n_2 A_{21}$$

受激辐射和自发辐射光子数之比： $R = \frac{u(\nu) B}{A_{21}}$

要使 $R \gg 1$ 能量密度 $u(\nu)$ 必须很大，而普通光源中， $u(\nu)$ 通常很小。

$\lambda=1$ 微米：T=300k时， $R=10^{-12}$ ，要使 $R=1$ ：T=5000k。

某一方向上受激辐射，不断放大和加强。

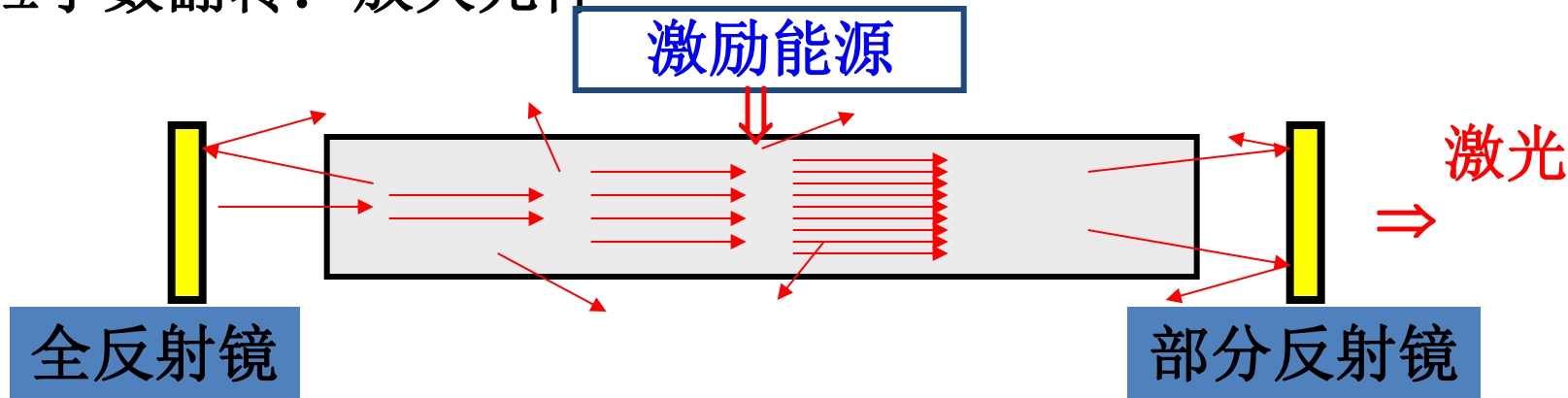
其它方向的光容易逸出腔外，在一特定方向上超过自发辐射——光学谐振腔。

1. 光学谐振腔 纵膜与横模

(optical harmonic oscillator)

两个反射镜，光学谐振腔：正反馈、谐振、输出。

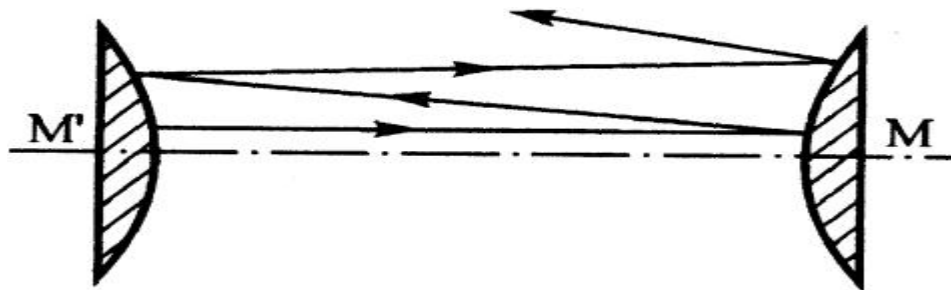
粒子数翻转：放大元件



沿轴向光子，受到两块反射镜的反射而不致于逸出腔外。
——轴向的受激辐射。

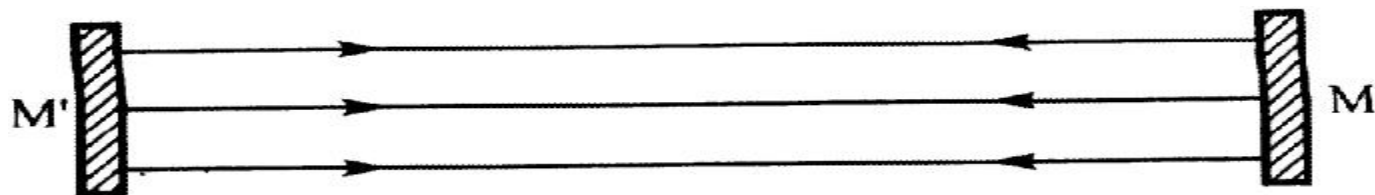
相同的频率，方向，偏振状态和位相。轴向光子数不断放大和振荡，雪崩式的放大过程 ——激光

2 稳定谐振腔结构

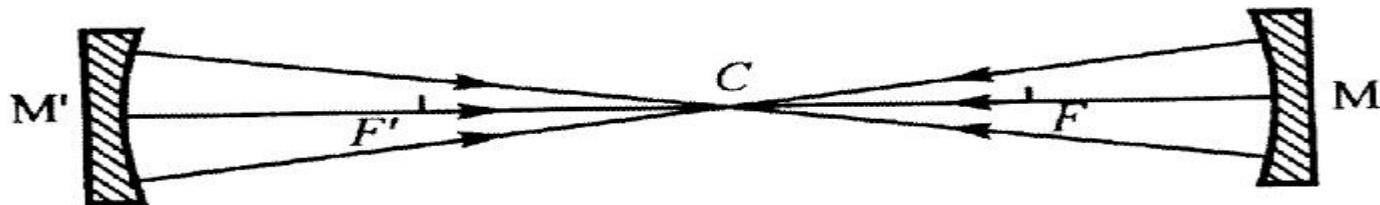


非稳定谐振腔结构

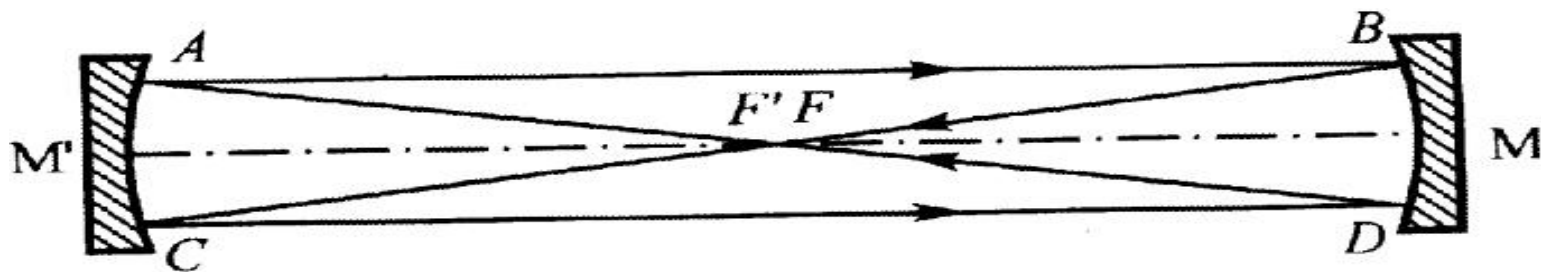
(1) 发布里—珀罗谐振腔（平行谐振腔）



(2) 同心谐振腔



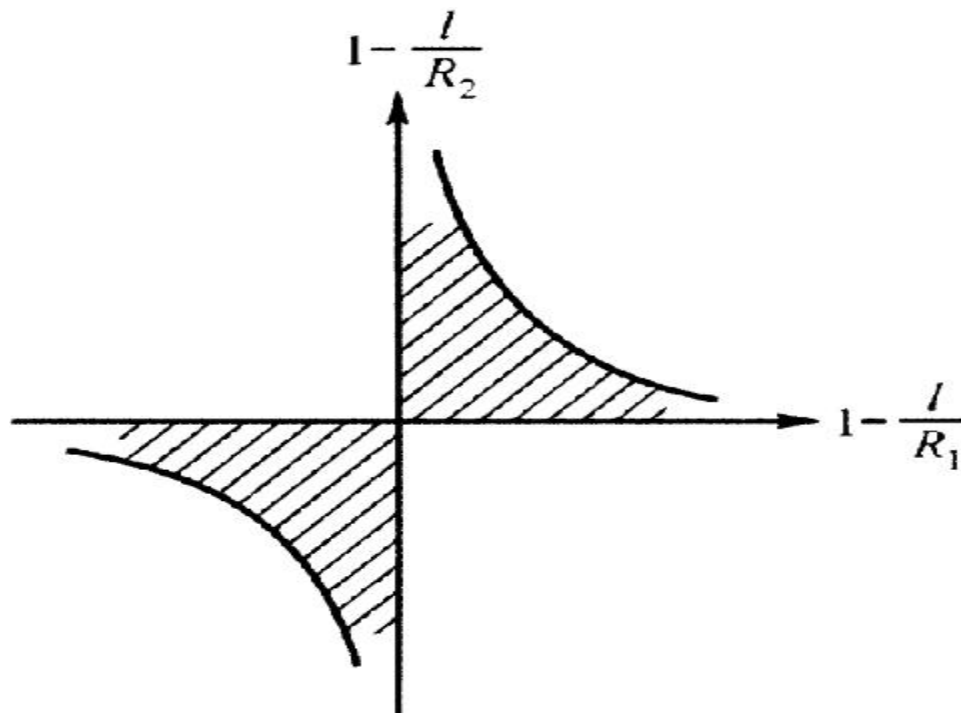
(3) 共焦谐振腔



稳定谐振腔的条件：

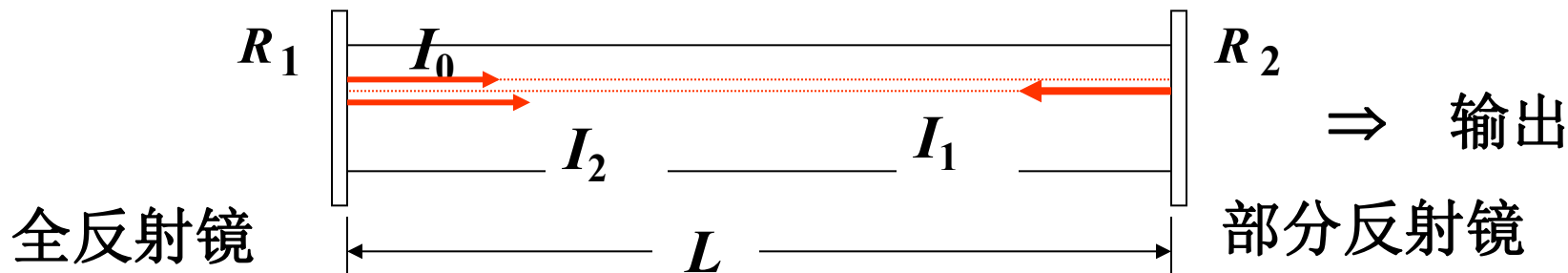
$$0 \leq \left(1 - \frac{l}{R_1}\right) \left(1 - \frac{l}{R_2}\right) \leq 1$$

R 为曲率半径， l 为腔长。



3 光振荡的阈值条件

考虑激光在两端反射镜处的损耗—阈值条件

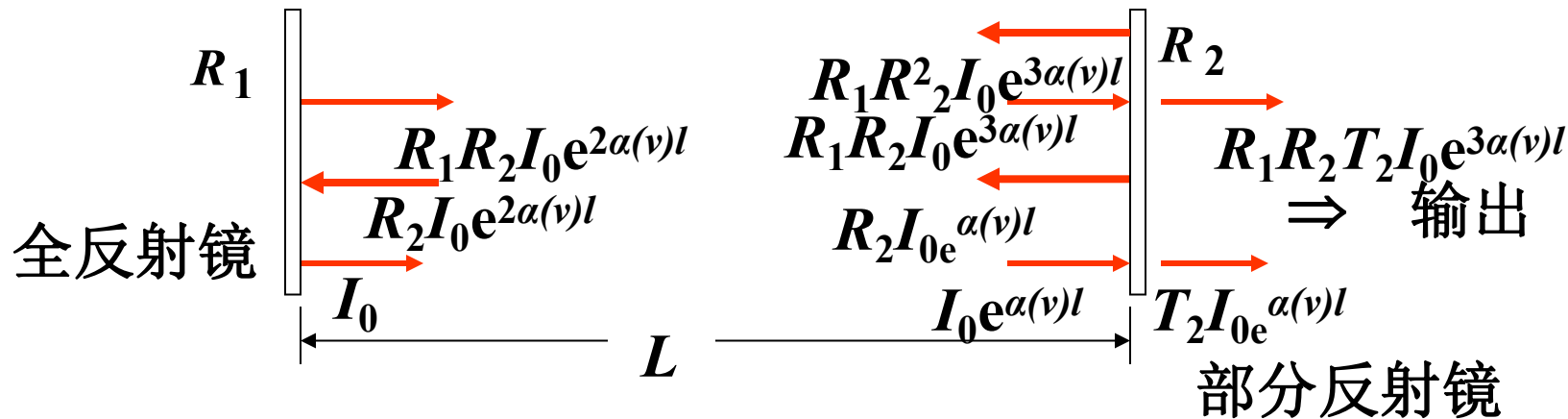


R_1 、 R_2 —左、右两端反射镜的反射率。

I_0 — 激光从左反射镜出发时的光强。

I_1 — 经过工作物质后，被右反射镜反射出发时的光强。

I_2 — 再经过工作物质，并被左反射镜反射出发时的光强。



显然 $I(\nu, l) = I_0 e^{\alpha(\nu)l}$

$\alpha(\nu) = \frac{1}{l} \ln \frac{I(\nu, l)}{I_0(\nu)}$ 增益系数

振荡必要条件: $R_1 R_2 e^{2\alpha(\nu)l} \geq 1$

阈值条件: $R_1 R_2 e^{2\alpha(\nu)l} = 1 \quad \alpha(\nu)l = \ln \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}},$

$\alpha(\nu) \equiv (n_2 - n_1) \frac{c^2 A_{21}}{8\pi\nu^2}$

粒子反转数达到一定数值, 增益系数才足够大, 有可能抵偿光的损耗, 产生光振荡。