第2章　激光器的工作原理

2. 1 光学谐振腔结构与稳定性

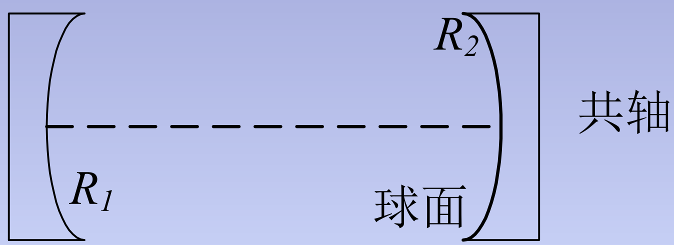
2.2 速率方程组与粒子数反转

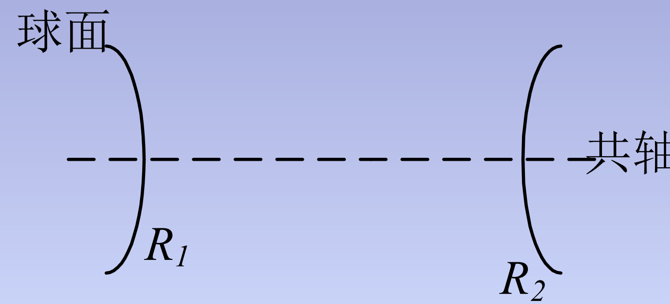
2.3 均匀增宽介质的增益系数和增益饱和

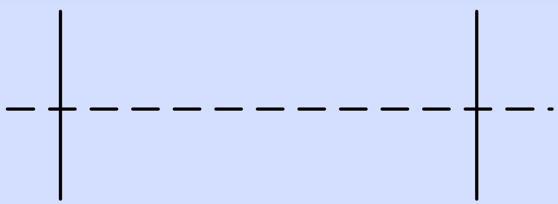
2.4 非均匀增宽介质增益饱和

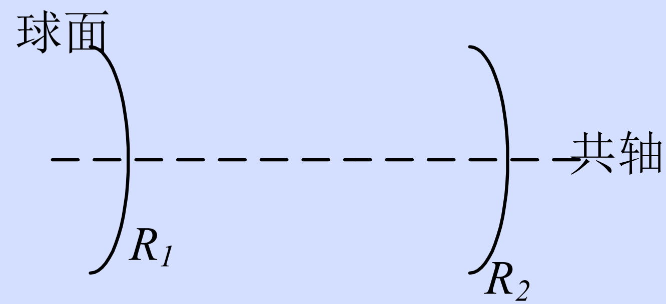
2.5 激光器的损耗与阈值条件

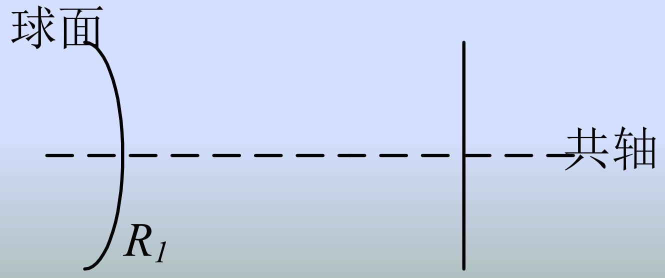
一. 共轴球面谐振腔的稳定性条件





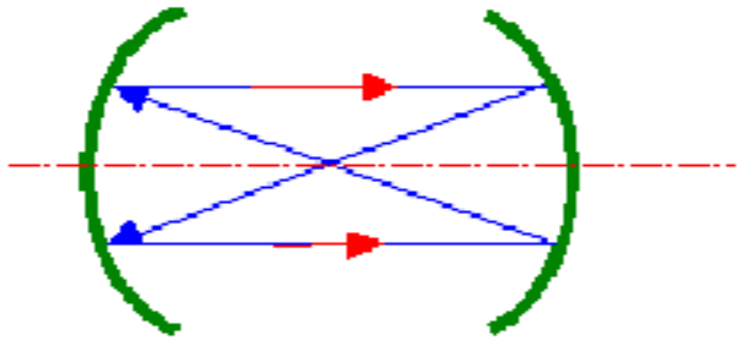




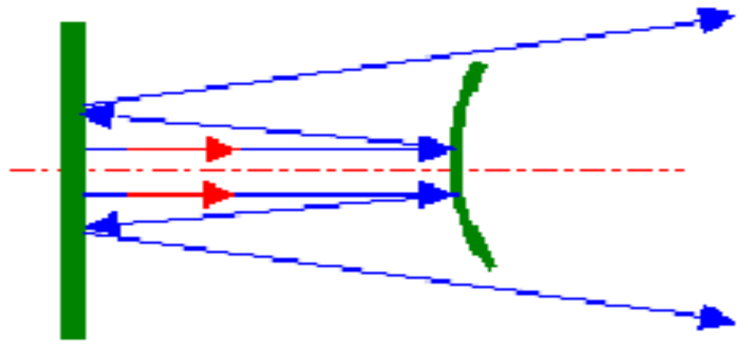


按几何损耗(几何反射逸出)分类

光腔 $\begin{cases} \text{稳定腔} \\ \text{临界腔} \\ \text{非稳腔} \end{cases}$



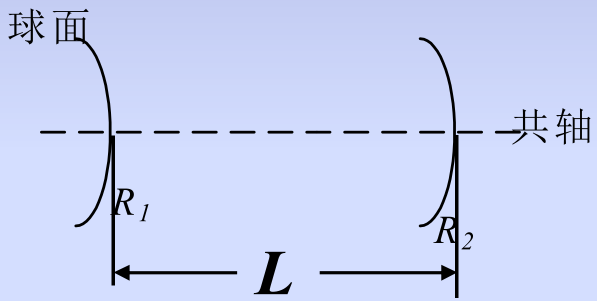
稳定腔



非稳定腔

一、共轴球面谐振腔的稳定性条件

$$g_1 = 1 - \frac{L}{R_1} \qquad g_2 = 1 - \frac{L}{R_2}$$



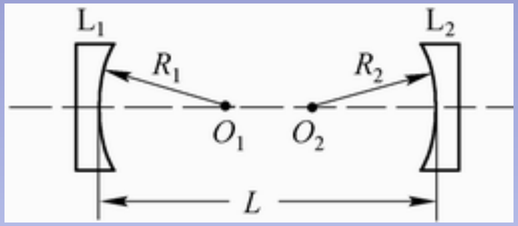
凹面向着腔内时(凹镜) $R_i > 0$，

凸面向着腔内时（凸镜）$R_i < 0$。

稳定腔: $0 < g_1 g_2 < 1$ $g_1 = g_2 = 0$

非稳腔: $g_1 g_2 > 1$ 或 $g_1 g_2 < 0$

临界腔: $g_1 g_2 = 1$ 或 $g_1 g_2=0$



共轴球面腔结构示意图

$$M=\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$$

$$A=-\left[\frac{2L}{R_1}-\left(1-\frac{2L}{R_1}\right)\left(1-\frac{2L}{R_2}\right)\right]$$

$$B=2L\left(1-\frac{L}{R_2}\right)$$

$$C=-\left[\frac{2}{R_1}+\frac{2}{R_2}\left(1-\frac{2L}{R_1}\right)\right]$$

$$D=1-\frac{2L}{R_2}$$

谢尔威斯特定理

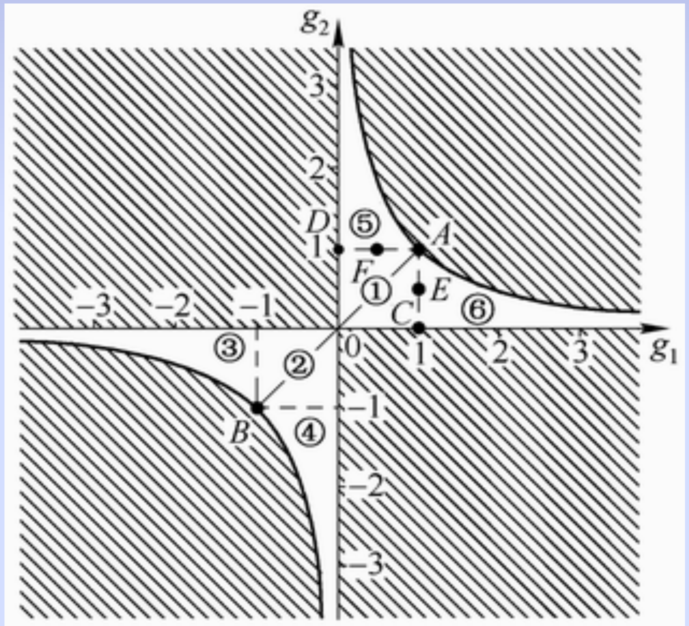
$$M_{nL}=\frac{1}{\sin\varphi}\begin{bmatrix} A\sin n\varphi-\sin(n-1)\varphi & B\sin n\varphi \\ C\sin n\varphi & D\sin n\varphi-\sin(n-1)\varphi \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{bmatrix}$$

$$\cos\varphi=\frac{A+D}{2}$$

$$\left|\frac{A+D}{2}\right|<1$$

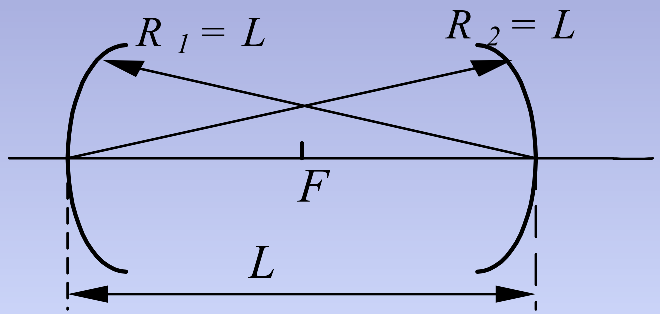
二、共轴球面谐振腔的稳定图及其分类

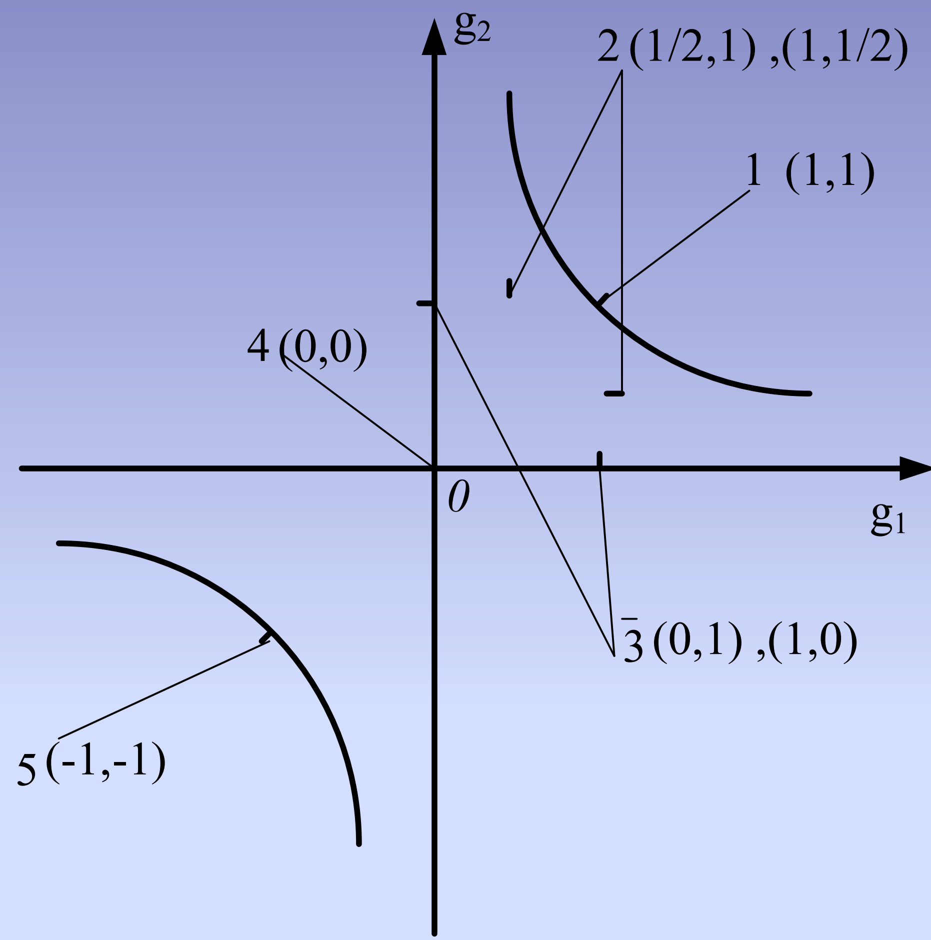
◆ 稳定图

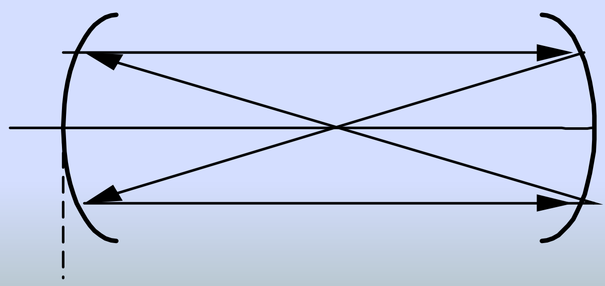


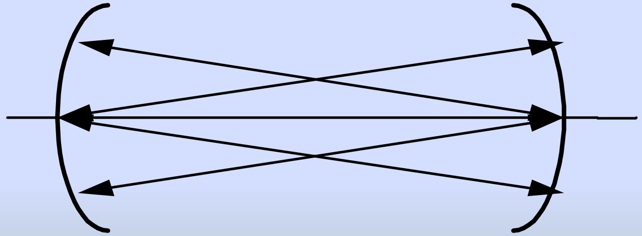
图(2-2) 共轴球面腔的稳定图

1. 对称共焦腔

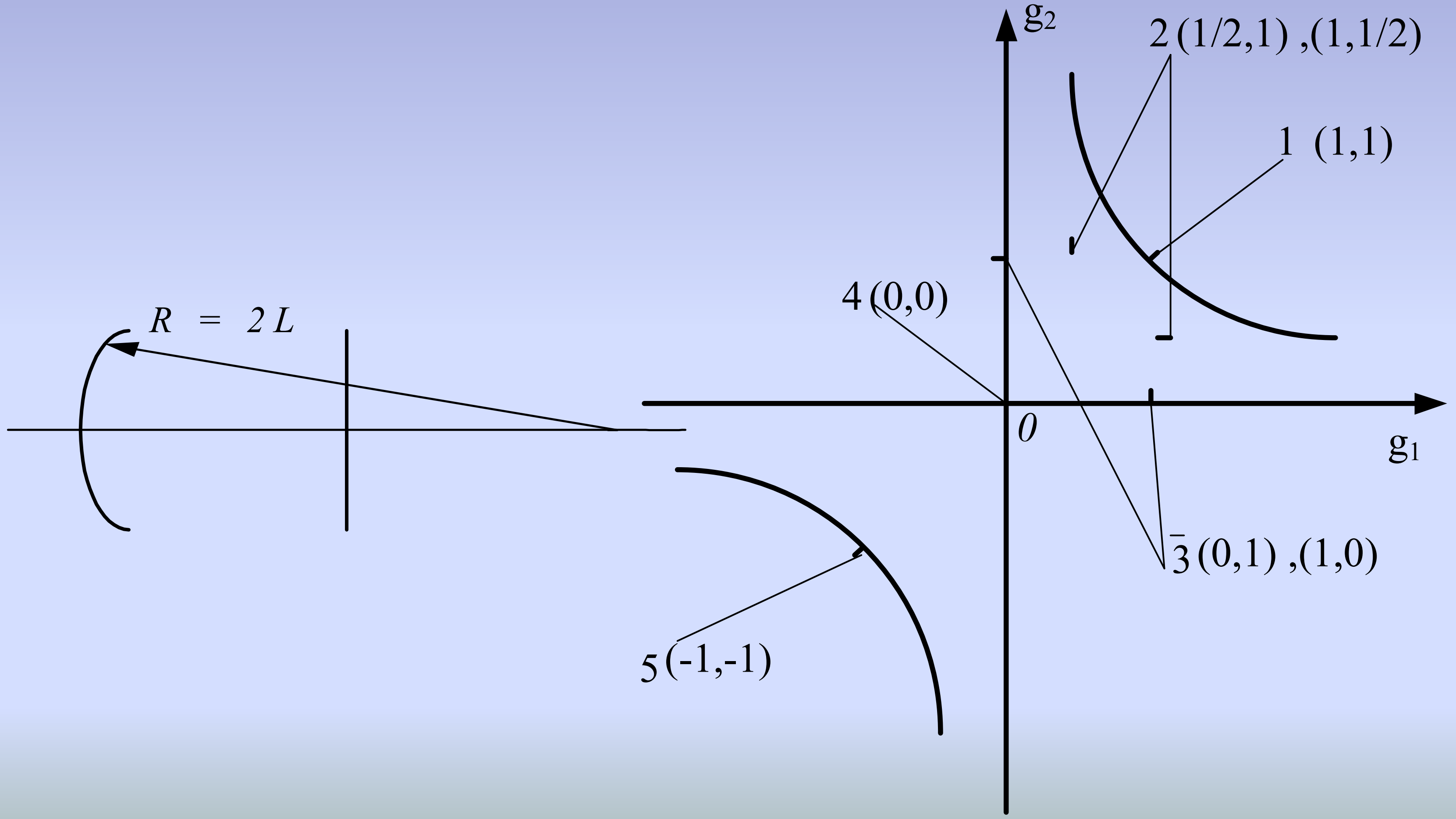




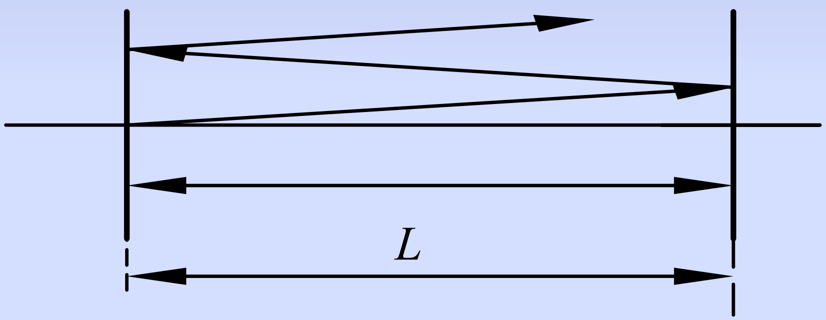


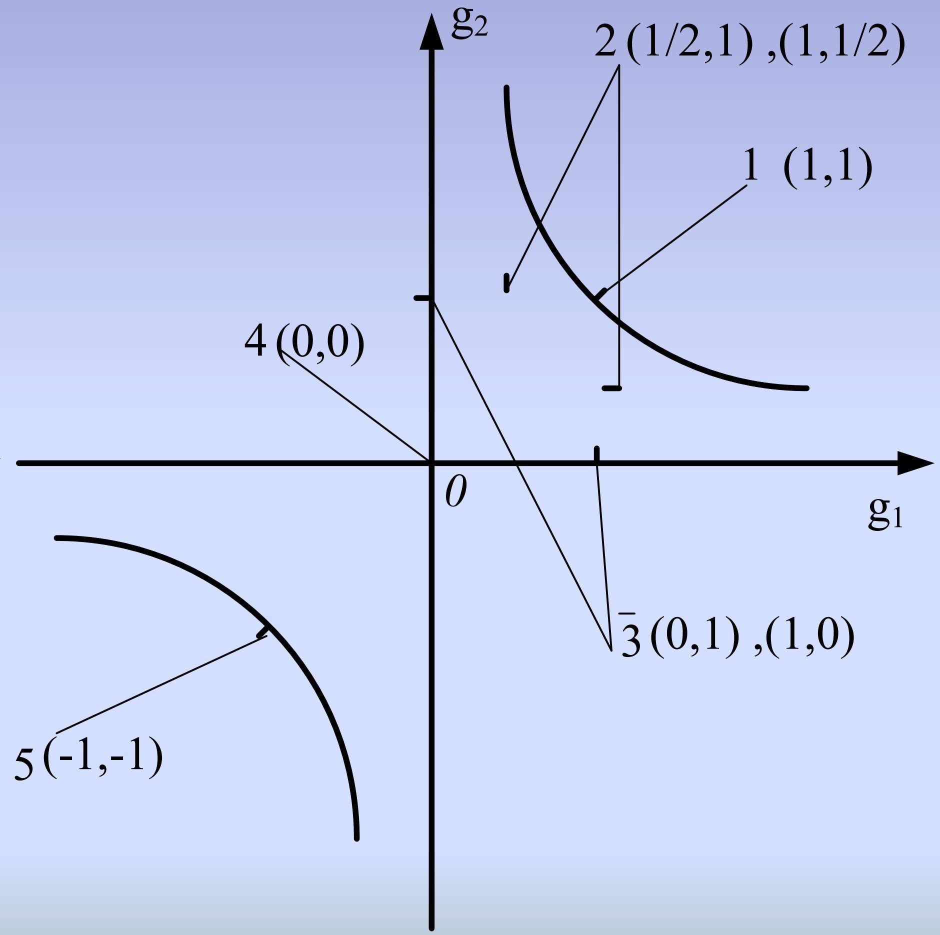


2. 半共焦腔：由共焦腔的任一个凹面反射镜与放在公共焦点处的平面镜组成



3. 平行平面腔：由两个平面反射镜组成的共轴谐振腔

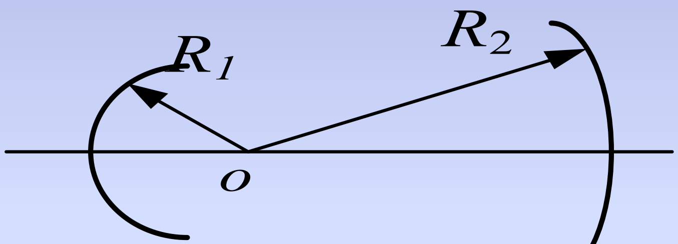


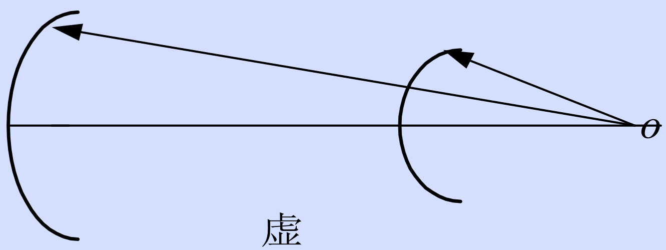


4. 共心腔：

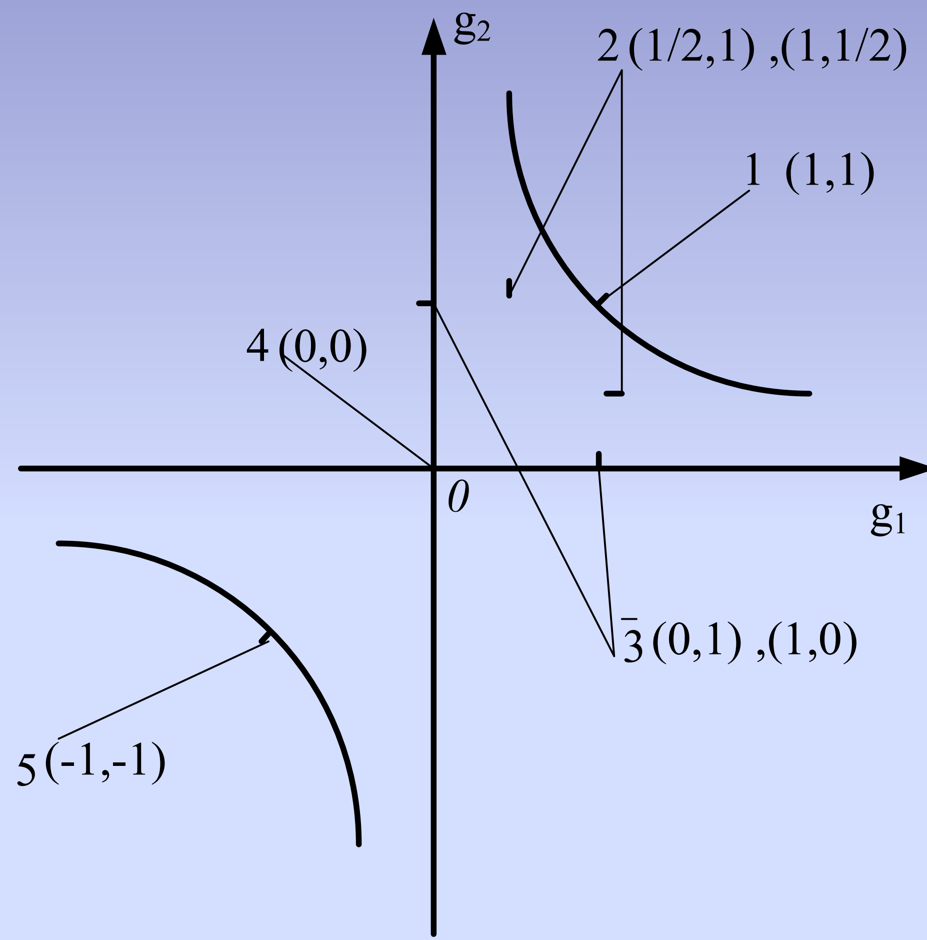
实共心腔：双凹腔

虚共心腔：凹凸腔



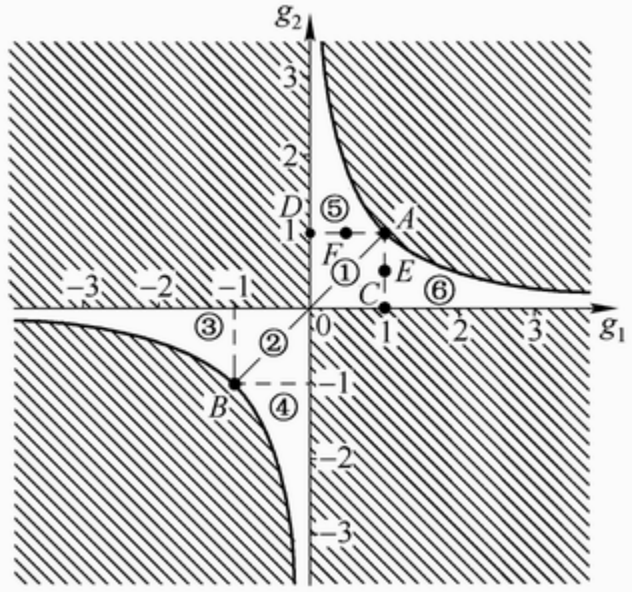


虚



三、 稳定图的应用

■ 制作一个腔长为L的对称稳定腔，反射镜曲率半径的取值范围如何确定？



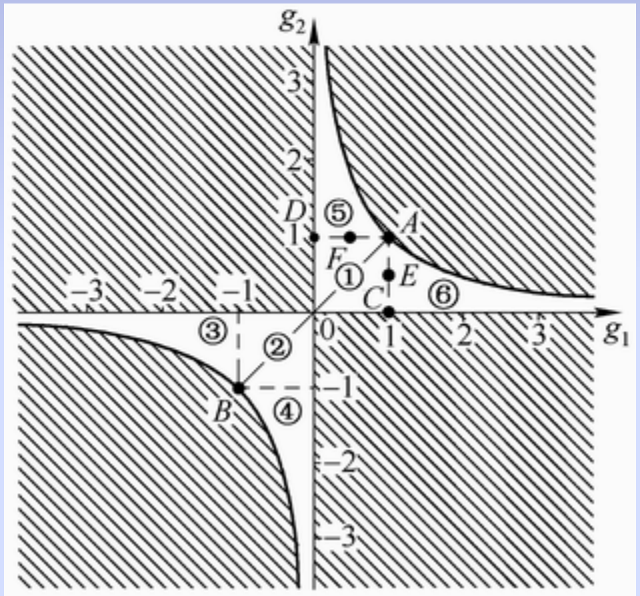
图(2-2) 共轴球面腔的稳定图

因此, 反射镜曲率半径的取值范围:

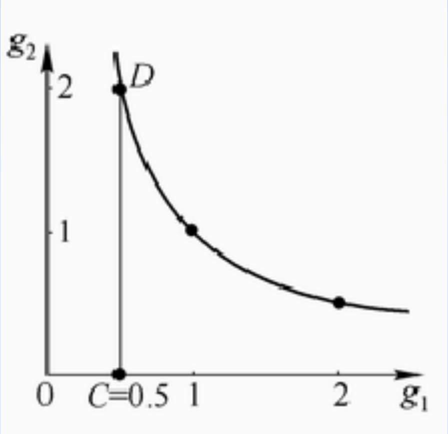
$$\frac{L}{2} < R < \infty$$

■ 给定稳定腔的一块反射镜，要选配另一块反射镜的曲率半径，其取值范围如何确定?

例如：$R_1 = 2L$ 则 $g_1 = 0.5$



图(2-2) 共轴球面腔的稳定图



例：某稳定腔两面反射镜的曲率半径分别R_1=-1m 及

R_2=1.5m 。

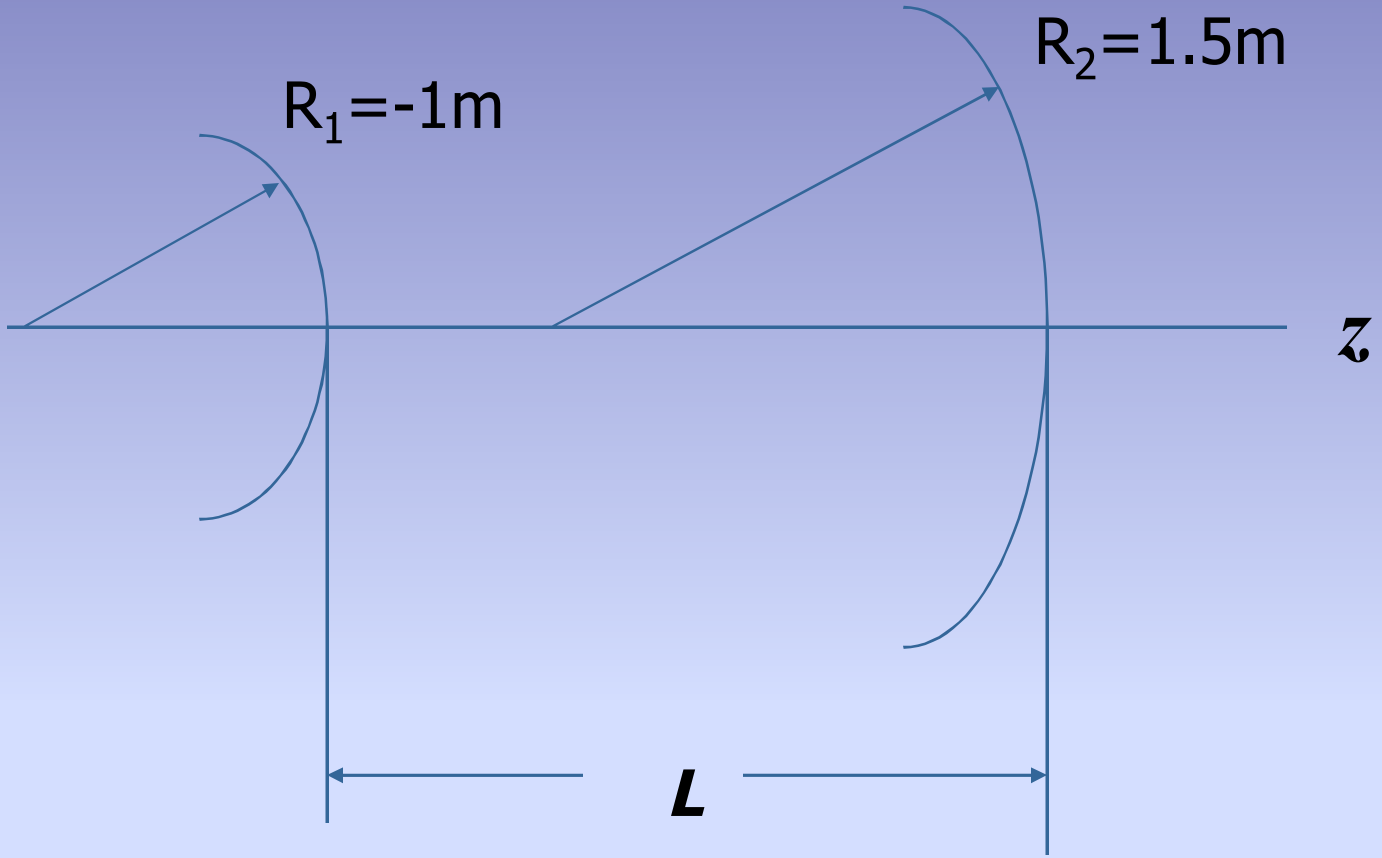
(1)这是哪一类型谐振腔?

(2)试确定腔长L的可能取值范围，并作出谐振腔的简单示意图。

(3)请作稳定图并指出它在图中的可能位置范围。

解.**(1)**$R_1<0$（凸镜）而$R_2>0$（凹镜）且稳定，是凹凸稳定腔。

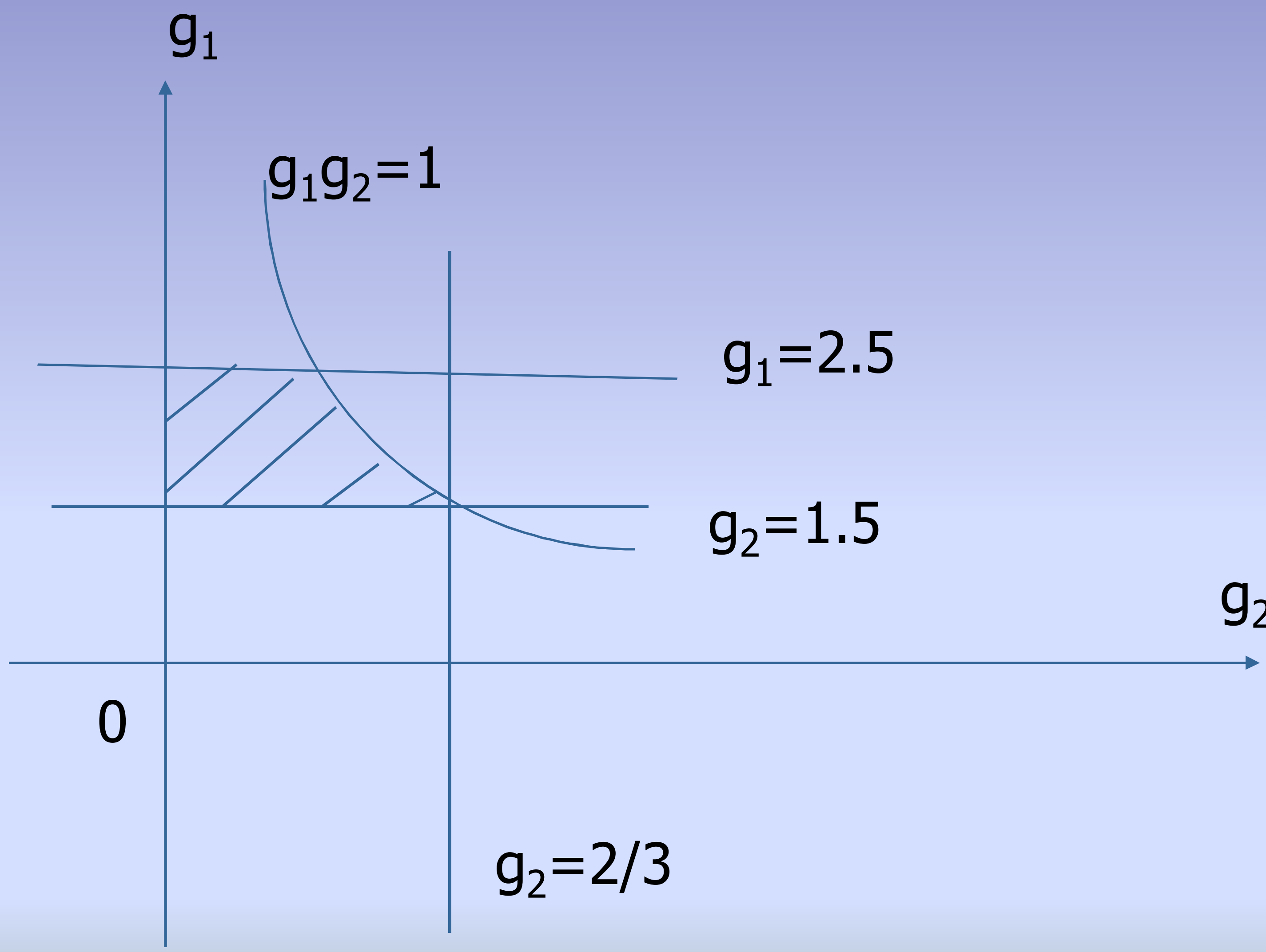
（2）腔长取值范围为 $\mathbf{0.5}\boldsymbol{m}<\boldsymbol{L}<\mathbf{1.5}\boldsymbol{m}$


R2=1.5m
R1=-1m
z
L

(3)把腔长取值范围 $0.5m < L < 1.5m$ 分别代入 g_1 和 g_2 的表达式可得

和

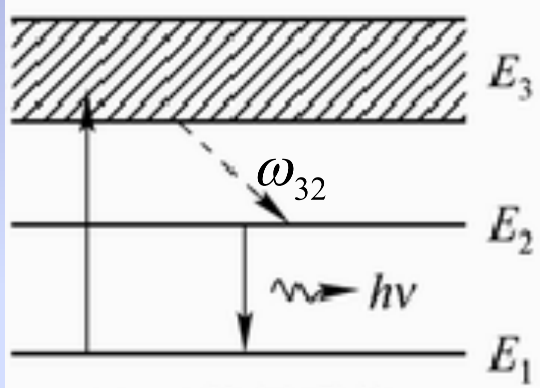
$$1.5 < g_1 < 2.5 \qquad 0 < g_2 < 2/3$$



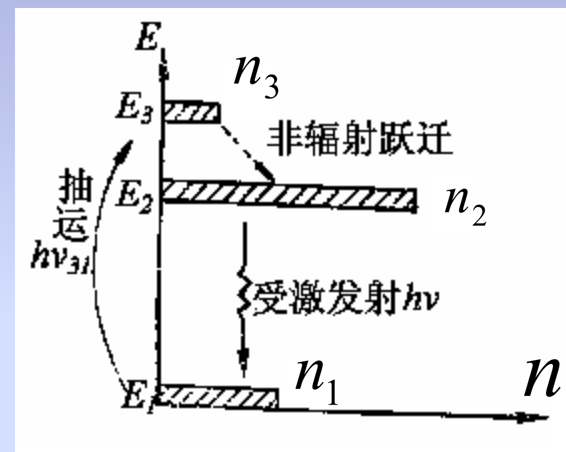
2.2. 速率方程组与粒子数反转

一、三能级系统和四能级系统

■ 三能级系统

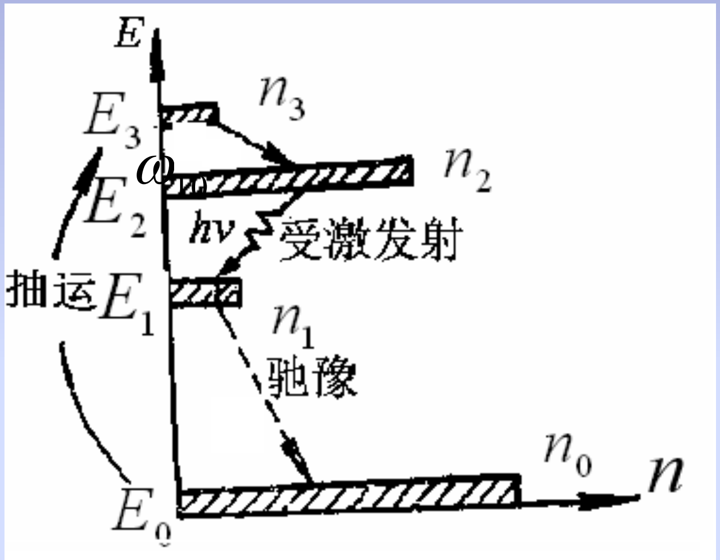


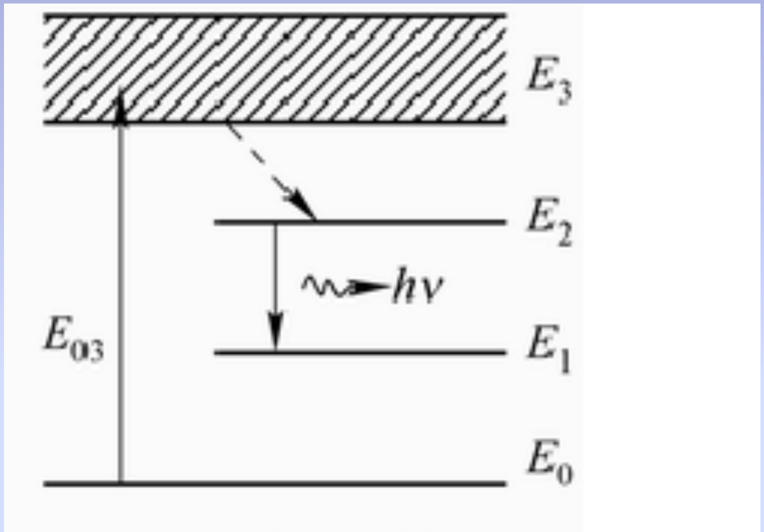
(a) 三能级系统



激光的下能级为基态，不易实现粒子数反转。

■ 四能级系统

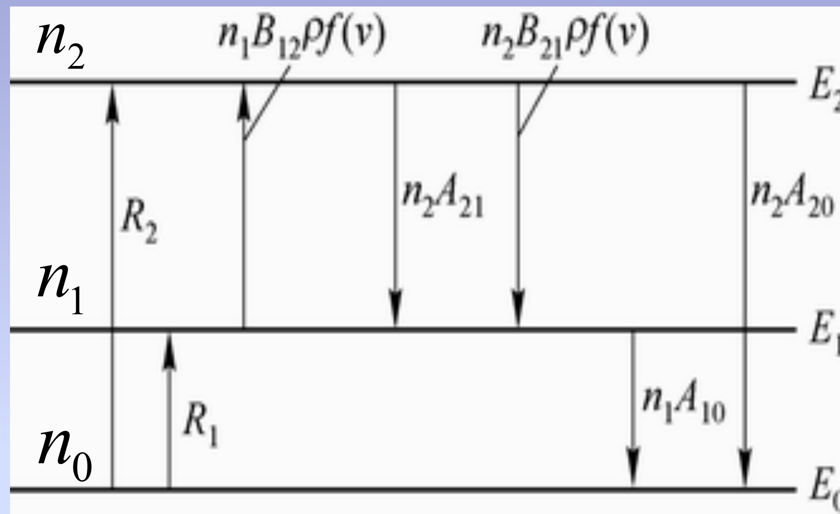




(b) 四能级系统

二. 速率方程组

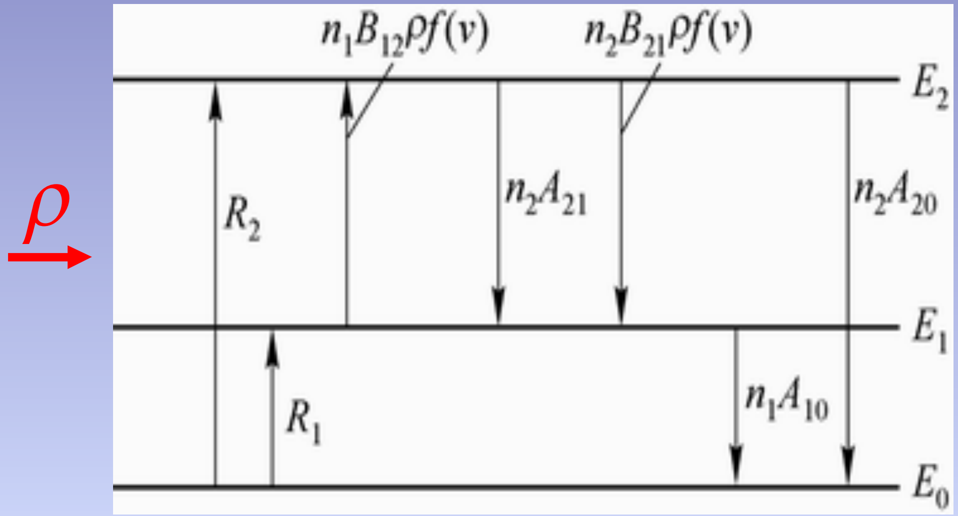
ρ



图(2-5)简化的四能级图

$$\frac{dn_2}{dt} = R_2 + n_1W_{12} - n_2A_{21} - n_2A_{20} - n_2W_{21}$$

$$= R_2 + n_1B_{12}\rho f(v) - n_2A_{21} - n_2A_{20} - n_2B_{21}\rho f(v)$$



图(2-5)简化的四能级图

$$\frac{dn_1}{dt}=R_1+n_2A_{21}+n_2W_{21}-n_1W_{12}-n_1A_{10}$$

$$=R_1+n_2A_{21}+n_2B_{21}\rho f(v)-n_1B_{12}\rho f(v)-n_1A_{10}$$

$$n_0+n_1+n_2=n$$

速率方程组

$$\frac{dn_2}{dt} = R_2 + n_1 B_{12} \rho f(v) - n_2 A_{21} - n_2 A_{20} - n_2 B_{21} \rho f(v)$$

$$\frac{dn_1}{dt} = R_1 + n_2 A_{21} + n_2 B_{21} \rho f(v) - n_1 B_{12} \rho f(v) - n_1 A_{10}$$

$$n = n_0 + n_1 + n_2$$

三、 稳态工作时的粒子数密度反转分布

$$\frac{dn_0}{dt}=\frac{dn_1}{dt}=\frac{dn_2}{dt}=0$$

$$n_1=(R_1+R_2)\tau_1$$

$$n_2=\frac{R_2\tau_2+(R_1+R_2)\tau_1\tau_2B_{21}\rho f(\nu)}{1+\tau_2B_{21}\rho f(\nu)}$$

激光上下能级粒子数密度反转分布

$$\Delta n = n_2 - n_1$$

$$= \frac{R_2\tau_2 - (R_1 + R_2)\tau_1}{1+\tau_2 B_{21}\rho f(v)}$$

$$= \frac{\Delta n^0}{1+\tau_2 B_{21}\rho f(v)}$$

τ_1 , τ_2 分别为上、下能级的寿命

四、小信号工作时的粒子数密度反转分布

$$\Delta n^0 = R_2\tau_2 - (R_1 + R_2)\tau_1$$

Δn^0称作小信号工作时反转粒子数密度

五、 均匀增宽型介质的粒子数密度反转分布

$$f(v) = \frac{\Delta v/2\pi}{(v - v_0)^2 + (\Delta v/2)^2}$$

$$f(v_0) = \frac{2}{\pi \Delta v}$$

饱和光强 $$I_s = \frac{\pi c \Delta v}{2\mu B_{21}\tau_2}$$

氦氖激光器: I_s =0.1W/mm^2 ～0.3W/mm^2

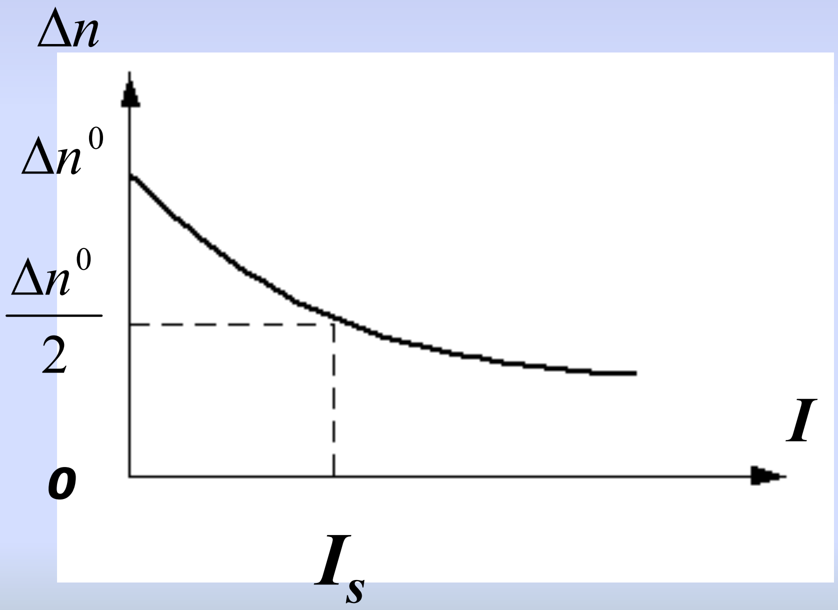
二氧化碳激光器: I_s = 1~2 W/mm^2

均匀增宽型介质的粒子数密度反转分布

$$\Delta n = \frac{\Delta n^0}{1+\frac{I}{I_s}\frac{f(\nu)}{f(\nu_0)}} = \begin{cases} \dfrac{\Delta n^0}{1+I/I_s} & \nu=\nu_0 \\[2ex] \dfrac{[(\nu-\nu_0)^2+(\Delta\nu/2)^2]\Delta n^0}{(\nu-\nu_0)^2+(1+I/I_s)(\Delta\nu/2)^2} & \nu\neq\nu_0 \end{cases}$$

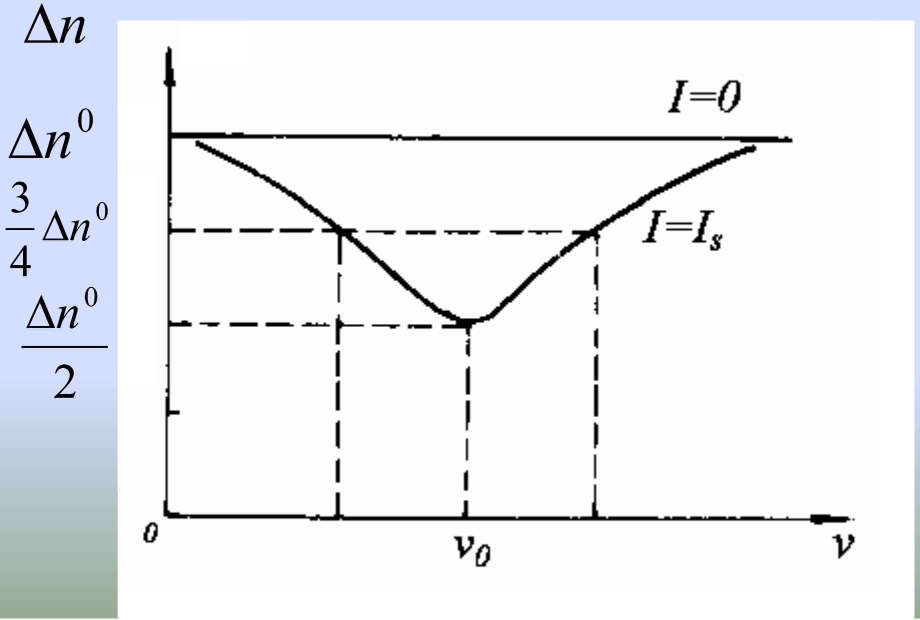
六、均匀增宽型介质粒子数密度反转分布的饱和效应

饱和效应：粒子数密度反转分布值Δn随光强的增加而减小的现象



△n与入射光频率v的关系

$$\Delta n=\frac{\Delta n^0}{1+\frac{I}{I_s}\frac{f(v)}{f(v_0)}}=\begin{cases}\dfrac{\Delta n^0}{1+I/I_s} & v=v_0\\[2ex]\dfrac{[(v-v_0)^2+(\Delta v/2)^2]\Delta n^0}{(v-v_0)^2+(1+I/I_s)(\Delta v/2)^2} & v\neq v_0\end{cases}$$



$$I = I_S$$

Δn \ 频率 ν	ν_0	$\nu_0 \pm \frac{\Delta\nu}{2}$	$\nu_0 \pm (1+\frac{I}{I_s})^{1/2}\frac{\Delta\nu}{2}$	$\nu_0 \pm \Delta\nu$
Δn	$\frac{\Delta n^0}{2}$	$\frac{2}{3}\Delta n^0$	$\frac{3}{4}\Delta n^0$	$\frac{5}{6}\Delta n^0$
$\Delta n^0 - \Delta n$	$\frac{\Delta n^0}{2}$	$\frac{1}{3}\Delta n^0$	$\frac{1}{4}\Delta n^0$	$\frac{1}{6}\Delta n^0$

对介质有影响的光波的频率范围：或使介质产生饱和作用的频率范围

$$\nu_0 - \nu = \pm\sqrt{1+\frac{I}{I_s}}\,\frac{\Delta\nu}{2}$$

2.3 均匀增宽介质的增益系数和增益饱和

一、均匀增宽介质的增益系数

$$G(v)=\Delta n B_{21}\frac{\mu}{c}f(v)hv$$

$$G(v)=\frac{\Delta n^{0}}{1+\frac{I}{I_s}\frac{f(v)}{f(v_0)}}B_{21}\frac{\mu}{c}f(v)hv$$

小信号I<<I_s增益系数 $G^0(v)=\Delta n^0 B_{21}\frac{\mu}{c}f(v)hv$

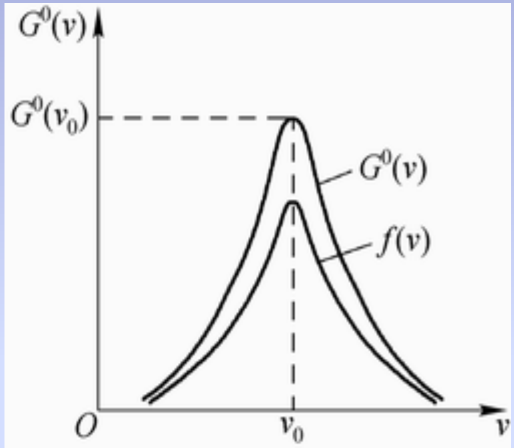


图2-7 均匀增宽介质小信号增益系数

中心频率v_0处小信号I<<I_s增益系数

$$G^0(v_0)=\Delta n^0 B_{21}\frac{\mu}{c}\frac{2}{\pi\Delta v}hv_0$$

$$G(v)=\frac{\Delta n^{0}}{1+\frac{I}{I_s}\frac{f(v)}{f(v_0)}}B_{21}\frac{\mu}{c}f(v)hv$$

均匀增宽介质的增益系数

$$G(v)=\frac{G^{0}(v)}{1+\frac{I}{I_s}\frac{f(v)}{f(v_0)}}$$

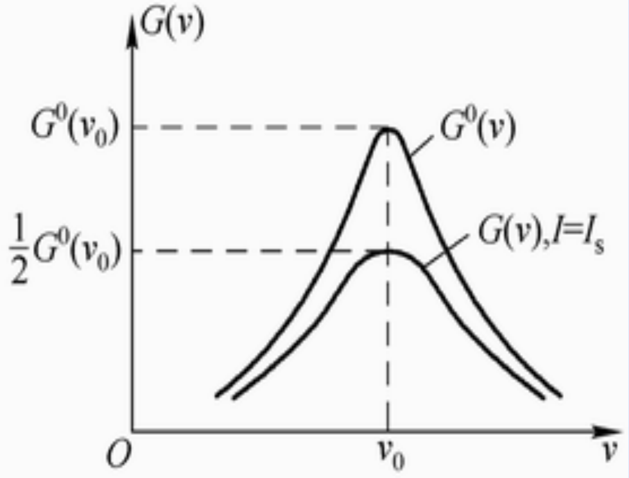
二、 均匀增宽介质的增益饱和

饱和效应：随着I 的增大, G 和△n不增反降的现象

$$G(v)=\frac{G^{0}(v)}{1+\frac{I}{I_{s}}\frac{f(v)}{f(v_{0})}}$$

■ 介质对频率ν_0，光强为I的光波的增益系数

$$G(\nu_0)=\frac{G^0(\nu_0)}{1+\frac{I}{I_s}\frac{f(\nu_0)}{f(\nu_0)}}=\frac{G^0(\nu_0)}{1+\frac{I}{I_s}}$$



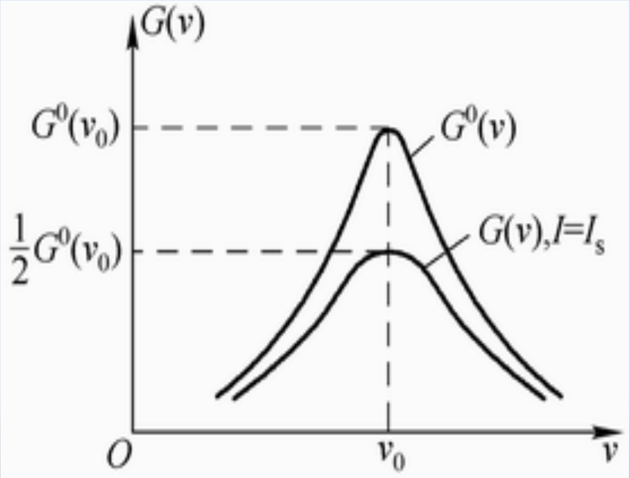
图(2-8) 均匀增宽型增益饱和曲线

■ 介质对频率为 $\nu \neq \nu_0$、光强为 I 的光波的增益系数

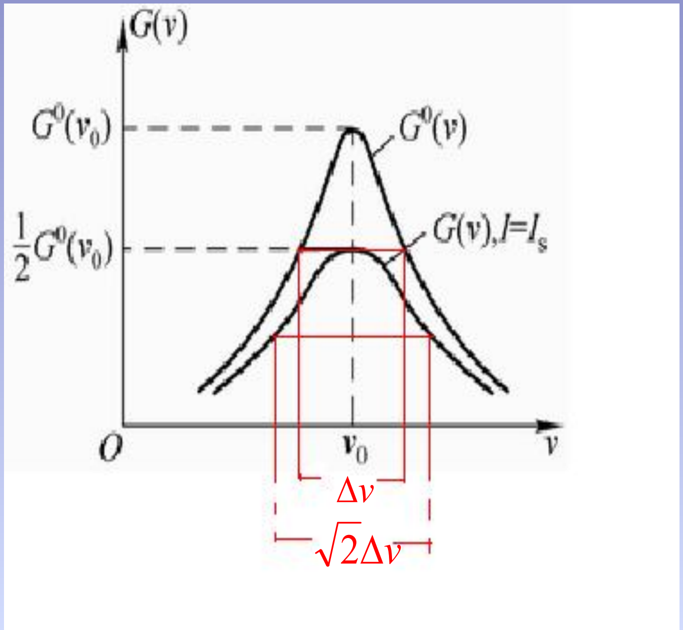
$$G(\nu)=\frac{G^0(\nu)}{1+\frac{I}{I_s}\frac{f(\nu)}{f(\nu_0)}}=\frac{[(\nu-\nu_0)^2+(\Delta\nu/2)^2]G^0(\nu)}{(\nu-\nu_0)^2+(1+\frac{I}{I_s})(\frac{\Delta\nu}{2})^2}$$

$$=\frac{(\Delta\nu/2)^2}{(\nu-\nu_0)^2+(1+\frac{I}{I_s})(\frac{\Delta\nu}{2})^2}G^0(\nu_0)$$

$$G(\nu)<G^0(\nu)<G^0(\nu_0)$$

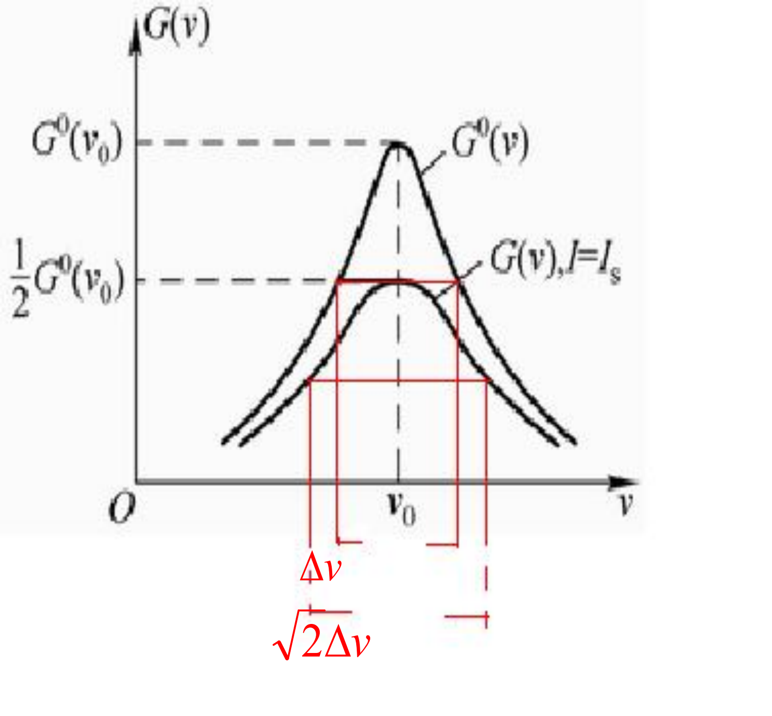


图(2-8) 均匀增宽型增益饱和曲线



$$I = I_s$$

频率 ν / 增益系数 $G(\nu)$	ν_0	$\nu_0 \pm \frac{\Delta\nu}{2}$	$\nu_0 \pm (1+\frac{I}{I_s})^{1/2}\frac{\Delta\nu}{2}$	$\nu_0 \pm \Delta\nu$
$G(\nu)$	$\frac{1}{2}G^0(\nu_0)$	$\frac{1}{3}G^0(\nu_0)=\frac{2}{3}G^0(\nu)$	$\frac{1}{4}G^0(\nu_0)=\frac{3}{4}G^0(\nu)$	$\frac{1}{6}G^0(\nu_0)=\frac{5}{6}G^0(\nu)$
$G^0(\nu)-G(\nu)$	$\frac{1}{2}G^0(\nu_0)$	$\frac{1}{3}G^0(\nu)=\frac{1}{6}G^0(\nu_0)$	$\frac{1}{4}G^0(\nu)=\frac{1}{12}G^0(\nu_0)$	$\frac{1}{6}G^0(\nu)=\frac{1}{30}G^0(\nu_0)$



$I \sim 0$，小信号增益系数 $G^0(\nu)$ 的宽度为 $\Delta\nu$ ；

$I \sim I_s$， 增益系数 $G(\nu)$ 的宽度为 $\sqrt{2}\cdot\Delta\nu > \Delta\nu$

■ 频率为 ν、光强为I的强光作用下增益介质对另一小信号$i(\nu_i)$（弱光）的增益系数G（$\mathrm{v_i}$）。

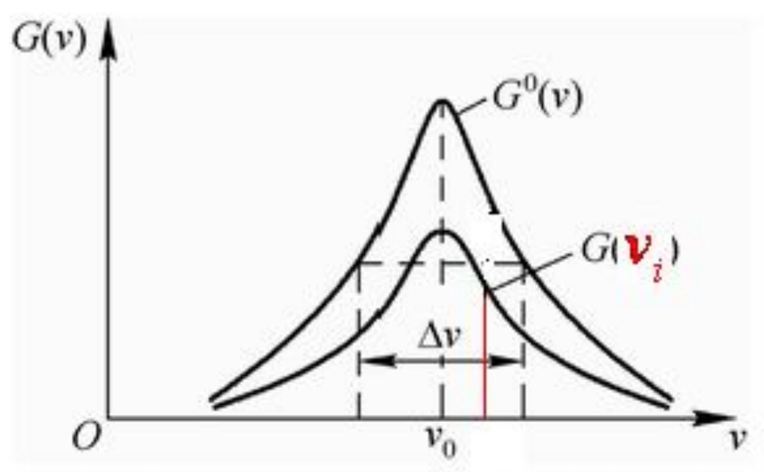
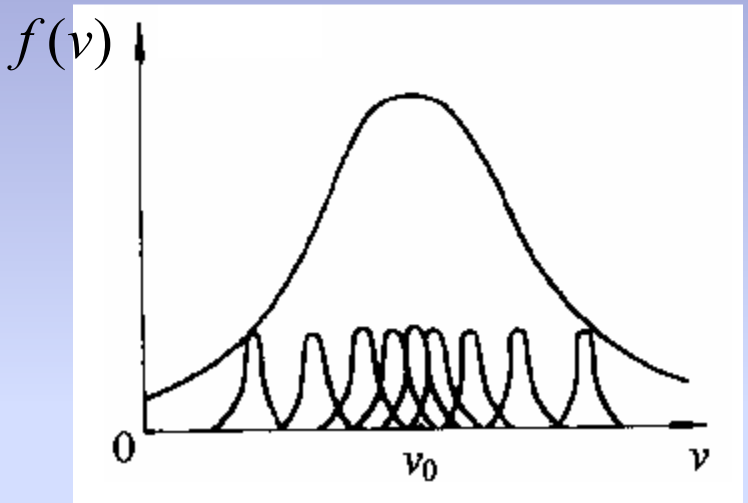


图2-9 小信号 $i(\nu_i)$增益饱和曲线

2.4 非均匀增宽介质的增益饱和



$$\Delta n = n_2 - n_1 = \frac{\Delta n^0}{1 + \tau_2 B_{21} \rho f(v)}$$

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

一、小信号时的粒子数密度反转分布值

E_2能级上：$\upsilon_1 - \upsilon_1 + d\upsilon_1$ 粒子数密度

$$n_2^0(\upsilon_1)d\upsilon_1 = n_2^0\left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{1/2}\exp\left(-\frac{m\upsilon_1^2}{2kT}\right)\cdot d\upsilon_1$$

E_1能级上：$\upsilon_1 - \upsilon_1 + d\upsilon_1$ 粒子数密度

$$n_1^0(\upsilon_1)d\upsilon_1 = n_1^0\left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{1/2}\exp\left(-\frac{m\upsilon_1^2}{2kT}\right)\cdot d\upsilon_1$$

$\upsilon_1 - \upsilon_1 + d\upsilon_1$ 粒子数密度反转分布值

$$\Delta n^0(\upsilon_1)d\upsilon_1 = n_2^0(\upsilon_1)d\upsilon_1 - n_1^0(\upsilon_1)d\upsilon_1$$

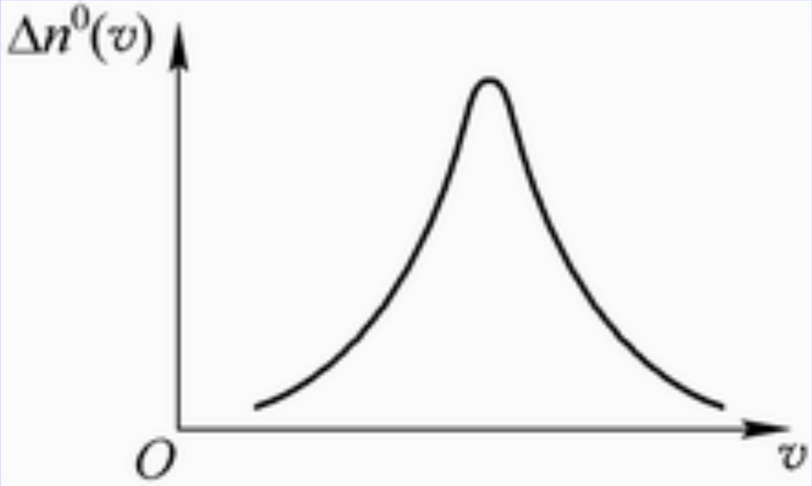
$$= \Delta n^0 \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{m\upsilon_1^2}{2kT}\right) \cdot d\upsilon_1$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Delta n^0(\upsilon_1)d\upsilon_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} \Delta n^0 \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{m\upsilon_1^2}{2kT}\right) \cdot d\upsilon_1$$

$$= \Delta n^0$$

单位速度间隔内粒子数密度反转分布值

$$\Delta n^0(v_1)=\Delta n^0\left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{1/2}\exp\left(-\frac{mv_1^2}{2kT}\right)$$



图(2-10) $\Delta n^0(v)-v$ 曲线

$$\nu_1 = \nu_0\left(1+\frac{\upsilon_1}{c}\right) \Rightarrow \upsilon_1 = (\nu_1 - \nu_0)\frac{c}{\nu_0}$$

$$d\nu_1 = \frac{\nu_0}{c}d\upsilon_1 \Rightarrow d\upsilon_1 = \frac{c}{\nu_0}d\nu_1$$

辐射 $\nu_1 - \nu_1 + d\nu_1$ 光波的粒子数密度反转分布值

$$\Delta n^0(\nu_1)d\nu_1 = \Delta n^0\left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{1/2}\exp\left[-\frac{mc^2(\nu_1-\nu_0)^2}{2kT\nu_0^2}\right]\frac{c}{\nu_0}d\nu_1$$

$$\Delta n^0(\nu_1)d\nu_1 = \Delta n^0\left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{1/2}\exp\left[-\frac{mc^2(\nu_1-\nu_0)^2}{2kT\nu_0^2}\right]\frac{c}{\nu_0}d\nu_1$$

$$= \Delta n^0 f_D(\nu_1)d\nu_1$$

单位频率间隔内的粒子数密度反转分布值

$$\Delta n^0(\nu_1) = \Delta n^0 f_D(\nu_1)$$

二、小信号时的增益系数

$\Delta n^0(\nu_1)\cdot \mathrm{d}\nu_1$ 对增益系数的贡献：

$$\mathrm{d}G_D^0(\nu)=\Delta n^0(\nu_1)\cdot \mathrm{d}\nu_1\cdot B_{21}\frac{\mu}{c}f(\nu)h\nu$$

$$=\Delta n^0 f_D(\nu_1)\mathrm{d}\nu_1 B_{21}\frac{\mu}{c}h\nu\cdot f(\nu)$$

介质的小信号增益系数

$$G_D^0(\nu)=\int_0^\infty \mathrm{d}G_D^0(\nu)=\int_0^\infty \Delta n^0 f_D(\nu_1)\mathrm{d}\nu_1 B_{21}\frac{\mu}{c}h\nu\cdot f(\nu)$$

$$G_D^0(v)=\int_0^\infty \Delta n^0 f_D(v_1)\mathrm{d}v_1 B_{21}\frac{\mu}{c}hv\cdot f(v)$$

$$=\Delta n^0 B_{21}\frac{\mu}{c}hv\frac{\Delta v}{2\pi}\int_0^\infty f_D(v_1)\frac{\mathrm{d}v_1}{(v-v_1)^2+(\Delta v/2)^2}$$

$$=\Delta n^0 B_{21}\frac{\mu}{c}hv\cdot f_D(v)\cdot\int_0^\infty \frac{\Delta v}{2\pi}\frac{\mathrm{d}v_1}{(v-v_1)^2+(\Delta v/2)^2}$$

$$=\Delta n^0 B_{21}\frac{\mu}{c}hv\cdot f_D(v)$$

—非均匀增宽介质的小信号增益系数

三、稳态时粒子数密度反转分布

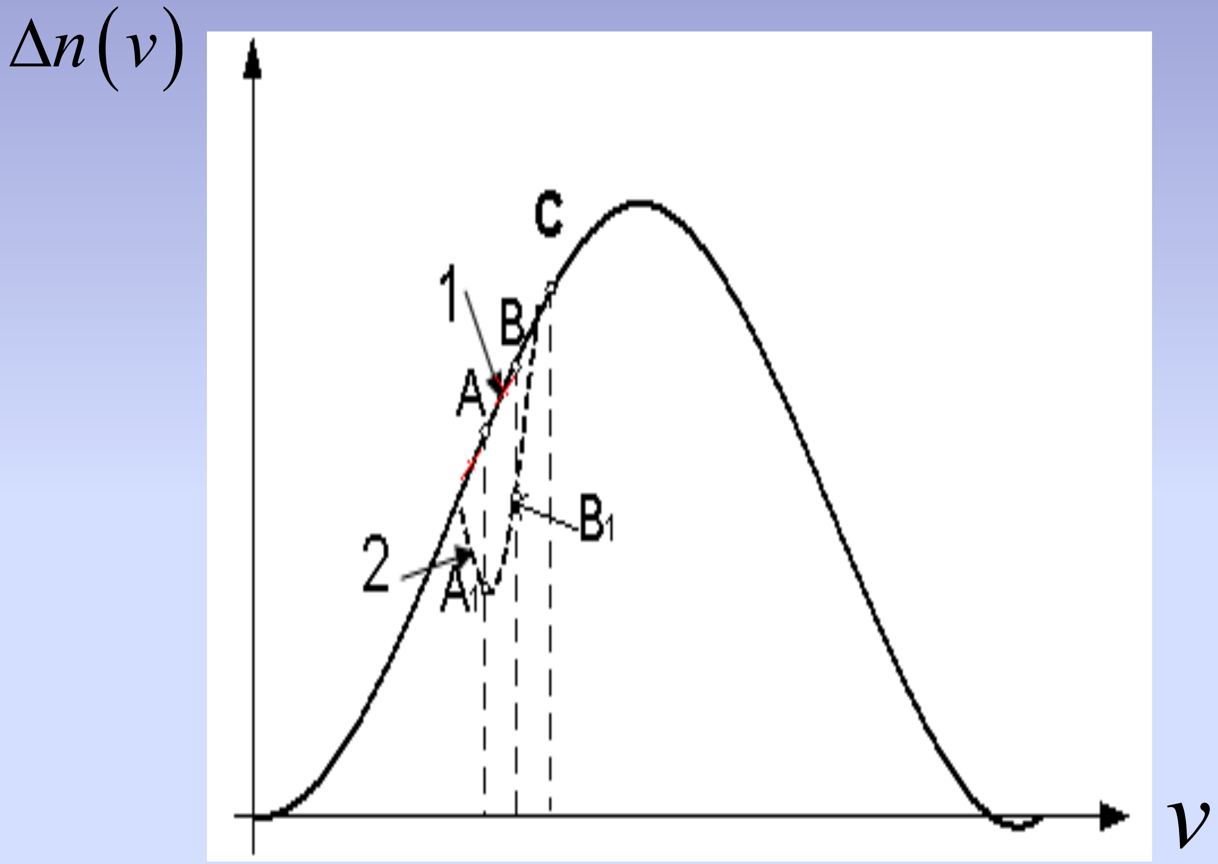
频率为 ν_1、光强为 I 的光波在其中传播时

$$\Delta n(\nu_1) = \frac{\Delta n^0(\nu_1)}{1+I/I_s} = \frac{\Delta n^0}{1+I/I_s} f_D(\nu_1)$$

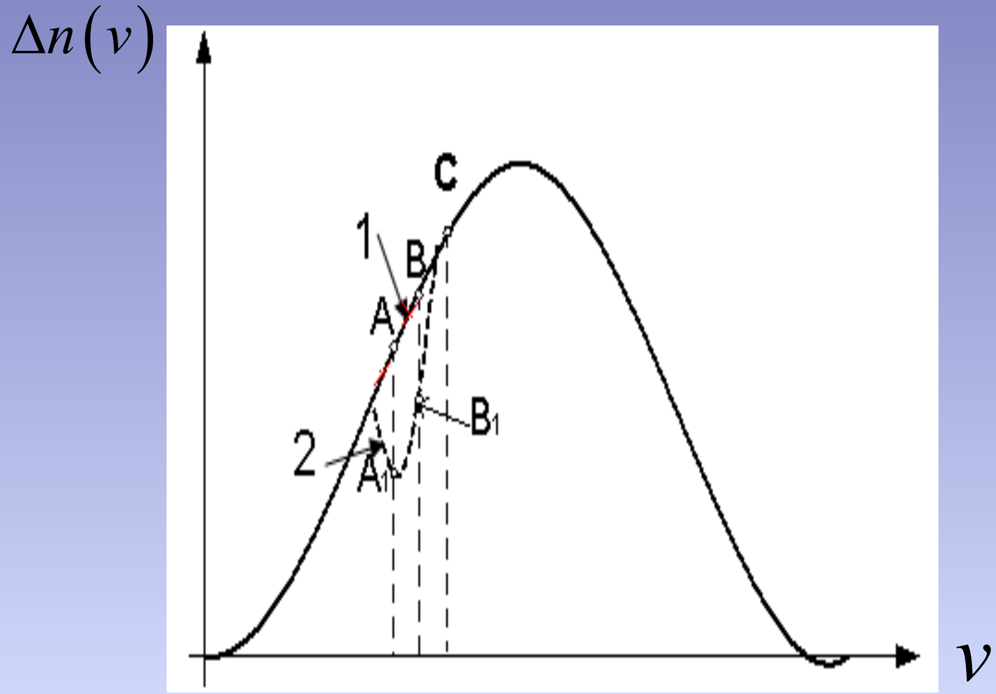
$$\Delta n(\nu) = \frac{\Delta n^0(\nu)}{1+\frac{I}{I_s}\frac{f(\nu_1)}{f(\nu)}} = \frac{\Delta n^0}{1+\frac{I}{I_s}\frac{f(\nu_1)}{f(\nu)}} f_D(\nu)$$

$$= \frac{(\nu_1-\nu)^2+(\frac{\Delta\nu}{2})^2}{(\nu_1-\nu)^2+(1+\frac{I}{I_s})(\frac{\Delta\nu}{2})^2} \cdot \Delta n^0 f_D(\nu)$$

反转粒子数 $\Delta n(\nu)$ 烧孔效应



图(2-12) 粒子数密度反转分布的饱和作用



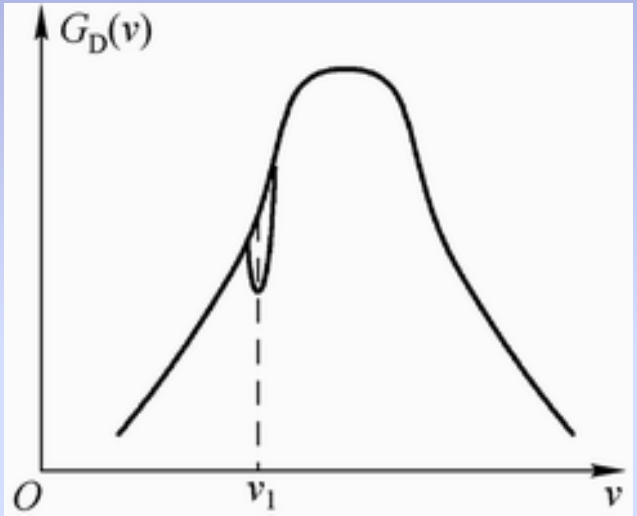
图(2-12) 粒子数密度反转分布的饱和作用

孔的深度 $$\Delta n^0(\nu_1)-\Delta n(\nu_1)=\frac{I/I_s}{1+I/I_s}\Delta n^0(\nu_1)$$

孔的宽度 $$\delta\nu=(1+\frac{I}{I_s})^{\frac{1}{2}}\Delta\nu$$

孔的面积 $$\delta S\approx\Delta n^0(\nu_1)\Delta\nu\frac{I/I_s}{(1+I/I_s)^{1/2}}$$ 输出激光功率

四、稳态情况下的增益饱和

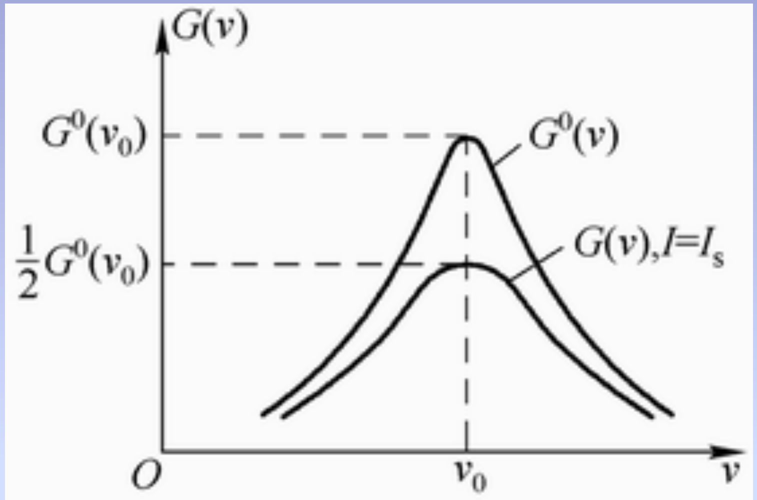


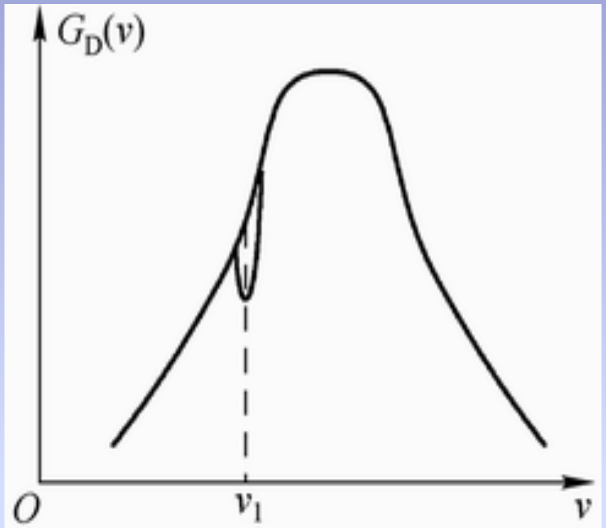
图(2-13) 增益饱和曲线

频率为ν_1、强度为 I 的光波

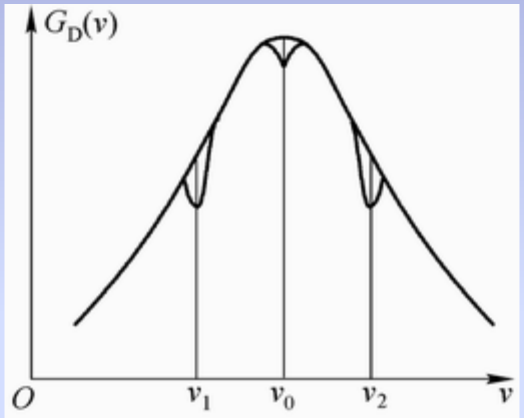
$$G_D(\nu_1)=\frac{G_D^0(\nu_1)}{(1+\frac{I}{I_s})^{1/2}}$$

增益系数的“烧孔”效应





图(2-13) 非均匀增宽型增益饱和曲线



图(2-14) 非均匀增宽型气体激光器中的增益饱和

2.5. 激光器的损耗与阈值条件

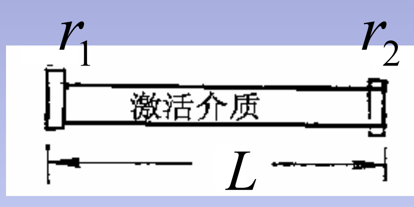
一、 激光器的损耗

内部损耗： $I = I_0 \exp(G - a_{内})z$

$a_{内}$ ——内部损耗系数

镜面损耗：

二、 激光器内形成稳定光强的过程



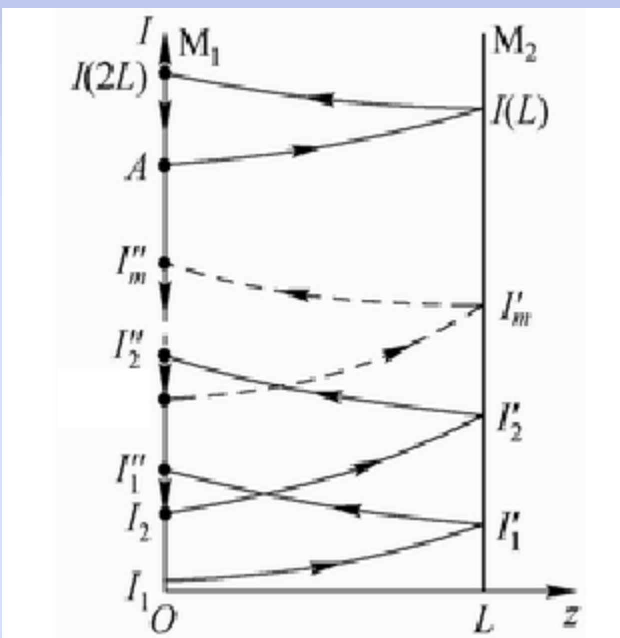


图2-15 激光谐振腔内光强增长

$$I_1 \to I_1'$$

$$I = I_1 \exp(G^0 - a_{内})z \Rightarrow I_1' = r_2 I_1 \exp(G^0 - a_{内})L$$

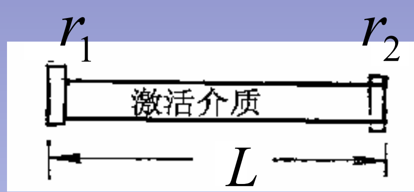
$$I_1' \to I_1''$$

$$I_1'' = I_1' \exp(G^0 - a_{内})L = r_2 I_1 \exp(G^0 - a_{内})2L$$

$$I_2 = r_1 \cdot r_2 I_1 \exp(G^0 - a_{内})2L$$

$$I_{out} = t_1 \cdot r_2 I_1 \exp(G^0 - a_{内})2L$$

$$I_h = a_1 I_1'' = a_1 \cdot r_2 I_1 \exp(G^0 - a_{内})2L$$



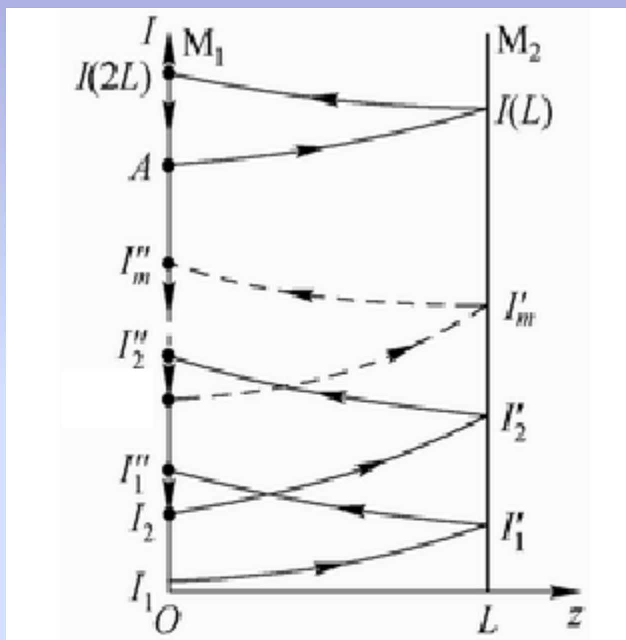


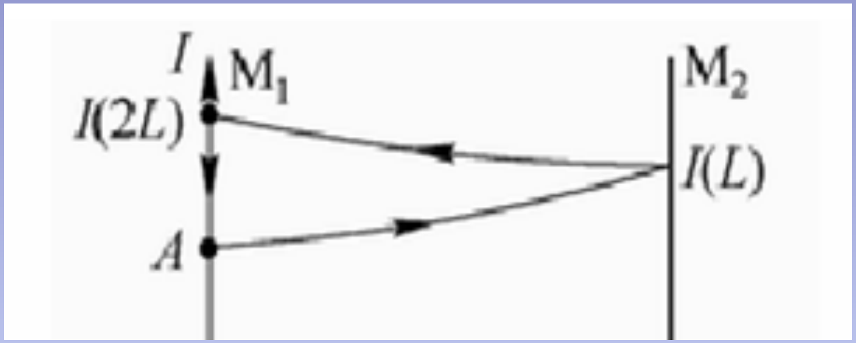
图2-15 激光谐振腔内光强增长

$$I_1'' \rightarrow I_2$$

$$I_{out} + I_h = (a_1 + t_1) \cdot r_2 I_1 \exp(G^0 - a_{内})2L$$

光的放大倍数

$$K = \frac{I_2}{I_1} = r_1 \cdot r_2 \exp(G^0 - a_{内})2L > 1$$



$$G(\nu)=\frac{G^0(\nu)}{1+\dfrac{I}{I_s}}$$

$$K=r_1\cdot r_2\exp(G-a_{内})2L=1$$

三、 阈值条件

获得激光： $K = r_1 \cdot r_2 \exp(G - a_{内})2L \geq 1$

$$G \geq a_{内} - \frac{1}{2L} \ln r_1 \cdot r_2$$

$$a_{内} - \frac{1}{2L} \ln r_1 \cdot r_2 = a_{总}$$

形成激光的增益系数条件为： $G \geq a_{总}$

增益系数的阈值：

$$G_{阈} = \frac{G^0}{1 + I_M / I_S} = a_{总}$$

$$G_{阈} = \frac{G_D^0}{(1 + I_M / I_S)^{1/2}} = a_{总}$$

粒子数密度反转分布值的阈值：

$$G_{阈} = \Delta n_{阈} \cdot B_{21} \frac{\mu}{c} h\nu \cdot f(\nu) = a_{总}$$

$$\Rightarrow \Delta n_{阈} = \frac{a_{总} \cdot c}{B_{21} \mu h\nu \cdot f(\nu)} \qquad B_{21} = \frac{A_{21}(c/\mu)^3}{8\pi h\nu^3} = \frac{c^3}{8\pi h\nu^3 \mu^3 \tau}$$

$$\Delta n_{阈} = \frac{8\pi \nu^2 \mu^2 \tau \cdot a_{总}}{c^2 f(\nu)}$$

激励能源对介质粒子的抽运一定要满足 $\Delta n \geq \Delta n_{阈}$，才能产生激光。

四、对介质能级选取的讨论

$$n_2 \geq n_1 + \Delta n_{阈}$$

三能级系统： $n_2 \geq n/2 + \Delta n_{阈}/2$

四能级系统： $n_2 \geq \Delta n_{阈}$

表2-2三种激光器的有关参数

激光器种类	红　宝　石	钕　玻　璃	掺钕钇铝石榴石激光器
能级	三能级系统	四能级系统	四能级系统
激光波长λ	694.3μm	1.60μm	1.06μm
激光频率 $\nu_0(s^{-1})$	4.32×10^{14}	2.83×10^{14}	2.83×10^{14}
折射率μ	1.76	1.52	1,82
线宽 $\Delta\nu(s^{-1})$	3.3×10^{11}	7×10^{12}	1.95×10^{11}
能级寿命(s)	3×10^{-3}	2.3×10^{-4}	2.3×10^{-4}
$\Delta n_{阈}(cm^{-3})$	8.7×10^{17}	1.4×10^{18}	1.8×10^{16}
总粒子数密度 $n(cm^{-3})$	1.58×10^{19}	2.83×10^{20}	1.38×10^{20}
$n_{2阈}(cm^{-3})$	8.4×10^{18}	1.4×10^{18}	1.8×10^{16}
$n_{2阈}(cm^{-3})/\Delta n_{阈}\approx$	10	1	1
效率	0.1~0.3%	4%~0.6%	3%~7%