

4-6激光器的输出功率与能量

4.6. 激光器的输出功率

连续或长脉冲激光器 → 找输出功率

短脉冲激光器 → 找输出能量

连续或长脉冲激光器

一、腔内光强分布的特点及理由

特点：腔内光强分布是不均匀的。

理由：激活介质的光放大作用、腔内损耗系数的不均匀分布、驻波效应、光场的横向高斯分布等。

处理方法：通过讨论稳态情况下的平均光强来估算激光器输出功率。

二、腔内光强达到稳态的过程

外界激发很弱时 → $G^0 < G_{\text{阈}}$ → 激光器无输出

增强外界激发 → $G^0 > G_{\text{阈}}$ → $I \uparrow$ → $G \downarrow$

当 $G = G_{\text{阈}}$ 时，稳态建立 → I 恒定

4.6.1 均匀增宽型介质激光器的输出功率

在驻波型激光器中, 稳定工作时, 腔内存在着沿腔轴方向传播的光 I^+ 和反方向传播的光 I^- . 若谐振腔由一面全反射镜和一面透射率为 t 的输出反射镜组成时, 腔内光强如图3-11所示.

一. 稳定出光时激光器内诸参数的表达式

(1) 腔内最小的光强 $I^+(0)$

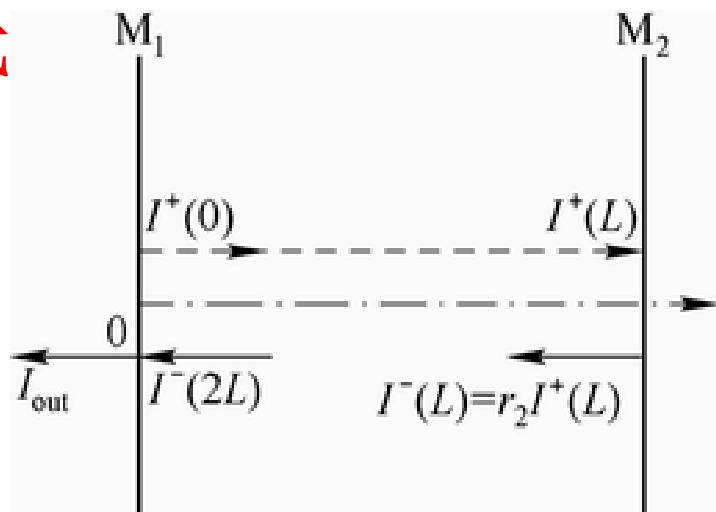
(2) 腔内最大光强

$$I^-(2L) = r_2 I^+(0) \exp[2L(G - a_{\text{内}})]$$

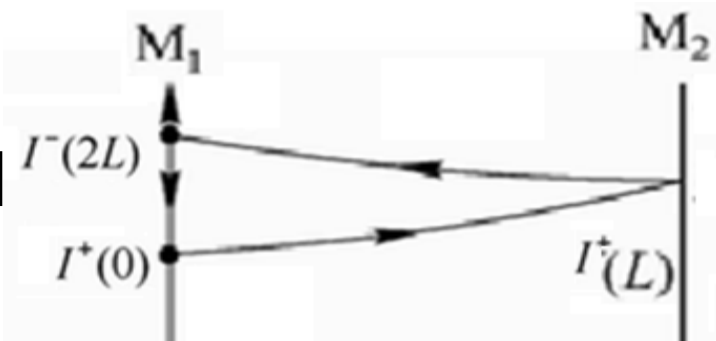
(3) 输出光强:

$$I_{\text{out}} = t_1 I^-(2L) = t_1 r_2 I^+(0) \exp[2L(G - a_{\text{内}})]$$

(4) 镜面损耗: $I_h = a_1 I^-(2L) = a_1 r_2 I^+(0) \exp[2L(G - a_{\text{内}})]$



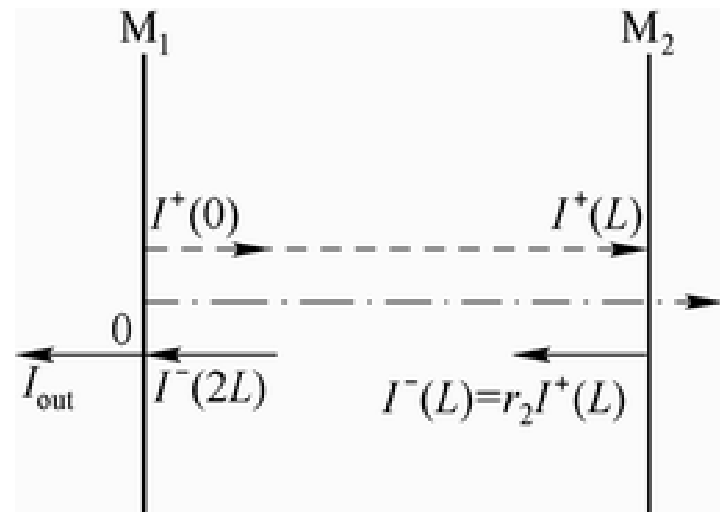
图(3-11) 谐振腔内光强



剩余部分:

$$\begin{aligned} I^+(0) &= r_1 I^-(2L) \\ &= r_1 r_2 I^+(0) \exp[2L(G - a_{\text{内}})] \end{aligned}$$

(5) 最大最小光强、输出光强和镜面损耗之间关系



图(3-11) 谐振腔内光强

由能量守恒定律可得:

$$I^-(2L) - I^+(0) = I_{\text{out}} + I_h = (a_1 + t_1) I^-(2L)$$

(6) 平均行波光强

对于腔内任何一处 \mathbf{z} 都有两束传播方向相反的行波 $I^+(\mathbf{z})$ 和 $I^-(2L-\mathbf{z})$ 引起粒子数反转分布值发生饱和, 增益系数也发生饱和, 近似用平均光强 $2I$ 代替腔内光强 $I^+(\mathbf{z}) + I^-(2L-\mathbf{z})$, 用

$$G = \frac{G^0}{1 + 2I/I_s} = G_{\text{阈}}$$

作为腔内的平均增益系数,
则腔内的平均行波光强为:

$$I = \frac{I_s}{2} \left(\frac{G^0}{G_{\text{阈}}} - 1 \right) = \frac{I_s}{2} \left(\frac{G^0}{a_{\text{总}}} - 1 \right)$$

二. 激光器的输出功率

(1) 理想的情况 $a_{\text{内}} = 0$,
将全反射镜 M_2 上的镜面损耗都折合到 M_1 上, 对 M_2 有:

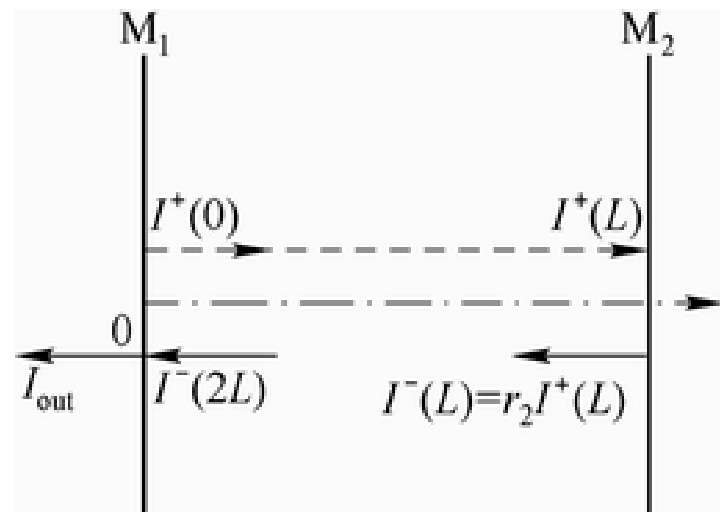
$$r_2 \approx 1, t_2 \approx 0, a_2 \approx 0$$

对 M_1 有: $r_1 = 1 - (a_1 + t_1)$

激光器的总损耗为:
$$a_{\text{总}} = a_{\text{内}} - \frac{1}{2L} \ln r_1 r_2 = -\frac{1}{2L} \ln[1 - (a_1 + t_1)]$$

如果 $a_1 + t_1$ 很小, 将 $\ln[1 - (a_1 + t_1)]$ 用级数展开取一级近似, 可得:

$$a_{\text{总}} = \frac{a_1 + t_1}{2L} \quad \left\{ \ln(1-x) \approx -\left(x + \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} + \cdots\right) \right\}$$

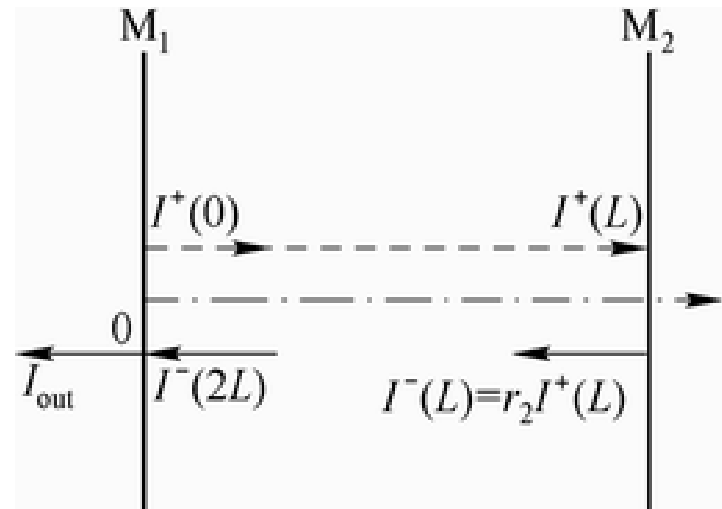


图(3-11) 谐振腔内光强

$$I = \frac{I_s}{2} \left(\frac{G^0}{G_{\text{阈}}} - 1 \right) = \frac{I_s}{2} \left(\frac{G^0}{a_{\text{总}}} - 1 \right) \quad a_{\text{总}} = \frac{a_1 + t_1}{2L}$$

则激光器内行波的平均光强 I 可以化为：

$$I = \frac{I_s}{2} \left(\frac{2LG^0}{a_1 + t_1} - 1 \right)$$



图(3-11) 谐振腔内光强

激光器输出光强也可以表示为：

$$I_{out} = t_1 I = \frac{I_s}{2} t_1 \left(\frac{2LG^0}{a_1 + t_1} - 1 \right)$$

若激光器的平均截面为 A ，则其输出功率为：

$$P = A I_{out} = \frac{1}{2} t_1 I_s A \left(\frac{2LG^0}{a_1 + t_1} - 1 \right)$$

三. 输出功率与诸参量之间的关系

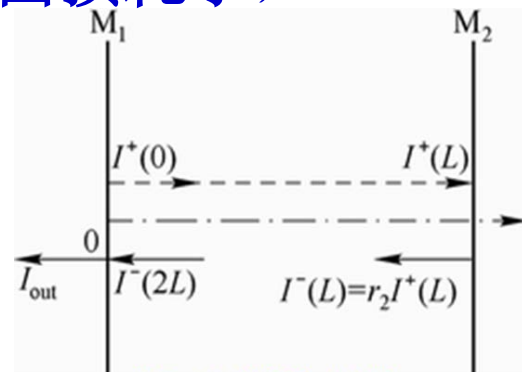
$$P = AI_{out} = \frac{1}{2}t_1 I_s A \left(\frac{2LG^0}{a_1 + t_1} - 1 \right)$$

(1) P 与 I_s 的关系：两者成正比

(2) P 与 A 的关系： A 越大， P 越大；而高阶横模的光束截面要比基横的大

(3) P 与 t_1 的关系：实际中总是希望输出功率大镜面损耗小，即希望

$$I^-(2L) - I^+(0) = (a_1 + t_1)I^-(2L) \approx t_1 I^-(2L)$$



图(3-11) 谐振腔内光强

这要求 t_1 大， a_1 小，使 $t_1 \gg a_1$ ，但！

➤ t_1 过大又使增益系数的阈值 $G_{\text{阈}}$ 升高，而如果介质的双程增益系数 $2LG^0$ 不够大将会导致腔内光强减小，使输出功率降低。严重时使腔内不能形成激光。

➤ t_1 过小，虽然使 $G_{\text{阈}}$ 降低光强增强，但镜面损耗 $a_1 I^-(2L)$ 也将增大。

$$P = AI_{out} = \frac{1}{2}t_1 I_s A \left(\frac{2LG^0}{a_1 + t_1} - 1 \right)$$

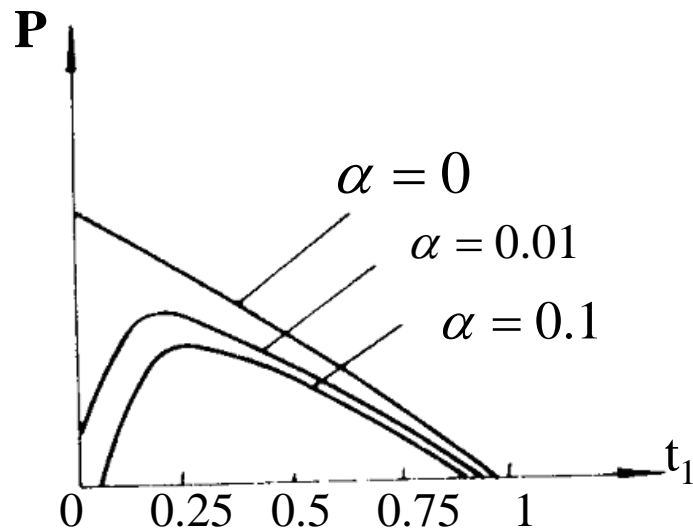
为了使激光器有最大的输出功率，必须使部分反射镜的透射率取最佳值：

$$\frac{dP}{dt_1} = 0 \Rightarrow \frac{1}{2} A \cdot I_s \left(\frac{2LG^0}{a_1 + t_1} - 1 \right) + \frac{1}{2} t_1 A I_s \left(-\frac{2LG^0}{(a_1 + t_1)^2} \right) = 0$$

解以上方程得最佳透射率：

$$t_1 = (2LG^0 a_1)^{1/2} - a_1 = \sqrt{a_1} (\sqrt{2LG^0} - \sqrt{a_1})$$

图中画出往返损耗率 α 取不同数值, $2LG^0 = 3$ 时的输出功率与透射率 t_1 的关系曲线.

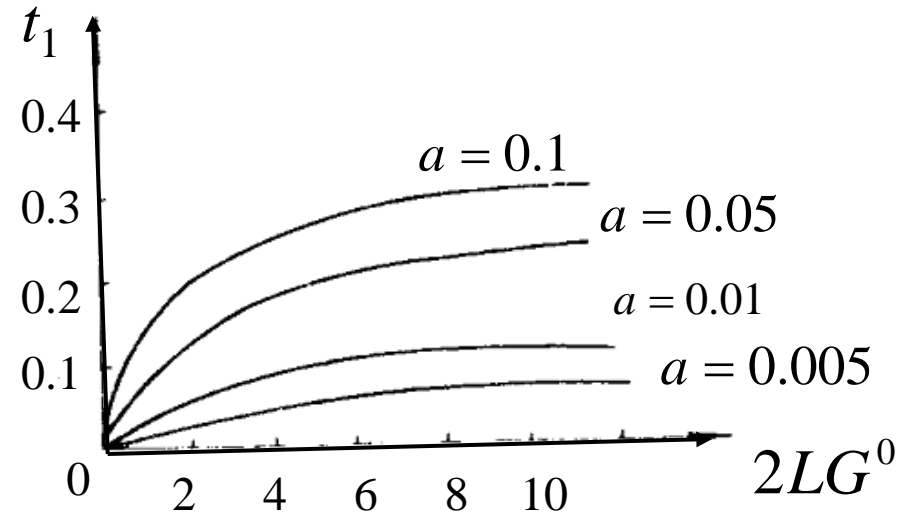


$$t_1 = (2LG^0 a_1)^{1/2} - a_1 = \sqrt{a_1} (\sqrt{2LG^0} - \sqrt{a_1})$$

图中画出往返损耗率 a 取不同数值时的输出镜的最佳透射率 t_1 与 $2LG^0$ 的关系曲线.

将 $t_1 = \sqrt{a_1} (\sqrt{2LG^0} - \sqrt{a_1})$ 代入

$$P = AI_{out} = \frac{1}{2} t_1 I_s A \left(\frac{2LG^0}{a_1 + t_1} - 1 \right)$$



此时，输出镜具有最佳透射率时激光器得输出功率为：

$$P = \frac{1}{2} I_s A \sqrt{a_1} (\sqrt{2LG^0} - \sqrt{a_1}) \cdot \left(\frac{2LG^0}{\sqrt{2LG^0} a_1} - 1 \right)$$

$$= \frac{1}{2} I_s A (\sqrt{2LG^0} - \sqrt{a_1})^2$$

4.6.2 非均匀增宽型介质激光器的输出功率

和均匀加宽激光器不同的是, 当振荡模频率 $\nu_q \neq \nu_0$ 时, I^+ 和 I^- 两束光在增益曲线上分别烧两个孔。对每一个孔起饱和作用的分别是 I^+ 或 I^- , 而不是两者的和。

一. 稳定出光时激光器内诸参数的表达式

- (1) 腔内最大光强 $I^-(2L, \nu) = r_2 I^+(0, \nu) \exp 2L(G - a_{\text{内}})$
- (2) 输出光强 $I_{\text{out}}(\nu) = t_1 I^-(2L, \nu) = t_1 r_2 I^+(0, \nu) \exp 2L(G - a_{\text{内}})$
- (3) 镜面损耗 $I_h(\nu) = a_1 I^-(2L, \nu) = a_1 r_2 I^+(0, \nu) \exp 2L(G - a_{\text{内}})$
- (4) 最小光强: $I^+(0, \nu) = r_1 I^-(2L, \nu) = r_1 r_2 I^+(0, \nu) \exp 2L(G - a_{\text{内}})$

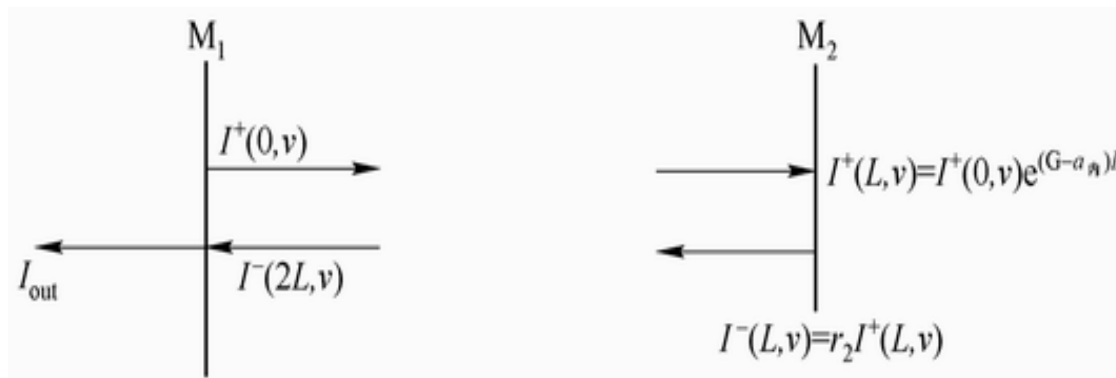


图3-12 非均匀增宽激光器腔内的光强

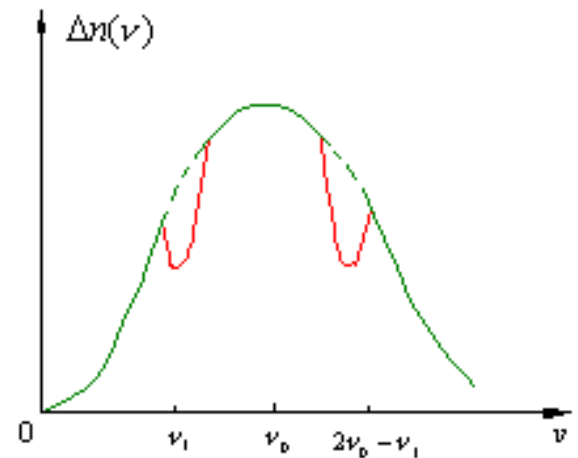
(5) 非均匀增宽型介质的增益系数随频率 ν 而变

二、非均匀加宽单模激光器的输出功率

1. 当 $\nu_q \neq \nu_0$, 光束 I_+ 与 I_- 将在增益曲线上分别产生两个烧孔, 每个光强只对其中一个烧孔起饱和作用;

腔内不同地点的光强不同, 取 I 作为平均光强, 当增益不太大时 $I = I^+ = I^-$, 则介质对 ν 光波的平均增益系数为:

$$G(\nu) = \frac{G_D^0(\nu)}{\sqrt{1 + I/I_s}} = G_{\text{阈}}$$



2. 当 $\nu_q = \nu_0$, 光束 I_+ 与 I_- 将在增益曲线中心处产生一个烧孔, 此时:

$$I = I_+ + I_- \approx 2I_+$$

$$G_D(\nu_0) = \frac{G_D^0(\nu_0)}{\sqrt{1 + (I^+ + I^-)/I_s}} = G_{\text{阈}}$$

$$G_D(\nu_0) = \frac{G_D^0(\nu_0)}{\sqrt{1 + (I^+ + I^-)/I_s}} = G_{\text{阈}}$$

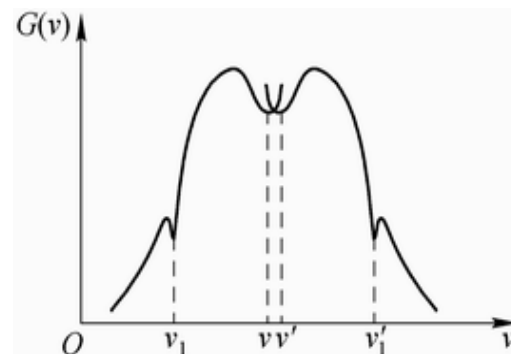


图3-13 非均匀增宽激光器的“烧孔效应”

若用平均光强 $2I$ 来替 $I^+(z, \nu_0) + I^-(2L - z, \nu_0)$
 则光波在腔中的平均增益系数可表示为：

$$G_D(\nu_0) = \frac{G_D^0(\nu_0)}{\sqrt{1 + 2I/I_s}} = G_{\text{阈}}$$

若腔内各频率的光强都等于 I_s ，则 ν_0 以及 ν_0 附近的 ν
 光波所获得的增益系数分别为：

$$G_D(\nu_0) = \frac{G_D^0(\nu_0)}{\sqrt{3}} \text{ 和 } G_D(\nu) = \frac{G_D^0(\nu)}{\sqrt{2}}$$

若增益系数的阈值都相等，则 ν_0 和 ν_0 附近频率为 ν 光波的平均光强分别为下值，且前者比后者要弱：

$$I(\nu_0) = \frac{1}{2} I_s \left[\left(\frac{G_D^0(\nu_0)}{G_{\text{阈}}} \right)^2 - 1 \right] \quad \text{和} \quad I(\nu) = I_s \left[\left(\frac{G_D^0(\nu)}{G_{\text{阈}}} \right)^2 - 1 \right]$$

三、激光器的输出功率

(1) 单频激光器的输出功率

$$a_{\text{总}} = a_{\text{内}} - \frac{1}{2L} \ln r_1 r_2 = -\frac{1}{2L} \ln[1 - (a_1 + t_1)]$$

➤若腔内只允许一个谐振频率，且 $\nu \neq \nu_0$ ，激光器在理想的情况下，仍有：

$$a_{\text{内}} \approx 0; r_2 \approx 1; a_{\text{总}} = \frac{a_1 + t_1}{2L}$$

此时腔内的平均光强为：

$$I(\nu) = I_s \left[\left(\frac{2LG_D^0(\nu)}{a_1 + t_1} \right)^2 - 1 \right]$$

激光器的输出光强为：

$$I_{\text{out}}(\nu) = t_1 I(\nu) = t_1 I_s \left[\left(\frac{2LG_D^0(\nu)}{a_1 + t_1} \right)^2 - 1 \right]$$

若 ν 光束的截面为 A ，则激光器的输出功率为：

$$P(\nu) = AI_{\text{out}}(\nu) = At_1 I_s \left[\left(\frac{2LG_D^0(\nu)}{a_1 + t_1} \right)^2 - 1 \right]$$

➤若腔内单纵模的频率为 ν_0 ，激光器腔内平均光强为：

$$I(\nu_0) = \frac{1}{2} I_s \left[\left(\frac{2LG_D^0(\nu_0)}{a_1 + t_1} \right)^2 - 1 \right]$$

激光器输出光强为：

$$I_{\text{out}}(\nu_0) = t_1 I(\nu_0) = \frac{1}{2} t_1 I_s \left[\left(\frac{2LG_D^0(\nu_0)}{a_1 + t_1} \right)^2 - 1 \right]$$

$$I_{\text{out}}(\nu_0) = t_1 I(\nu_0) = \frac{1}{2} t_1 I_s \left[\left(\frac{2LG_D^0(\nu_0)}{a_1 + t_1} \right)^2 - 1 \right]$$

若 ν_0 光束的截面为 A ，激光器的输出功率为：

$$P(\nu_0) = AI_{\text{out}}(\nu_0) = \frac{1}{2} At_1 I_s \left[\left(\frac{2LG_D^0(\nu_0)}{a_1 + t_1} \right)^2 - 1 \right]$$

$$P(\nu) = AI_{\text{out}}(\nu) = At_1 I_s \left[\left(\frac{2LG_D^0(\nu)}{a_1 + t_1} \right)^2 - 1 \right]$$

上面两式相比, 上式多了一个 $1/2$ 因子, 由此可见 $\nu = \nu_0$ 时的输出功率下降图为单模输出功率 P 和单模频率 ν_q 的关系曲线。在 $\nu = \nu_0$ 处, 曲线有一凹陷。称作**兰姆凹陷**。

➤ 如果我们使单纵模输出的激光器的谐振频率由小到大变化, 逐渐接近 ν_0 时, 输出功率也逐渐变大, 但当频率 ν 变到

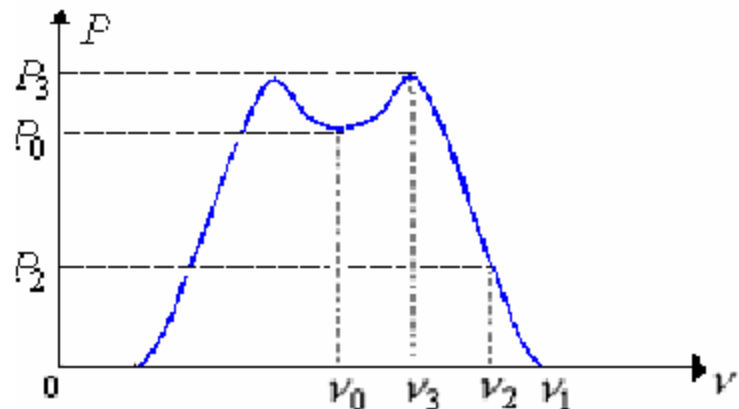
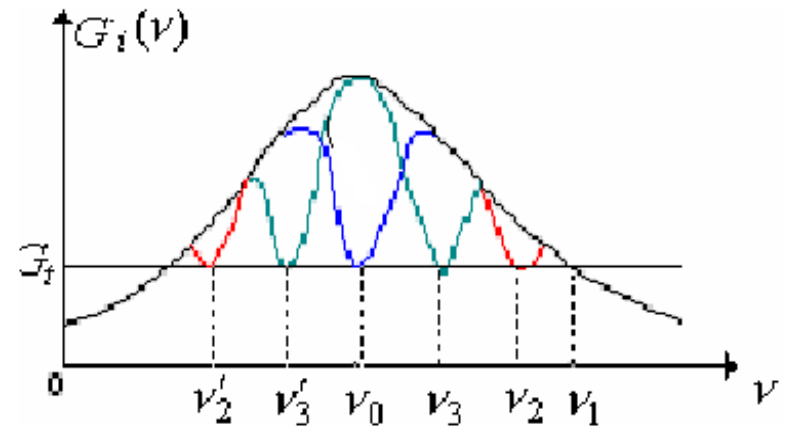
$$\nu_0 - \sqrt{1 + \frac{I}{I_s} \frac{\Delta\nu}{2}} < \nu < \nu_0 + \sqrt{1 + \frac{I}{I_s} \frac{\Delta\nu}{2}}$$

此范围时，该光波在增益系数的曲线上对称“烧”的两个孔发生了重叠，直到 $\nu = \nu_0$ 增益曲线上的两个孔完全重叠，输出功率下降至一个最小值。

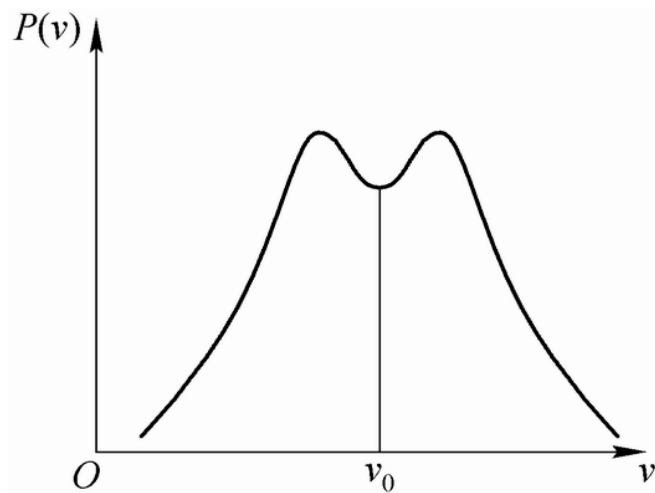
即当输出光的频率与中心频率相同时，两个烧孔完全重合，烧孔面积减小，即对激光做贡献的反转粒子数减少，输出功率下降，在输出功率对频率的关系曲线上出现一个凹陷，称为兰姆凹陷。

兰姆凹陷的宽度：

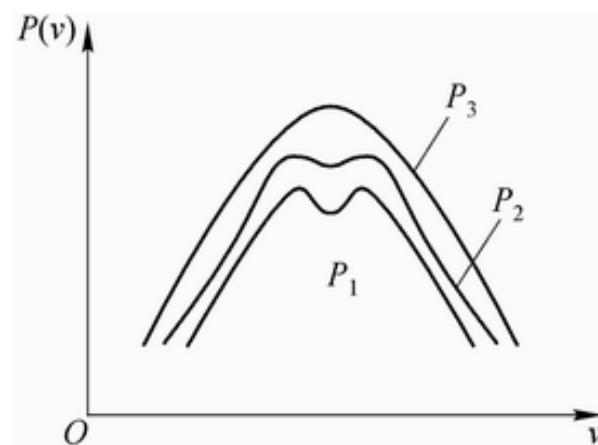
$$\delta\nu = \Delta\nu_H \sqrt{1 + \frac{I}{I_s}}$$



➤图(3-14)为 $P(v)$ 曲线；图(3-15)为兰姆凹陷与气压的关系曲线



图(3-14) $P(v)$ 曲线与“兰姆凹陷”



图(3-15)“兰姆凹陷”与管中气压的关系

(2) 多频激光器的输出功率

➤若腔内允许多个谐振频率，且相邻两个纵模的频率间隔大于烧孔的宽度以及各频率的烧孔都是彼此独立的，则平均光强为：

$$I(\nu) = \begin{cases} I_s \left[\left(\frac{2LG_D^0(\nu)}{a_1 + t_1} \right)^2 - 1 \right] & \nu \neq \nu_0 \\ \frac{1}{2} I_s \left[\left(\frac{2LG_D^0(\nu_0)}{a_1 + t_1} \right)^2 - 1 \right] & \nu = \nu_0 \end{cases}$$

输出功率为：

$$P(\nu) = \begin{cases} At_1 I_s \left[\left(\frac{2LG_D^0(\nu)}{a_1 + t_1} \right)^2 - 1 \right] & \nu \neq \nu_0 \\ \frac{1}{2} At_1 I_s \left[\left(\frac{2LG_D^0(\nu_0)}{a_1 + t_1} \right)^2 - 1 \right] & \nu = \nu_0 \end{cases}$$

多频激光器的输出功率为：

$$P = \sum_{i=1}^N P(\nu_i)$$

➤若腔内多纵模的频率 ν 对称的分布在 ν_0 的两侧，也即有一个纵模率 $\nu = \nu_0 + b$ ，必有另一个纵模频率 $\nu' = \nu_0 - b$ ，则在理想情况下纵模 ν 的增益系数为：

$$G(\nu) = \frac{G_D^0(\nu)}{\sqrt{1 + (I(\nu) + I(\nu'))/I_s}} = \frac{G_D^0(\nu)}{\sqrt{1 + 2I/I_s}} = G_{\text{阈}}$$

纵模 ν 在腔内的平均光强为：

$$\overline{I(\nu)} = \frac{1}{2} I_s \left[\left(\frac{G_D^0(\nu) \cdot 2L}{a_1 + t_1} \right)^2 - 1 \right]$$

纵模 ν 的输出功率为：

$$P(\nu) = \frac{1}{2} A t_1 I_s \left[\left(\frac{G_D^0(\nu) \cdot 2L}{a_1 + t_1} \right)^2 - 1 \right]$$

该多模激光器的输出功率为：

$$P = \sum_{i=1}^N P(\nu_i)$$