

第三章

激光振荡与工作特性

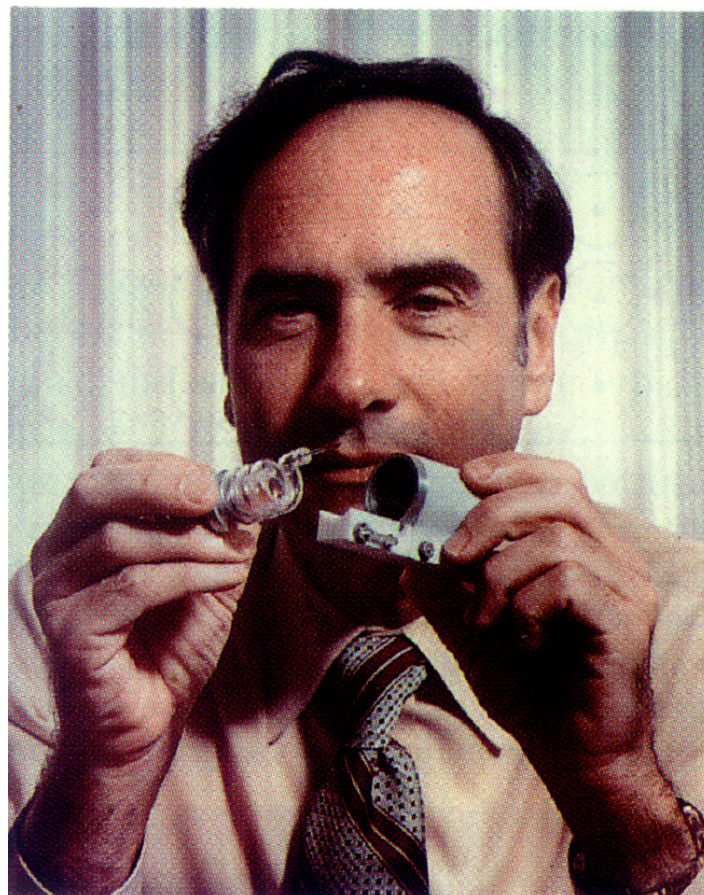
- 3. 1 激光产生的基本原理和方法
- 3. 2 光学谐振腔
- 3. 3 激光产生的阈值条件
- 3. 4 激光的纵模与频率特性
- 3. 5 激光的横模和高斯光束
- 3. 6 连续激光器的输出功率与最佳透过率

3.1 激光产生的基本原理和方法

方向性好
单色性好
高亮度

对光源的要求：

1960年1月18日，美国加利福尼亚休斯研究所，西奥多·梅曼用一个红宝石棒研制出了世界上第一台红宝石激光器。



3.1 激光产生的基本原理和方法



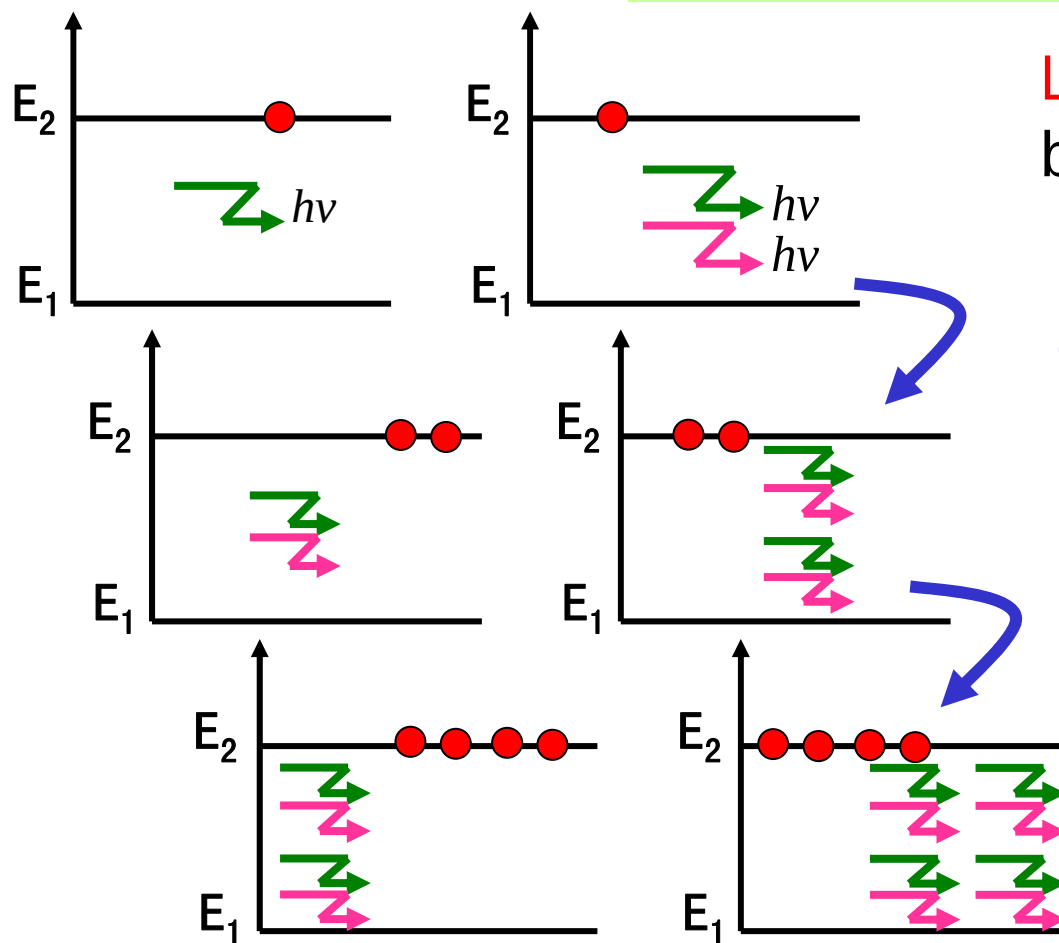
激光的舞台装饰效果图

— 激光产生的基本原理

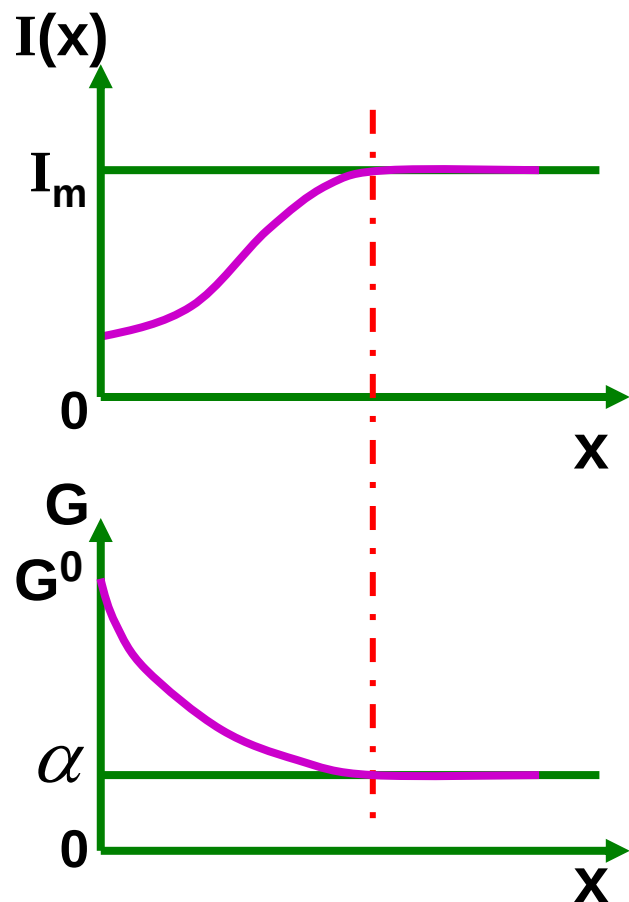
受激辐射光放大

Laser (light amplification by stimulated emission of radiation)

前提：粒子数反转分布
(激励、抽运或泵浦)



二 光的自激振荡



增益饱和与自激振荡

$$dI(x) = [G(I) - \alpha] I(x) dx$$



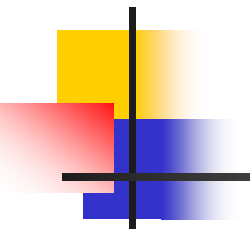
$$I(x) = I_0 \exp(G^0 - \alpha)$$



$$G(I) = \alpha$$

$$I_m = (G^0 - \alpha) \frac{I_s}{\alpha}$$

“自激振荡”



三 激光的特性

1. 时间相干性与单色性

时间相干性：在**空间同一点**，两个**不同时刻**到达的光场之间的相干程度。

度量：相干时间 τ

$$\tau = \frac{1}{\Delta\nu}$$

2. 空间相干性与方向性

空间相干性：**同一时刻**垂直于光传播方向的截面上两个**不同点**处光场之间的相干程度。

度量：相干面积 A_c 或相干体积 V_c

$$A_c \approx \frac{\lambda^2 R^2}{\Delta A_s}$$

$$V_c = \frac{\lambda^2 R^2}{\Delta A_s} \frac{c}{\Delta\nu}$$

四 激光器的构造

1. 激光工作物质

激活粒子：形成粒子数反转的发光粒子

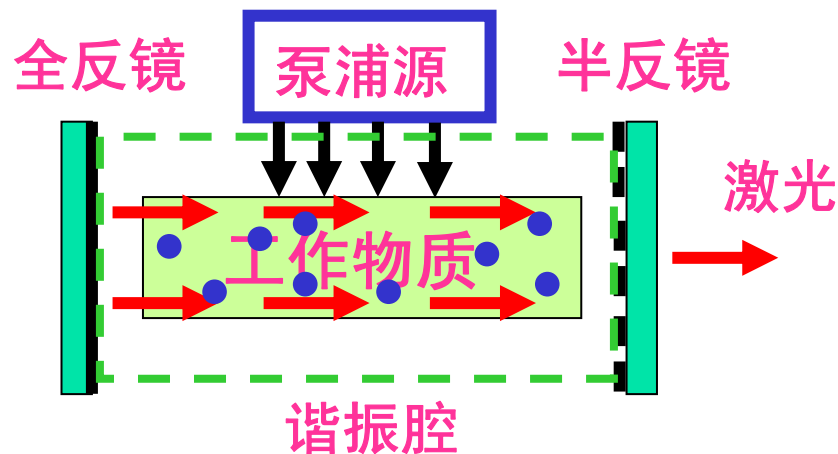
基质：为激活粒子提供寄存场所的材料

2. 泵浦源

对激光工作物质进行激励，
形成粒子数反转。

3. 光学谐振腔

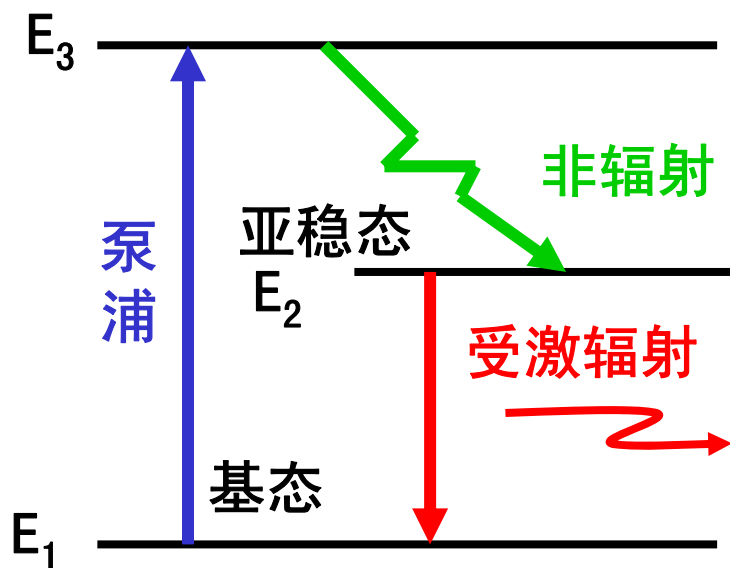
- 实现光放大
- 改善输出激光的质量



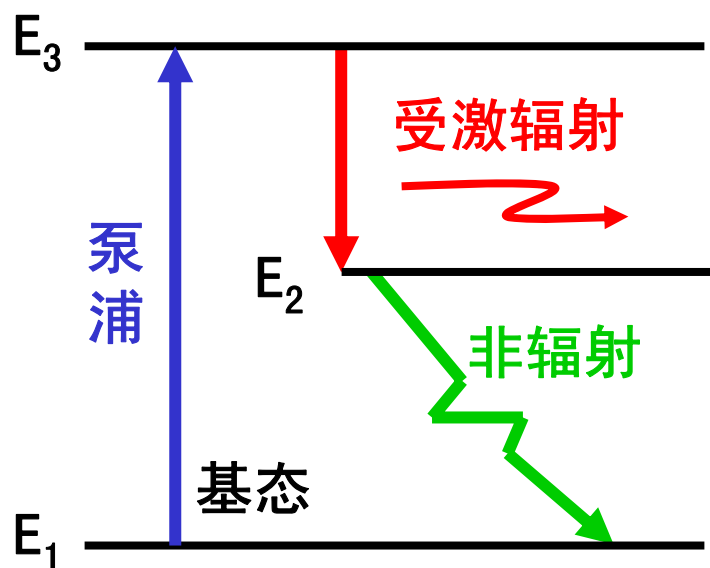
激光器的基本组成

五 激光粒子的能级系统

1. 三能级系统



(a) 红宝石激光器: Cr离子

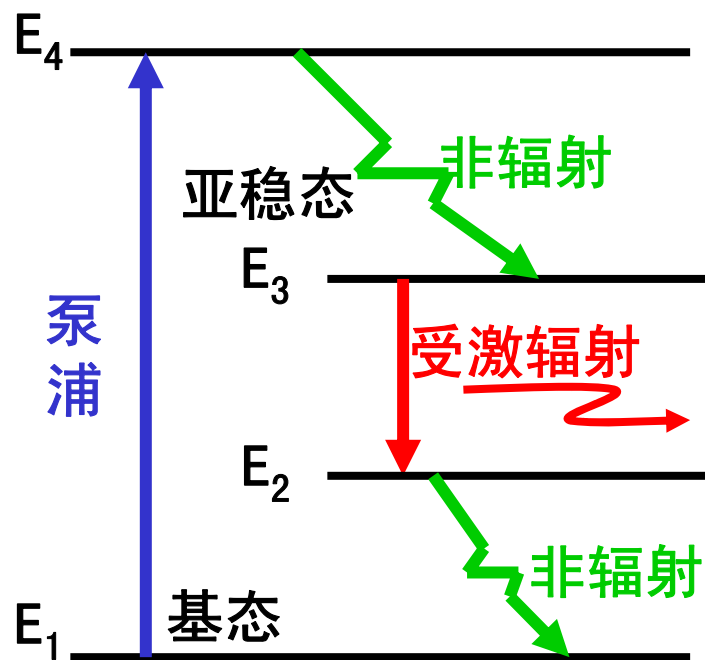


(b) 气体激光器: Ar离子

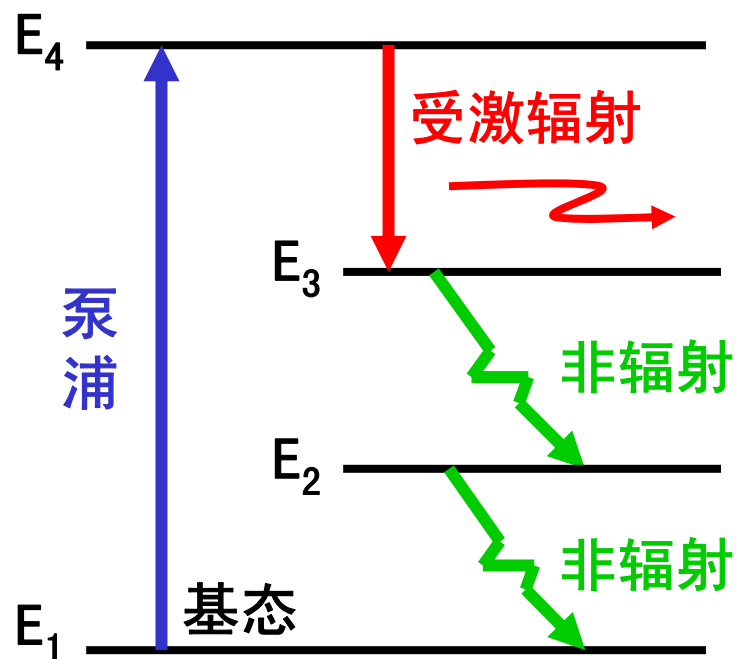
两种三能级示意图

五 激光粒子的能级系统

2. 四能级系统

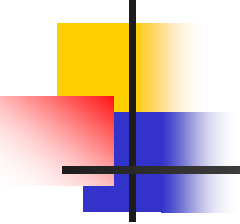


(a) 钕玻璃激光器：Nd³⁺



(b): 氦原子、CO₂

两种四能级示意图



3.2 光学谐振腔

一、谐振腔作用

1. 提供光学正反馈作用

2. 产生对振荡光束的控制作用

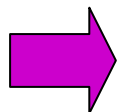
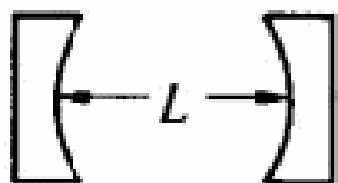
- 有效控制腔内实际振荡的模式数目，提高光子简并度，获得单色性好、方向性强的相干光
- 直接控制激光束的横向分布特性
- 改变腔内光束的损耗，控制激光束输出功率

二 谐振腔的种类

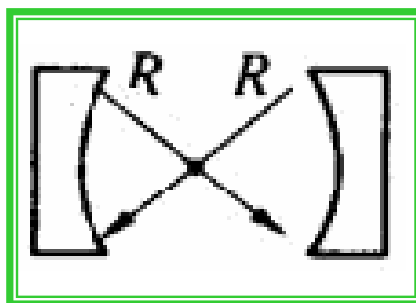
1. 平行平面镜腔



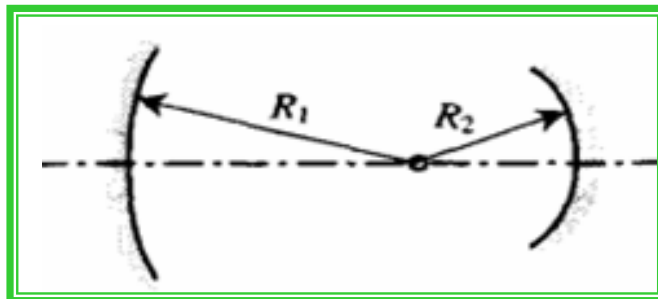
2. 凹面反射镜腔



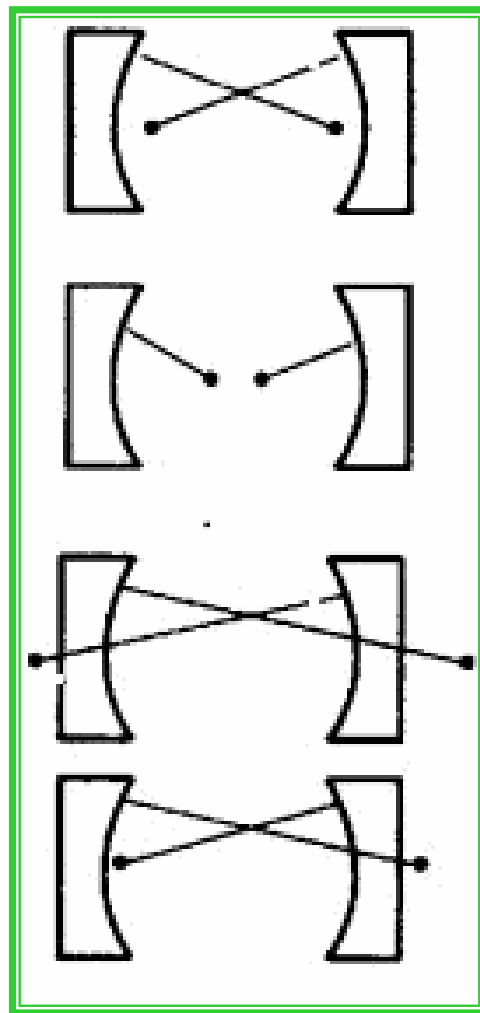
共焦腔



共心腔

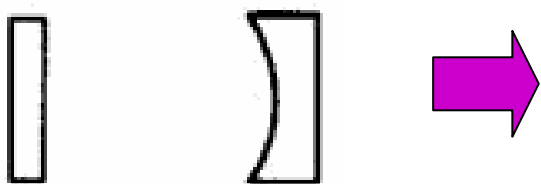


非共焦腔

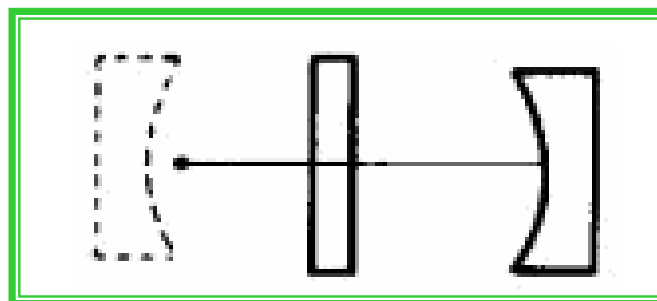


二 谐振腔的种类

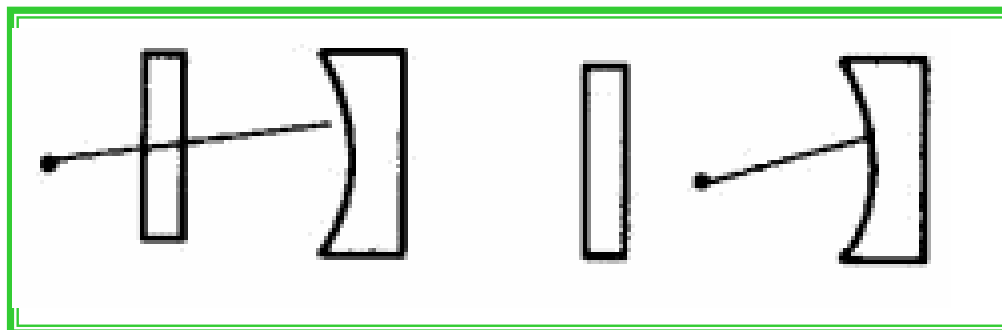
3. 平面凹面镜腔



半共焦腔



非共焦平凹腔

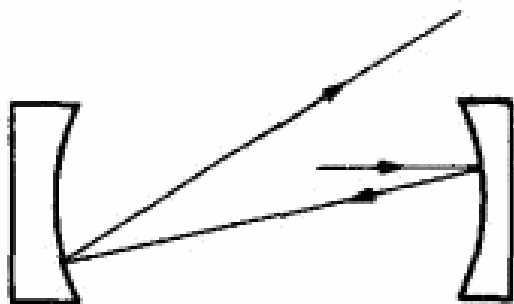
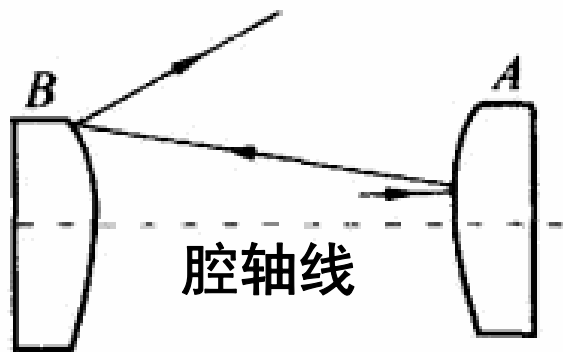


二 谐振腔的稳定条件

1. 稳定腔与不稳定腔

不稳定腔：光线在腔中来回多次反射后最终跑出腔外的谐振腔。

应用：大功率激光器。



两种不稳定腔

非稳腔的特点：

- 具有较大的模体积

模体积：谐振腔中激光束传播过程中所占有的激活介质的体积。

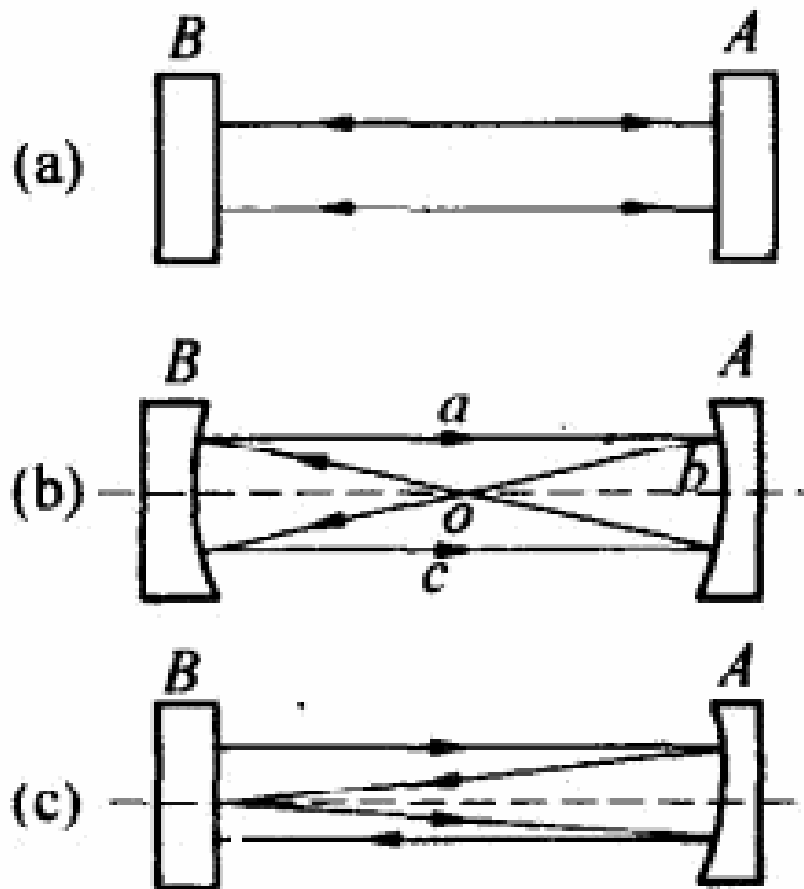
- 较好的选模能力
- 能实现光束的侧向耦合输出

二 谐振腔的稳定条件

1. 稳定腔与不稳定腔

稳定腔：光线在腔中来回多次反射后最终可以被束缚在腔体内传播。

应用：中、小功率激光器。

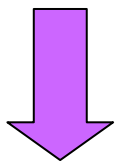


几种稳定腔结构

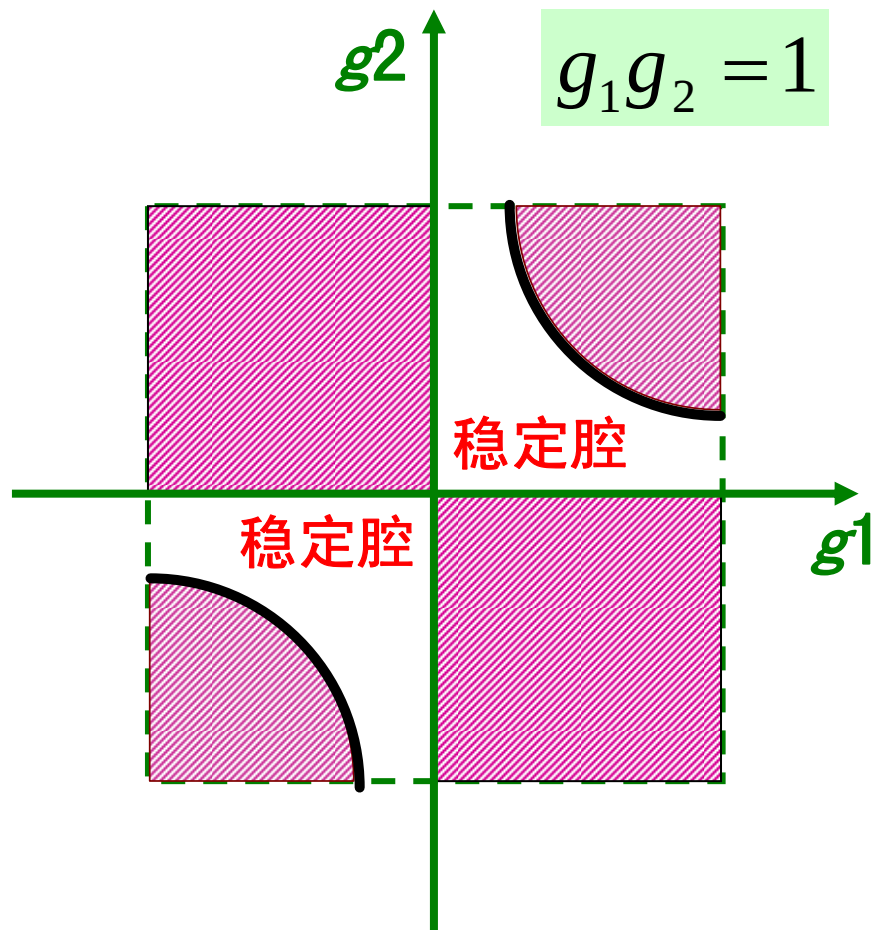
2. 腔的稳定条件

$$1 > \left(1 - \frac{L}{R_1}\right) \left(1 - \frac{L}{R_2}\right) > 0$$

$$\begin{aligned} g_1 &= 1 - (L/R_1) \\ g_2 &= 1 - (L/R_2) \end{aligned}$$



$$1 > g_1 g_2 > 0$$



稳定条件示意图

二 谐振腔的稳定条件

2. 腔的稳定条件

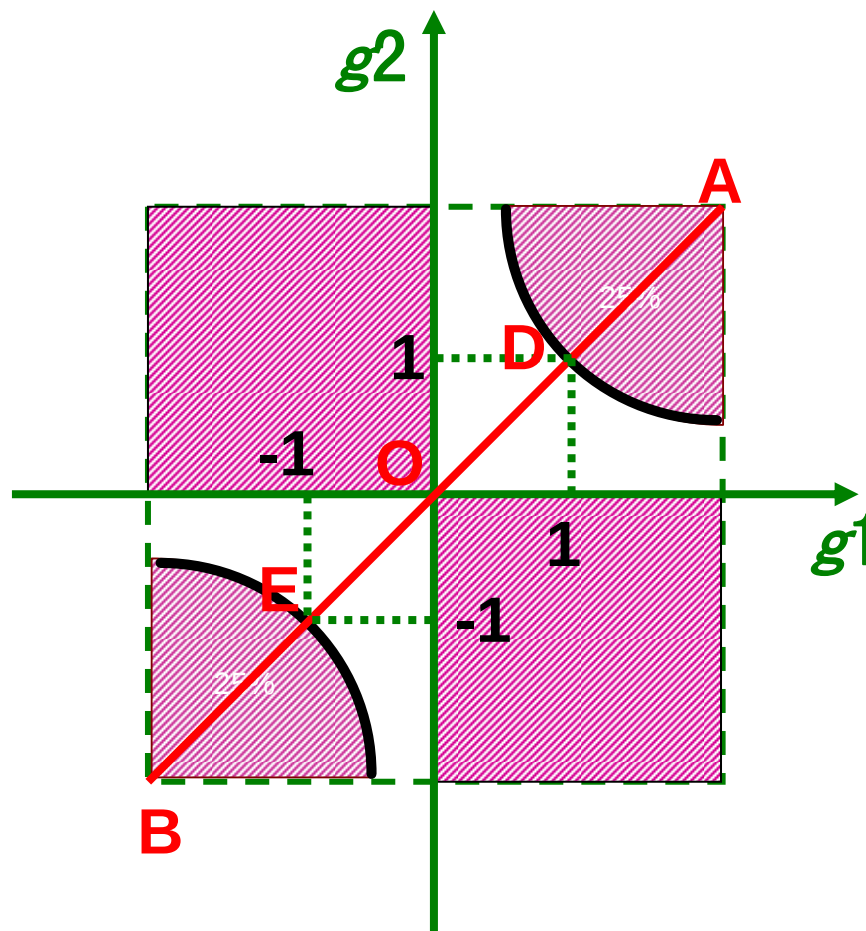
E: 共心腔

O: 共焦腔

D: 平行平面腔

A: 两曲率半径相等的凸面镜

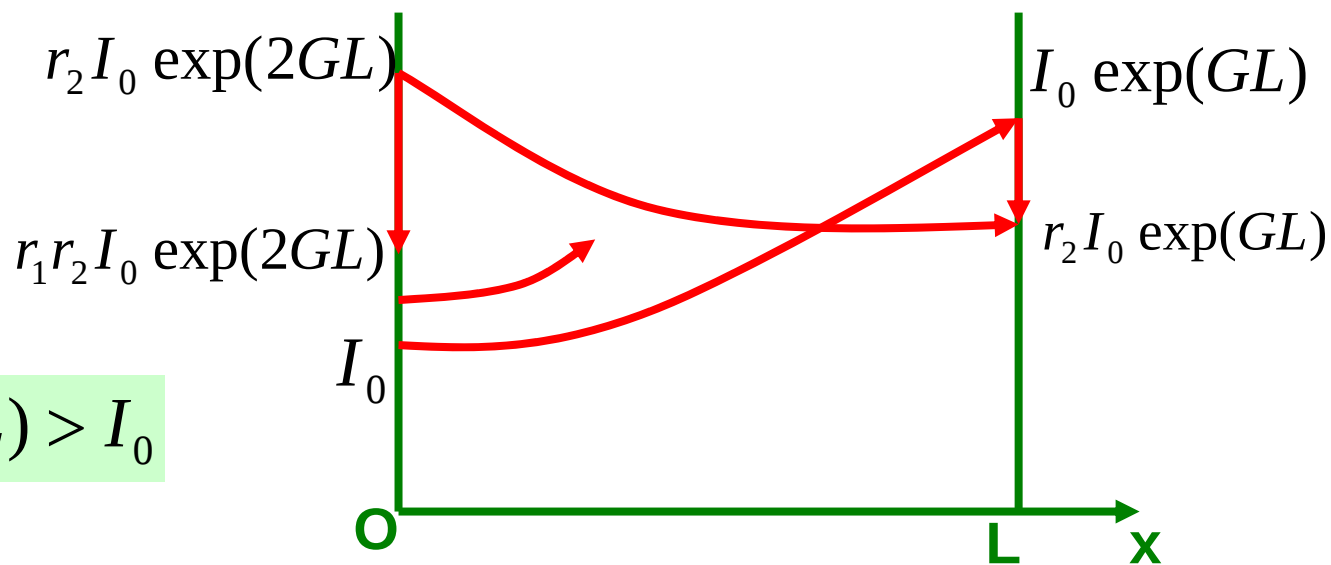
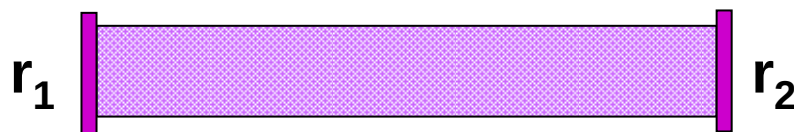
B: 两曲率半径相等的凹面镜



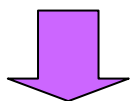
稳定条件示意图

3.3 激光产生的阈值条件

一 阈值条件



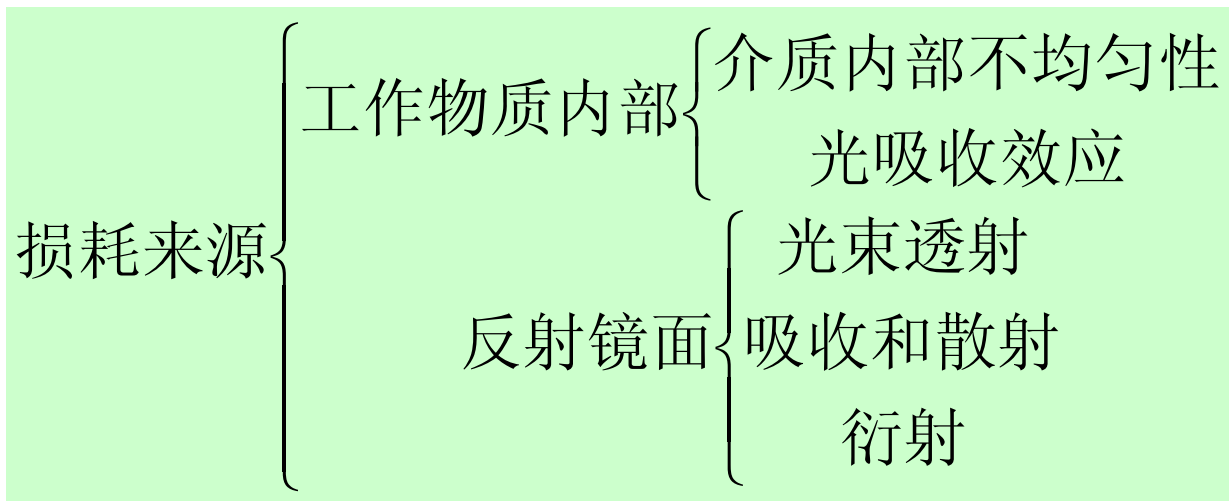
$$r_1 r_2 I_0 \exp(2GL) > I_0$$



$$r_1 r_2 \exp(2GL) > 1$$

阈值条件的推导

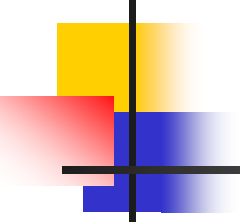
二 激光器的损耗



则形成激光需满足的条件:

$$G \geq \alpha$$

增益阈值 G_t : $G = \alpha$ 时所对应的增益数值



3.4 激光的纵模与频率特性

模式的含义:

- (1) 亥姆霍兹方程的一个特解, 满足波导中心有界、边界趋于无穷时为零等边界条件。 (数学含义)
- (2) 光场沿横截面分布的一种场图。 (物理含义)

纵模: 由整数 q 所表征的腔内纵向的稳定场分布。

横模: 表示垂直于谐振腔方向上的光场的分布。

一 纵模

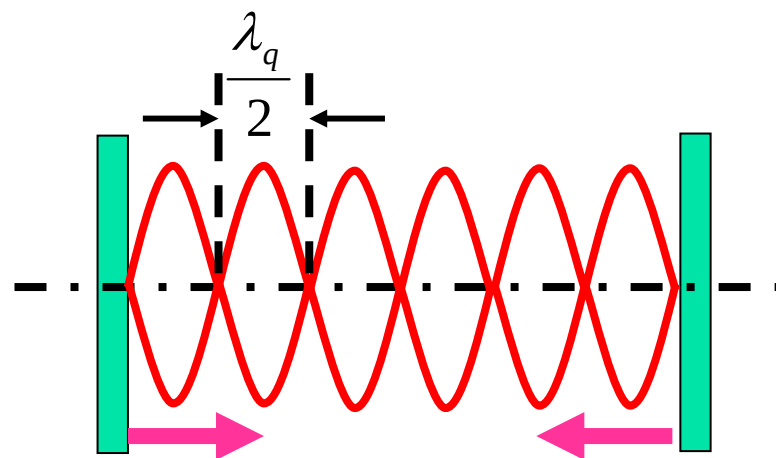
不同q值对应
不同频率

相长干涉条件: $\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot 2\eta L = q \cdot 2\pi (q \in 0, 1, 2, \dots)$

谐振频率: $\nu_q = q \cdot \frac{c}{2\eta L}$

纵模间隔: $\Delta\nu = \frac{c}{2\eta L}$

纵模序数q: 纵向驻波波节数,
即腔轴线上零场强的数目。

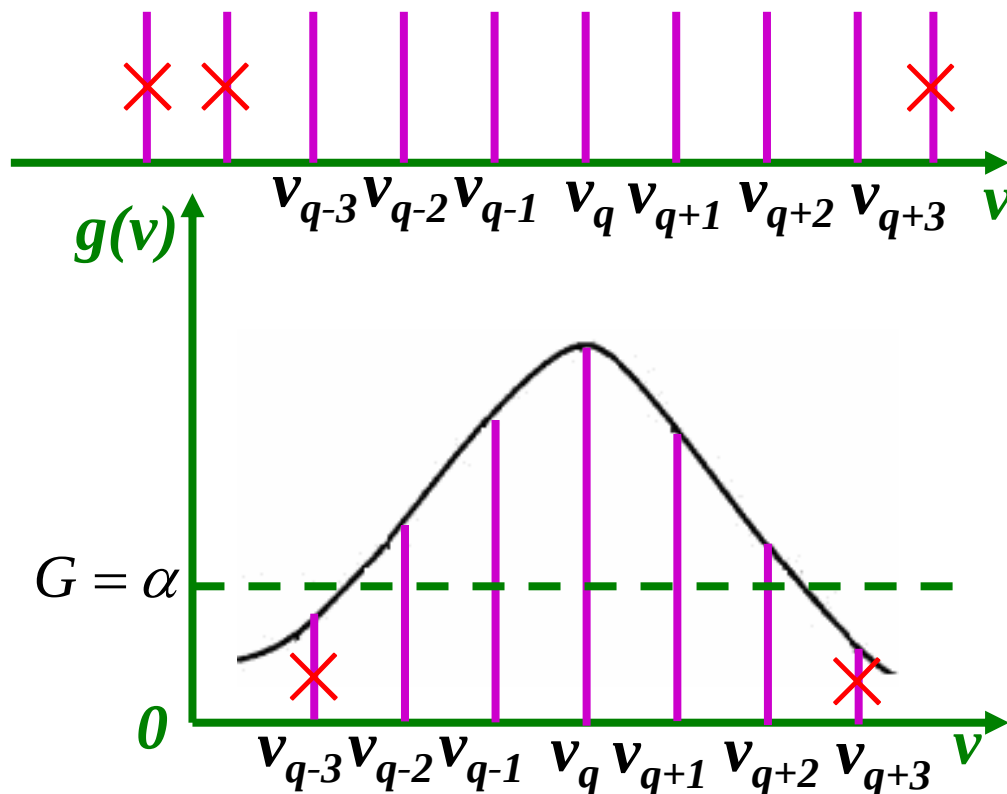


谐振腔内稳定场分布

一 纵模

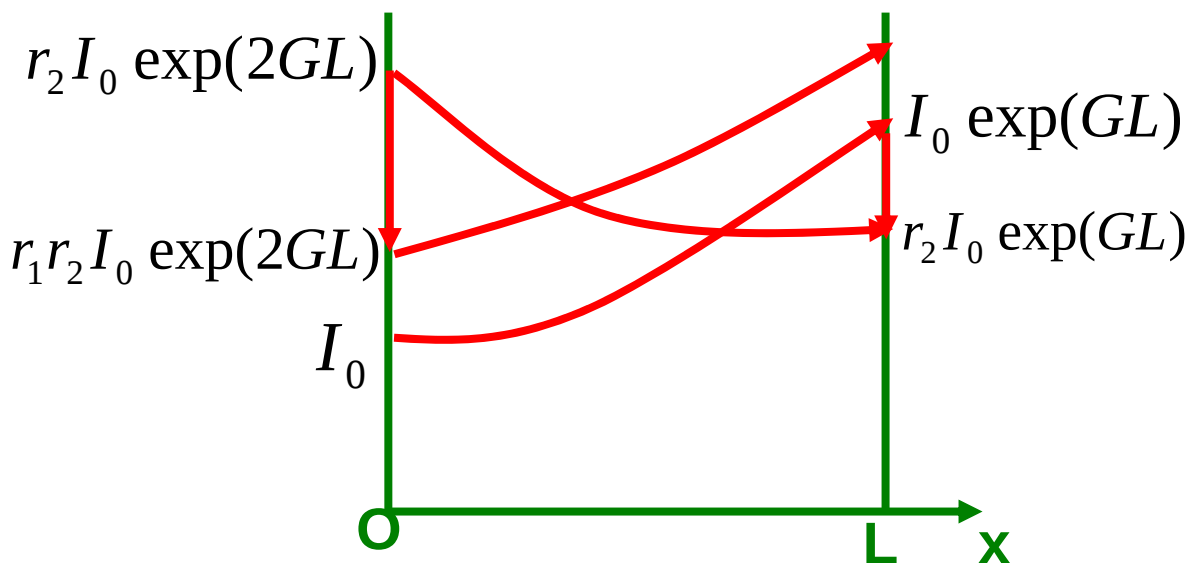
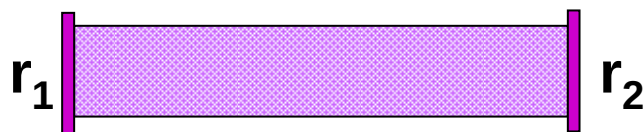
影响纵模个数的因素:

- 激光工作物质
发射谱的线型函数
- 腔体增益和损耗的关系



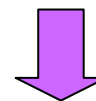
纵模个数与 $g(v)$ 的关系

二 实现稳定状态的条件

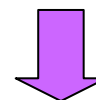


稳态的建立

$$G > G_t = \alpha \quad I \nearrow$$

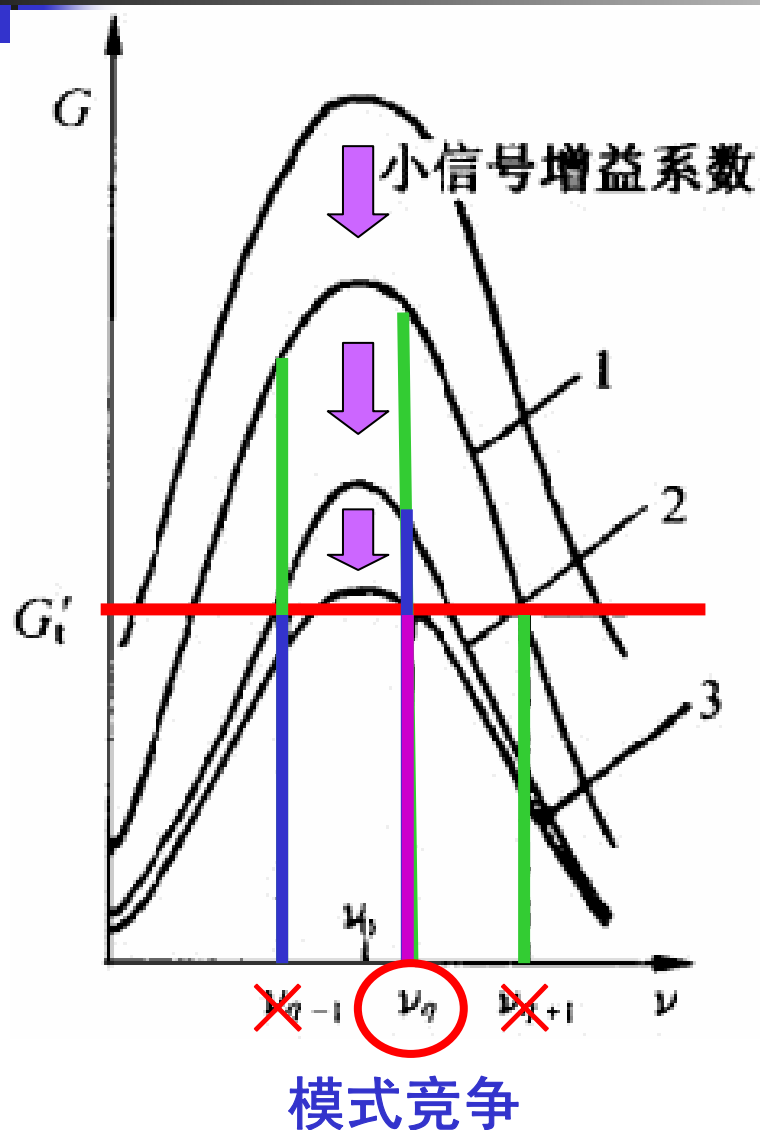


$$G = G_t = \alpha \quad I = I_m$$



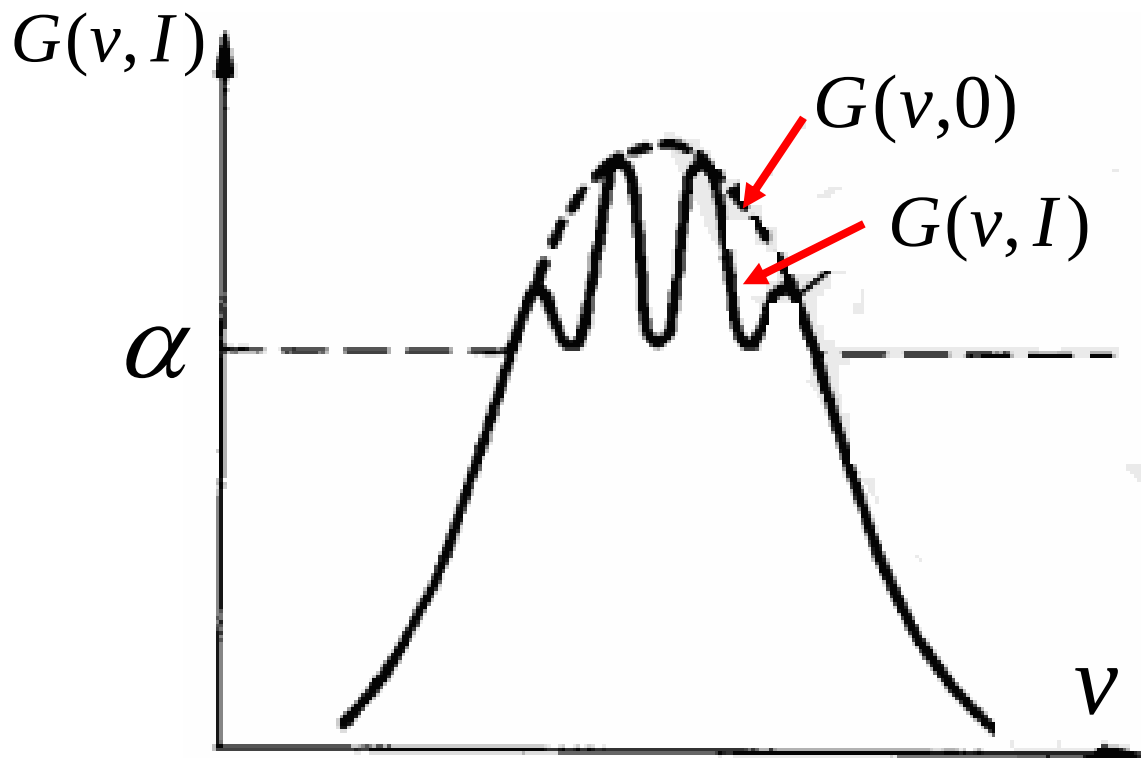
稳定状态

三 均匀加宽谱线情况



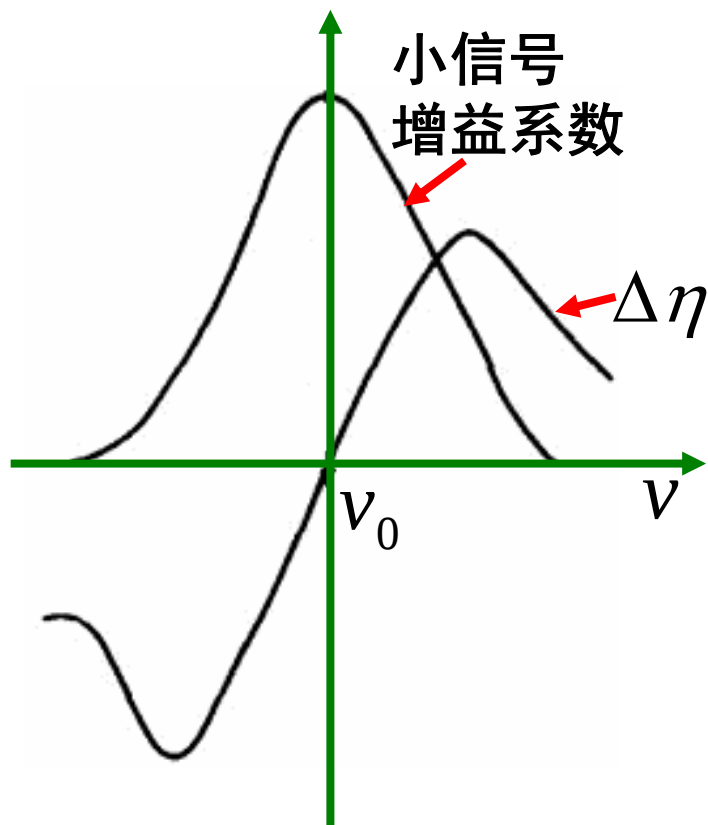
模式竞争： 通过饱和效应
将其它模抑制下去，只有
一个模式能产生纵模振荡
的现象。

四 非均匀加宽谱线情况



多纵模振荡

五 频率牵引效应



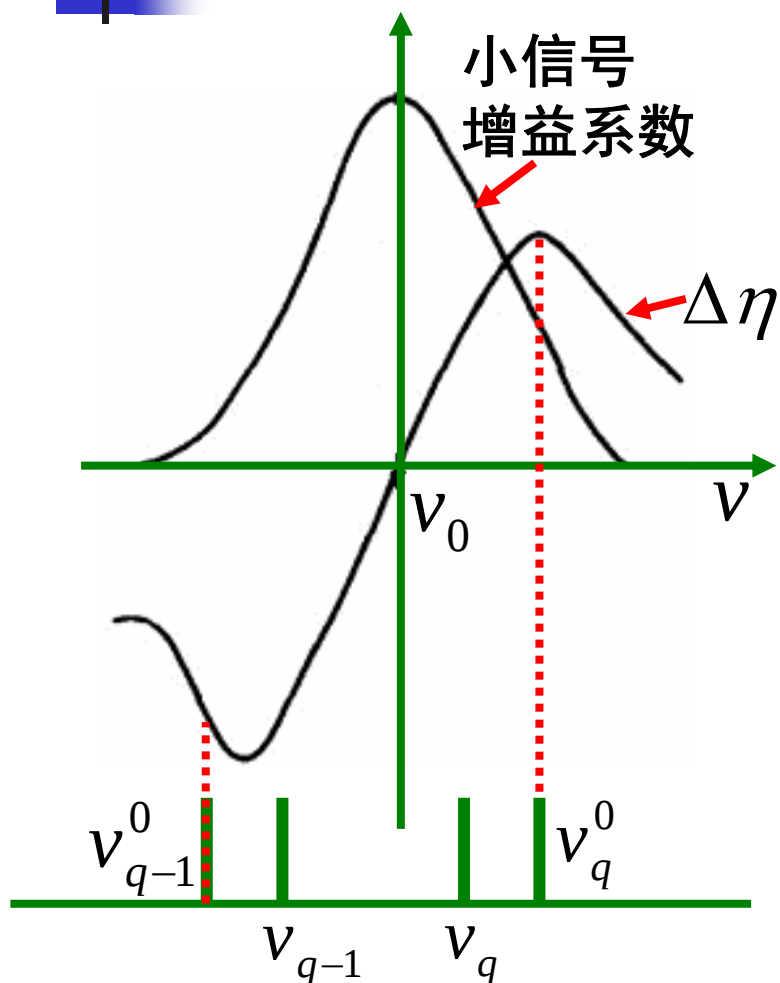
频率牵引效应示意图

$$\eta(\nu) = \eta^0 + \Delta\eta(\nu)$$

$$\nu_q = q \cdot \frac{c}{2\eta L} = q \cdot \frac{c}{2[\eta^0 + \Delta\eta(\nu)]L}$$

$$\nu_q - \nu_q^0 = q \cdot \frac{c}{2\eta^0 L} \left(\frac{1}{1 + \frac{\Delta\eta}{\eta^0}} - 1 \right)$$

五 频率牵引效应



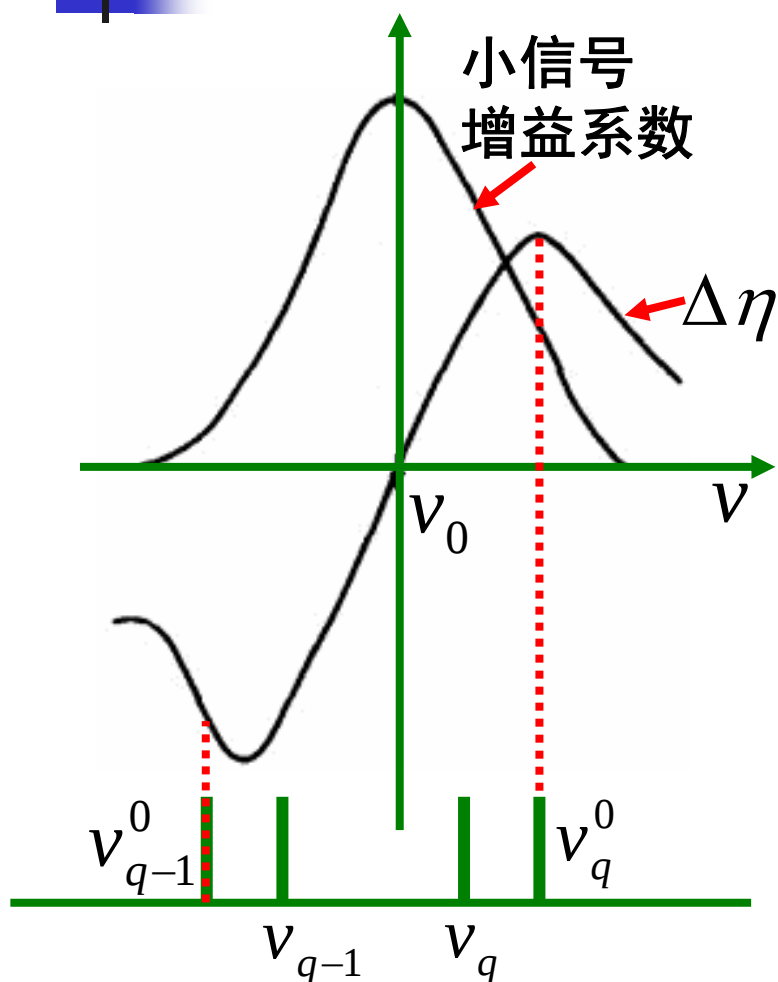
频率牵引效应示意图

$$v_q - v_q^0 = q \cdot \frac{c}{2\eta^0 L} \left(\frac{1}{1 + \frac{\Delta\eta}{\eta^0}} - 1 \right)$$

$$v_q^0 < v_0, \Delta\eta < 0 \Rightarrow v_q - v_q^0 > 0$$

$$v_q^0 > v_0, \Delta\eta > 0 \Rightarrow v_q - v_q^0 < 0$$

五 频率牵引效应



频率牵引效应示意图

频率牵引：在有源谐振腔中，由于增益介质和电磁场相互作用导致介质折射率发生改变，使纵模频率比无源腔纵模频率更靠近中心频率的现象。



3.5 激光的横模和高斯光束

一 横模

1. 横模的概念

横模：表示垂直于谐振腔方向上的**光场分布**

横模的表示方法： TEM_{mnq} ; （TEM：横向电磁场）

q：纵模序数，即纵向驻波波节数

mn：镜面上场的节线数。

基模： $m=n=0$; **高阶模：** m, n 至少有一个不为零

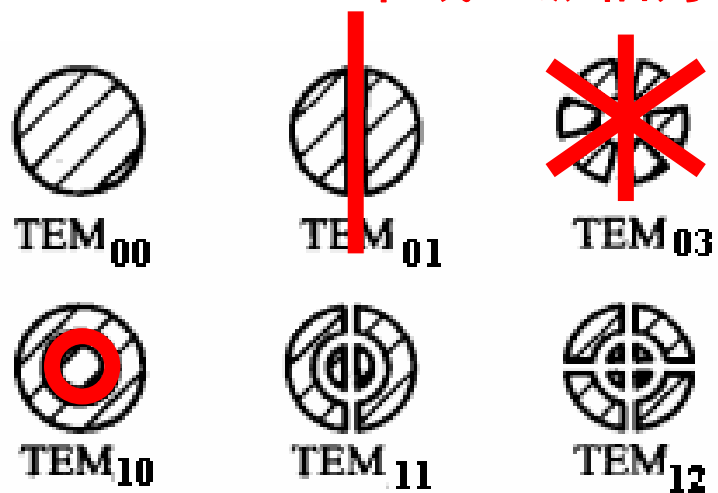
一 横模

1. 横模的概念

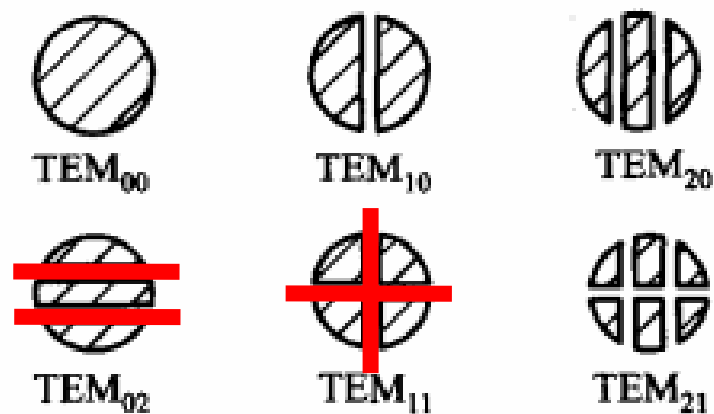
圆形镜 $\begin{cases} m: \text{径向节线数 (暗环数)} \\ n: \text{角节线数 (暗直径数)} \end{cases}$

矩形镜 $\begin{cases} m: \text{纵向节线数} \\ n: \text{横向节线数} \end{cases}$

节线：振幅为0的位置



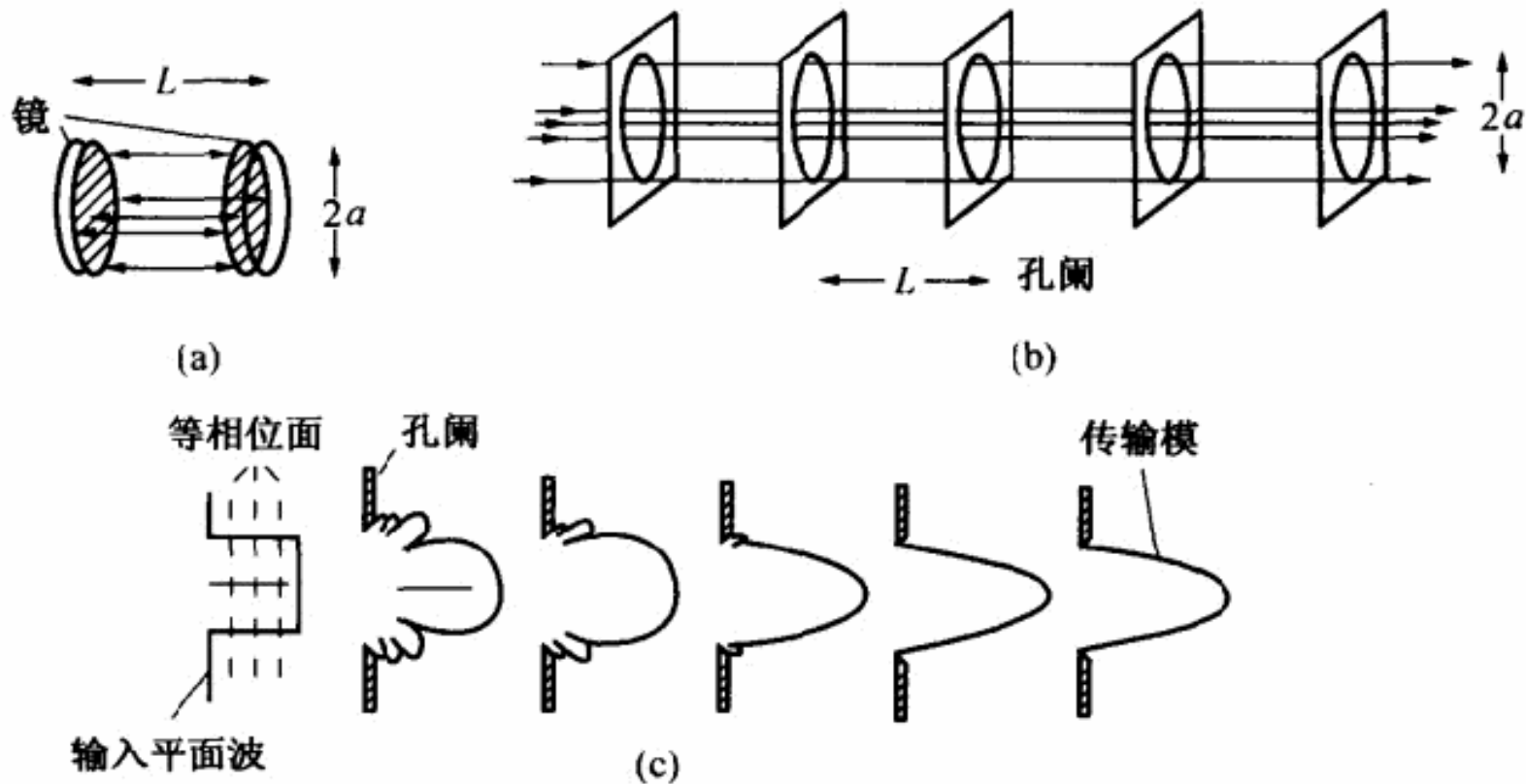
圆形镜谐振腔横模示意图 TEM_{mn}



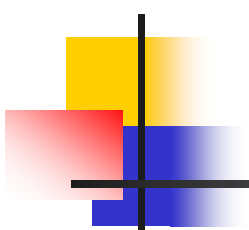
方形镜谐振腔横模示意图 TEM_{mn}

一 横模

2. 横模的形成



横模形成示意图



一 横模

3. 横模的频率

稳定球面镜腔

$$\nu_{mnq} = \frac{c}{2\eta L} \left[q + \frac{1}{\pi} (m + n + 1) \arccos \sqrt{\left(1 - \frac{L}{R_1}\right) \left(1 - \frac{L}{R_2}\right)} \right]$$

共焦腔

$$\nu_{mnq} = \frac{c}{4\eta L} [2q + (m + n + 1)]$$

$$\Delta\nu_{\text{横模}} = \frac{c}{4\eta L} (\Delta m + \Delta n)$$

$$\Delta\nu_{\text{横模}} = \frac{1}{2} \Delta\nu_{\text{纵模}}$$

注：不同阶的横模对应不同的光频率，且与腔种类有关。

二 高斯光束的特性

沿z轴方向传播的高斯光束解析表达式:

$$E(x, y, z) = \underbrace{\frac{E_0}{\omega(z)} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{\omega^2(z)}\right]}_{\text{振幅}} \exp\left\{ -j \underbrace{\left[k \left(z + \frac{x^2 + y^2}{2R(z)} \right) - \Phi(z) \right]}_{\text{相位}} \right\}$$

振幅

相位

其中:

$$\begin{cases} \omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z\lambda}{\pi\omega_0^2} \right)^2} \\ R(z) = z \left[1 + \left(\frac{\pi\omega_0^2}{z\lambda} \right)^2 \right] \\ \Phi(z) = \arctan\left(\frac{z\lambda}{\pi\omega_0^2} \right) \end{cases}$$

$R(z)$: z坐标处高斯光束的等相面曲率半径

$\omega(z)$: z坐标处的光斑半径

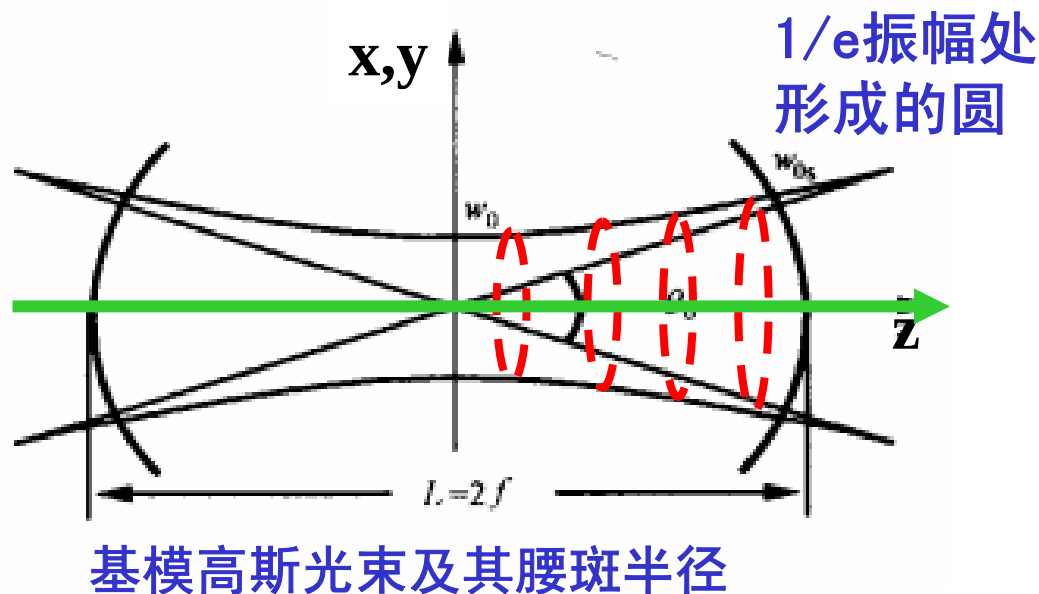
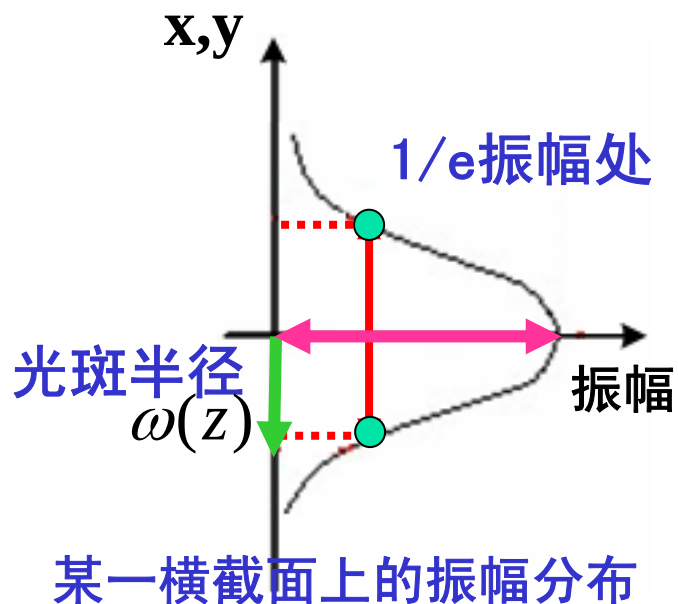
ω_0 : z=0处的光斑半径, 也称束腰

二 高斯光束的特性

1. 振幅分布和光斑尺寸

振幅分布:

$$|E(x, y, z)| = \frac{E_0}{\omega(z)} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{\omega^2(z)}\right]$$

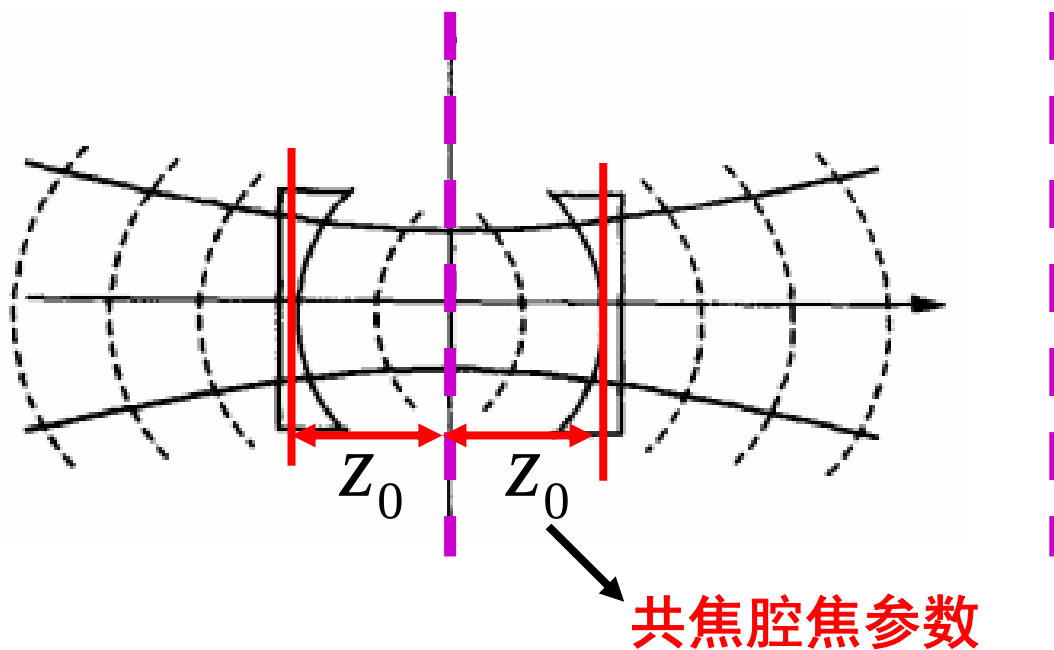


二 高斯光束的特性

2. 等相面的分布

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda z} \right)^2 \right]$$

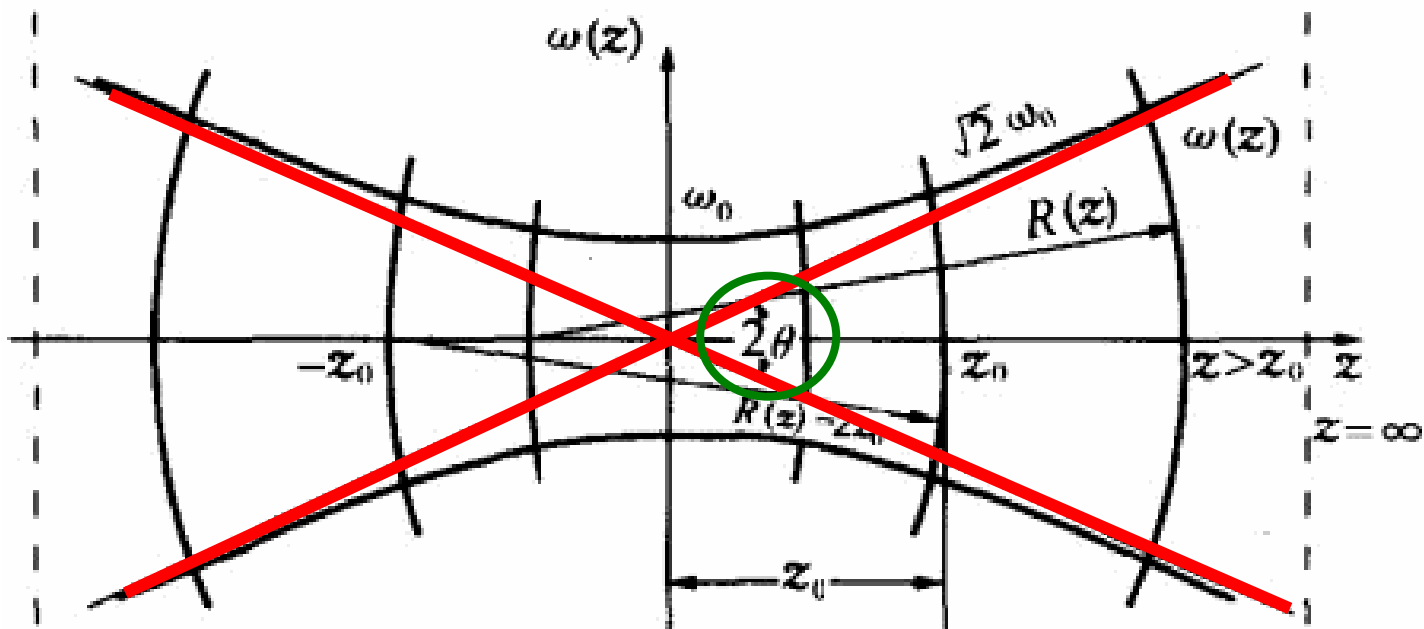
$$z_0 = \left(\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda} \right)$$



高斯光束等相面的分布

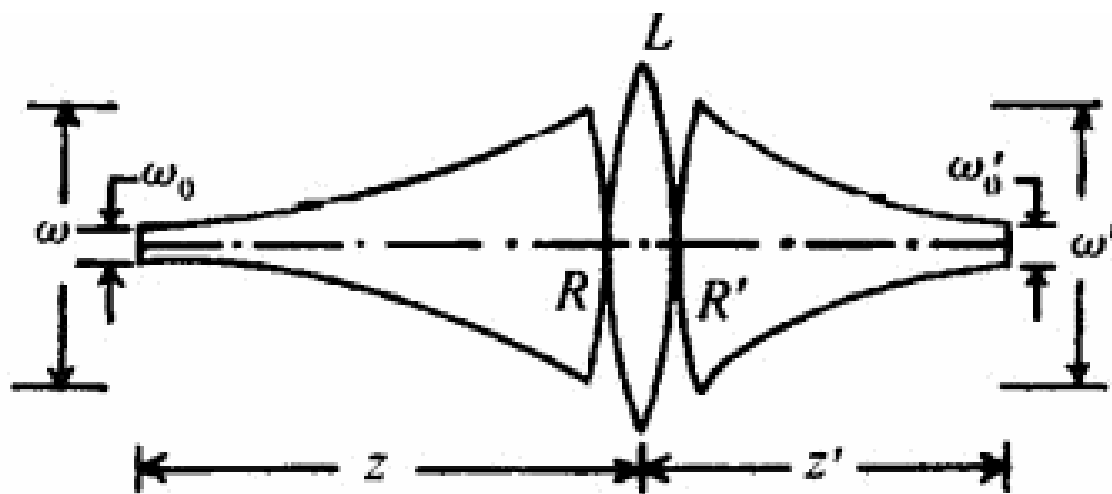
3. 远场发散角

$$2\theta = 2 \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{d\omega(z)}{dz} = 2 \frac{\lambda}{\pi\omega_0}$$



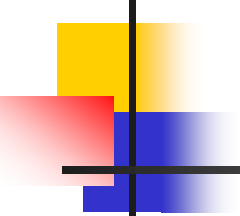
基模高斯光束及其腰斑半径

三 透镜对高斯光束的变换



透镜对高斯光束的变换

$$\begin{cases} \frac{1}{R} - \frac{1}{R'} = \frac{1}{f} \\ \omega' = \omega \\ \omega_0'^2 = \omega^2 \left[1 + \left(\frac{\pi \omega^2}{\lambda R} \right)^2 \right]^{-1} \\ z = R \left[1 + \left(\frac{\lambda R}{\pi \omega^2} \right)^2 \right]^{-1} \end{cases}$$



四 高斯光束的聚集与准直

1. 聚焦

(1) 短焦距透镜

$$\omega'_0 = \frac{\lambda f}{\pi \omega'}$$

方法： 缩短焦距或加大透镜上的光斑尺寸

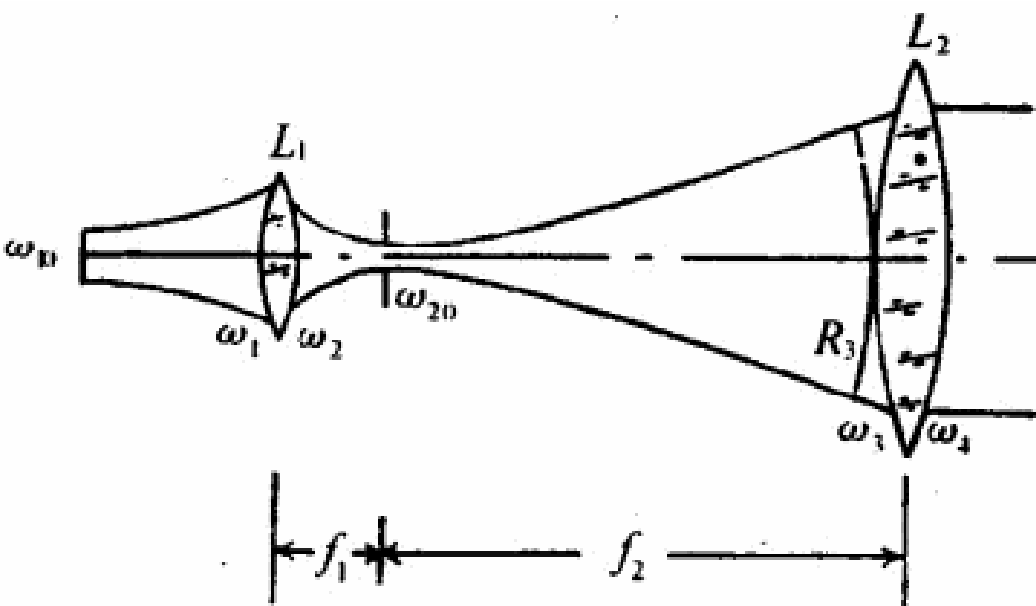
(2) 入射光束束腰位置在透镜焦点附近

$$\omega'_0 = \frac{\lambda f}{\pi \omega_0}$$

方法： 增大入射光束的束腰

四 高斯光束的聚集与准直

2. 准直



方法：组合透镜，使高斯光束射入短焦距透镜，其出射光束的束腰出现在透镜的焦点附近。

出射光束的发散角：

$$2\theta_4 = 2 \frac{\lambda}{\pi \omega_1} \frac{f_1}{f_2}$$

高斯光束的准直示意图

3.6 连续激光器的输出功率与最佳透过率

均匀加宽谱线单模激光器谐振腔内稳定状态下的内部光强:

$$I = I_s \left[\frac{2G_0 L}{-\ln(1-a-t)} - 1 \right]$$

激光器的输出功率:

$$P = \frac{1}{2} A I_s t \left[\frac{2G_0 L}{-\ln(1-a-t)} - 1 \right] \approx \frac{1}{2} A I_s t \left(\frac{2G_0 L}{a+t} - 1 \right)$$

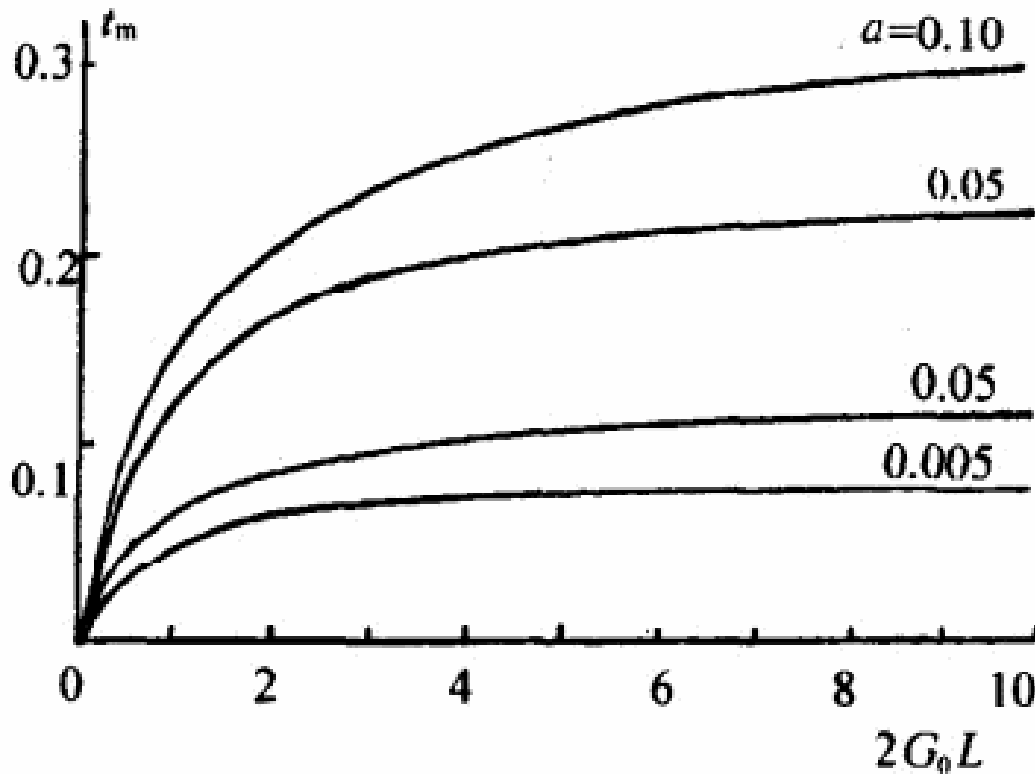
最佳透过率:

$$t_m = \sqrt{2G_0 L a} - a$$

激光器最大输出功率:

$$P_m = \frac{1}{2} A I_s \left(\sqrt{2G_0 L} - \sqrt{a} \right)^2$$

3.6 连续激光器的输出功率与最佳透过率



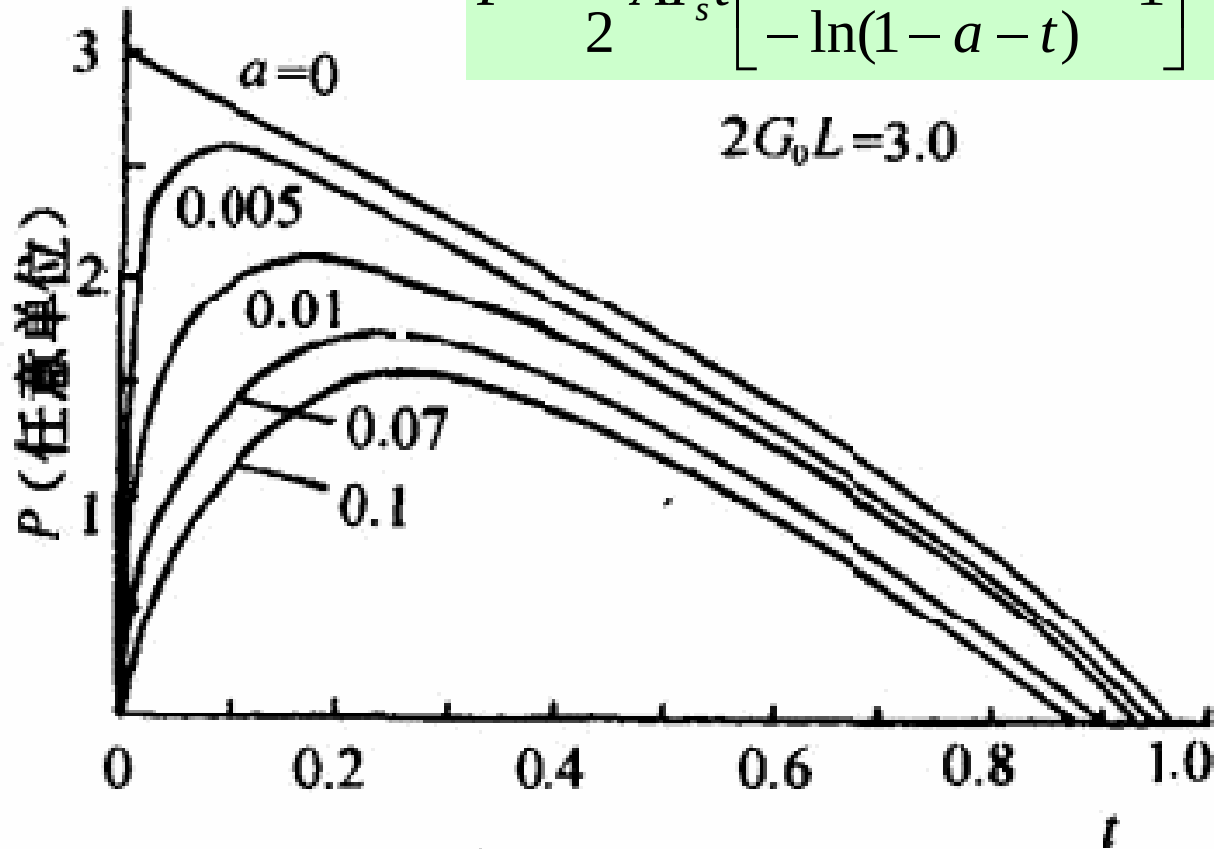
$$t_m = \sqrt{2G_0La} - a$$

$t_m - 2G_0L$ 关系曲线

3.6 连续激光器的输出功率与最佳透过率

$$P = \frac{1}{2} AI_s t \left[\frac{2G_0 L}{-\ln(1-a-t)} - 1 \right] \approx \frac{1}{2} AI_s t \left(\frac{2G_0 L}{a+t} - 1 \right)$$

$$2G_0 L = 3.0$$



P-t关系曲线