

# • 第七章 激光选模、调谐、稳频技术

希望有高的光束质量:方向性好,单色性好.(应用要求)

- **激光横模选择技术:**从激光振荡模式中选择出单一横模(通常为基横模),抑制其它模式振荡。一般而言,基模衍射损耗最小,能量集中在腔轴附近,光束发散角最小,方向性最好。
- **激光纵模选择技术:** 限制激光器的振荡纵模数目,选出所需频率的单一纵模激光,改善激光的单色性。
- **激光调谐技术:** 通过色散光学元件的调节,在阈值以上的可振荡频率范围内,改变输出激光频率(波长)。
- **激光稳频技术:** 在选定单一纵模频率的基础上,采取频率-腔长反馈控制方法,使输出激光频率在需要的精度范围内保持稳定。

- 激光选模技术所遵循的原则:
- 所选择的模式满足阈值条件,而舍弃的模式不满足阈值条件。

$$G_{\text{所需模式}} > G_{t\text{所需模式}} = \frac{\gamma_{\text{所需模式}}}{\ell}$$

$$G_{\text{舍弃模式}} < G_{t\text{舍弃模式}} = \frac{\gamma_{\text{舍弃模式}}}{\ell}$$

$$G_{t\text{所需模式}} - G_{t\text{舍弃模式}}, \uparrow$$

$$\gamma_{\text{舍弃模式}} - \gamma_{\text{所需模式}}, \uparrow,$$

通常采用增加模式 损耗差异的方法.

- 第一节 激光横模选择技术

- 通常选出基横模，舍弃其它横模。
- 1、改变谐振腔的结构参数以获得各横模衍射损耗的较大差别，提高谐振腔的选模能力；
- 2、在一定的谐振腔内插入附加的选模光学元件，提高谐振腔的选模能力。
- A、谐振腔参数 $g$ 和 $F$ 的选择法；
- B、小孔光阑法选模；
- C、腔内插入透镜选横模；
- D、非稳腔选横模。

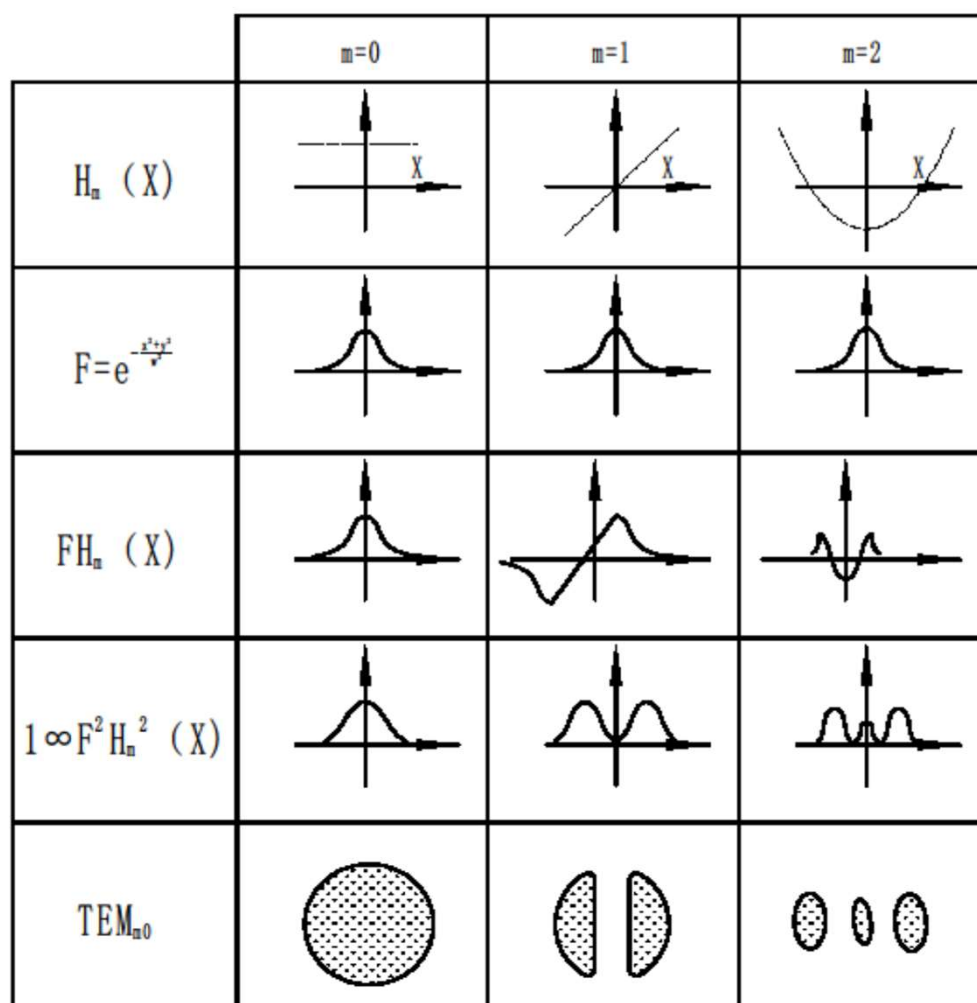


图2-7-3 矩形镜共焦腔高阶横模在整个镜面上的  
的振幅分布和强度分布

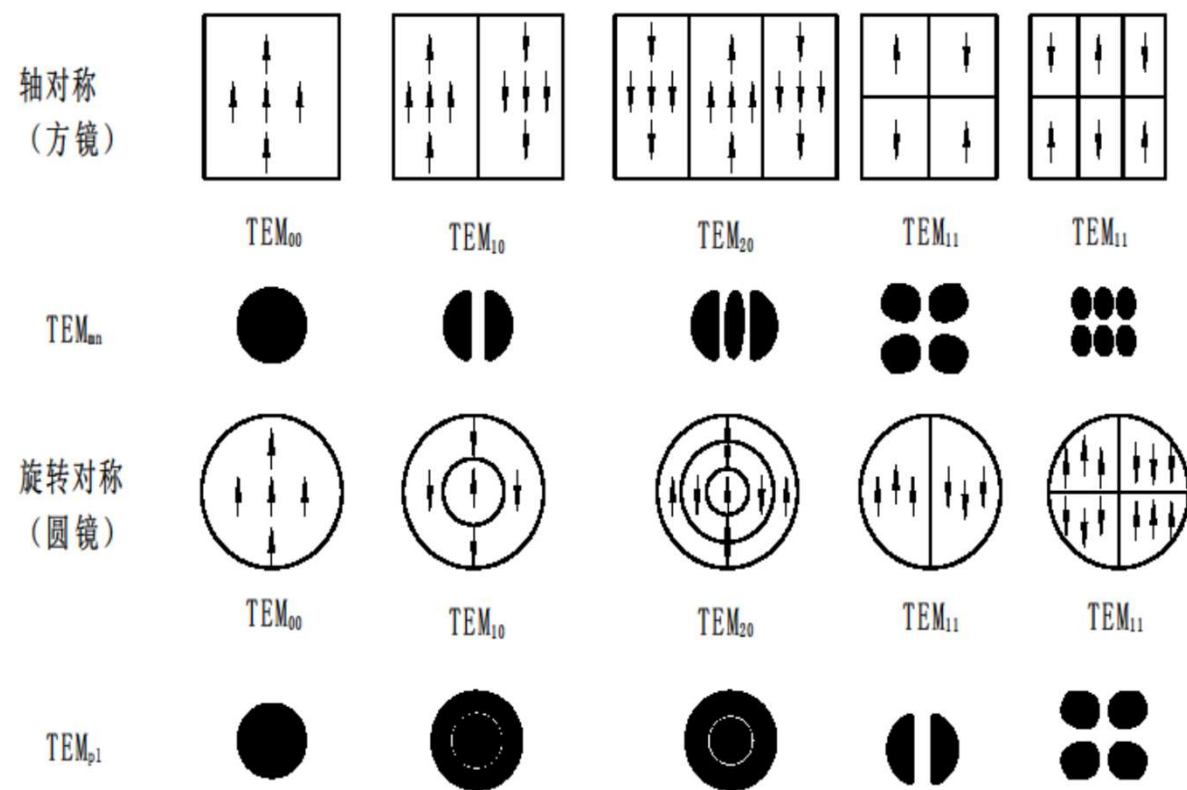


图2-2-4 方形反射镜和圆形反射镜的横  
模图形及线偏振腔模结构

- 单程衍射损耗

本征值：

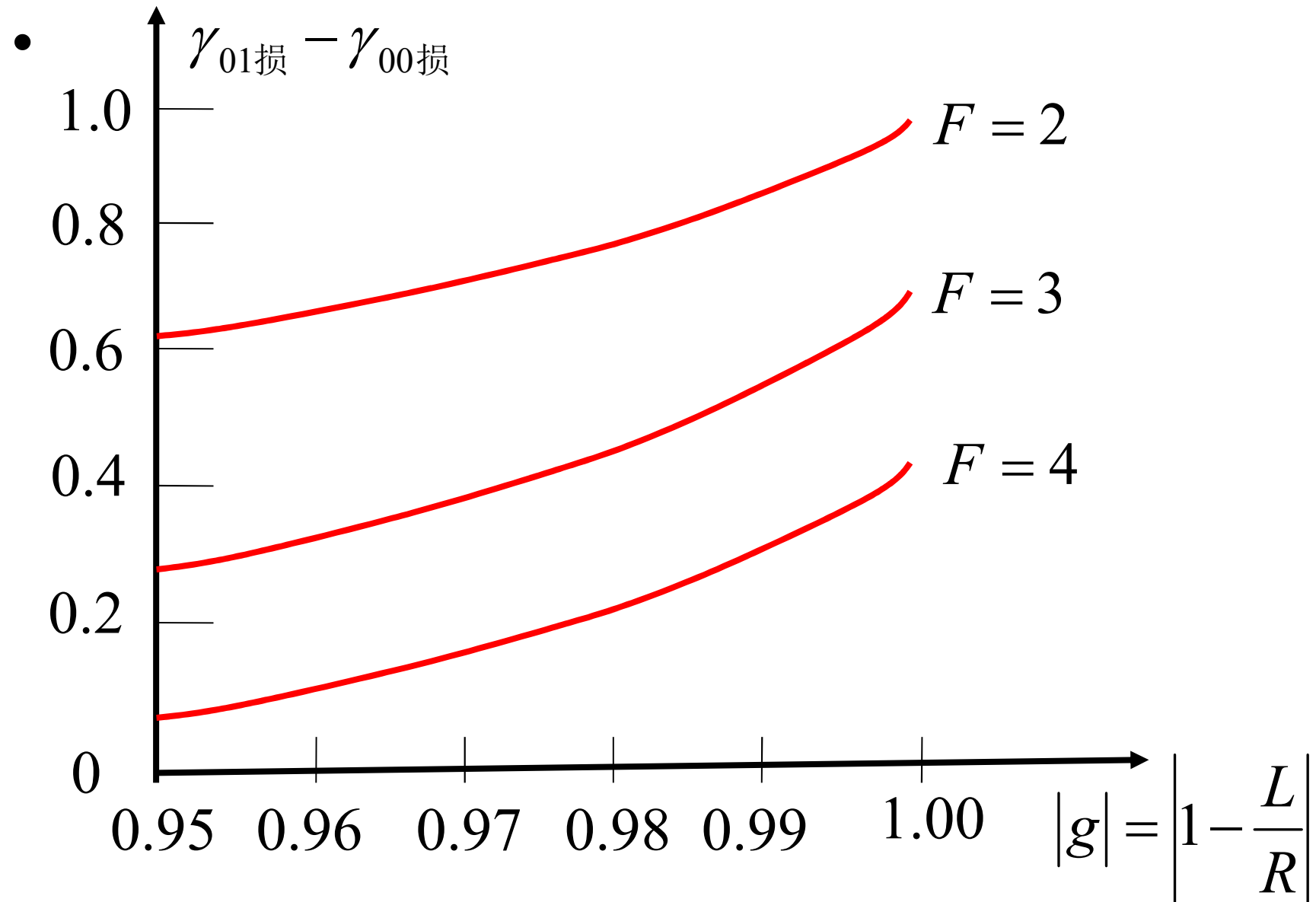
$$\gamma_{mn} = \gamma_m \gamma_n = (4FRom^{(1)}(c,1)Ron^{(1)}(c,1))^{-1} e^{i(kL - (m+n+1)\frac{\pi}{2})}$$

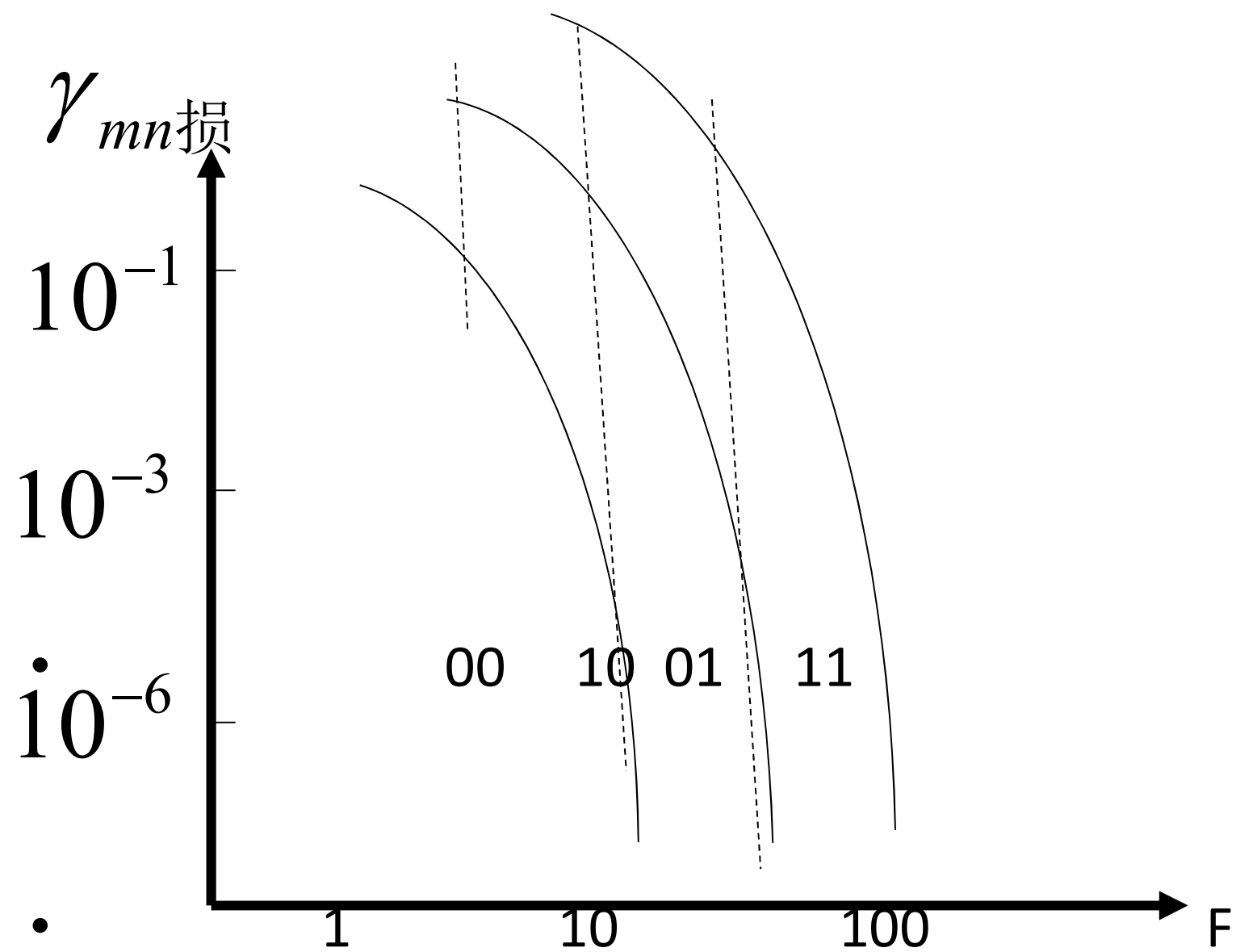
决定了模的相移和损耗

其中  $Ron^{(1)}(c,1), Rom^{(1)}(c,1)$  为径向长椭圆函数

$$\begin{aligned} \gamma_{mn \text{ 损}} &= \frac{|u_q|^2 - |u_{q+1}|^2}{|u_q|^2} = 1 - e^{-2\alpha} = 1 - \left| \frac{1}{\gamma_{mn}} \right|^2 \\ &= 1 - 16F^2 (R_{om}^{(1)}(2\pi F, 1) R_{on}^{(1)}(2\pi F, 1))^2 \end{aligned}$$

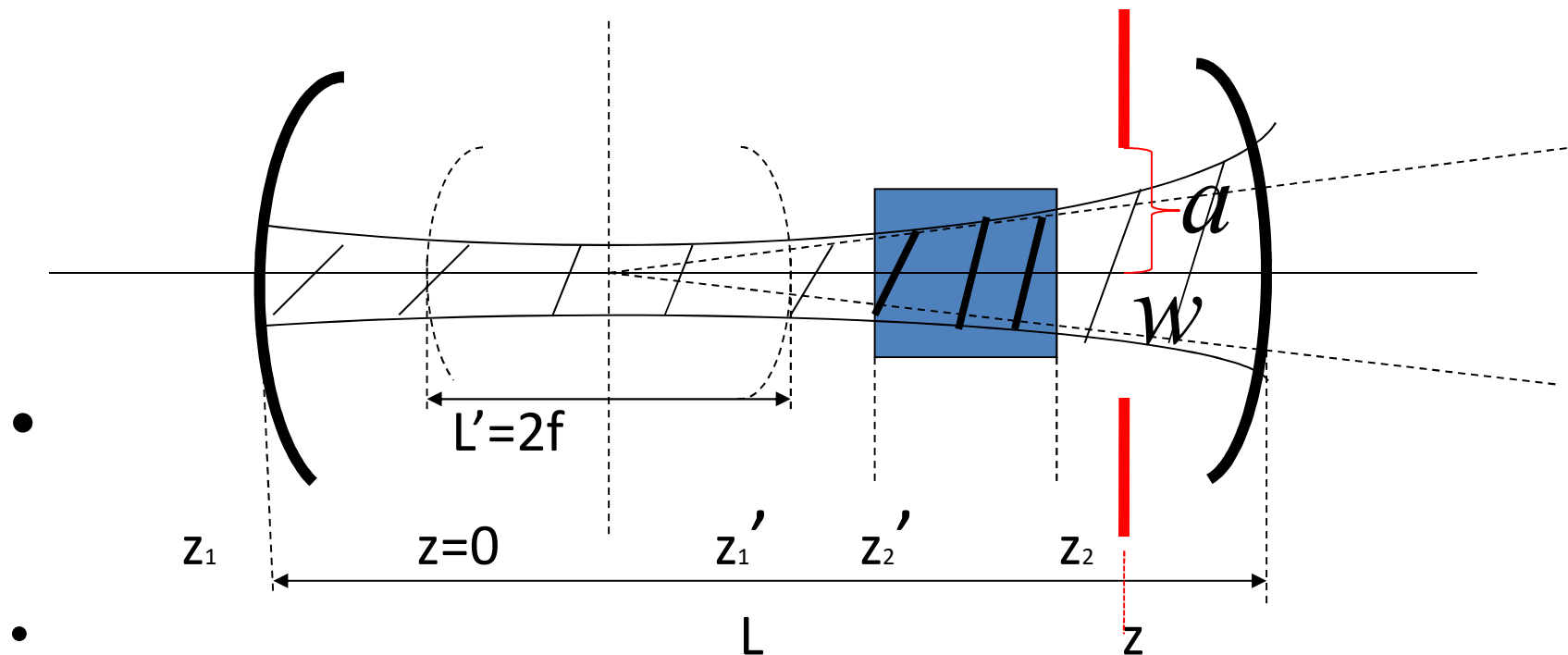
- A、谐振腔参数 $g$ 和 $F$ 的选择法；同时要考虑模体积







- B、小孔光阑法选模；



理论和实验都表明,  $\frac{3}{2}w$  可以作为可靠的孔径下限

- 博伊德—戈登求出,腔内一点(x, y, z)的行波场为:

$$U_{mn}(x, y, z) = U_0 \left( \frac{2}{1 + \xi^2} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\Gamma\left(\frac{m}{2} + 1\right) \Gamma\left(\frac{n}{2} + 1\right)}{\Gamma(m + 1) \Gamma(n + 1)} \times e^{-\frac{kw^2}{L(1 + \xi^2)}} \\ \times H_m\left(X \left( \frac{2}{(1 + \xi^2)} \right)^{\frac{1}{2}}\right) \times H_n\left(Y \left( \frac{2}{(1 + \xi^2)} \right)^{\frac{1}{2}}\right) \\ \times e^{i\left(k\frac{L}{2}(1 + \xi) + \frac{k\xi}{1 + \xi^2} \frac{w^2}{L}\right) + i(m + n + 1)\left(\frac{\pi}{2} - \psi\right)}$$

其中 :  $w^2 = x^2 + y^2$ ,  $\psi = \arctan\left(\frac{1 - \xi}{1 + \xi}\right)$ ,

$U_0$ 与坐标无关 ,  $X = x \frac{\sqrt{2\pi F}}{a}$ ,  $Y = y \frac{\sqrt{2\pi F}}{a}$ ,

$\Gamma\left(\frac{m}{2} + 1\right) = \left(\frac{m}{2} + 1\right) \Gamma\left(\frac{m}{2}\right)$ ,  $\Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = \sqrt{\pi}$ ,  $\Gamma(m) = m!$ 为伽马函数

对于TEM<sub>00</sub>模，有：

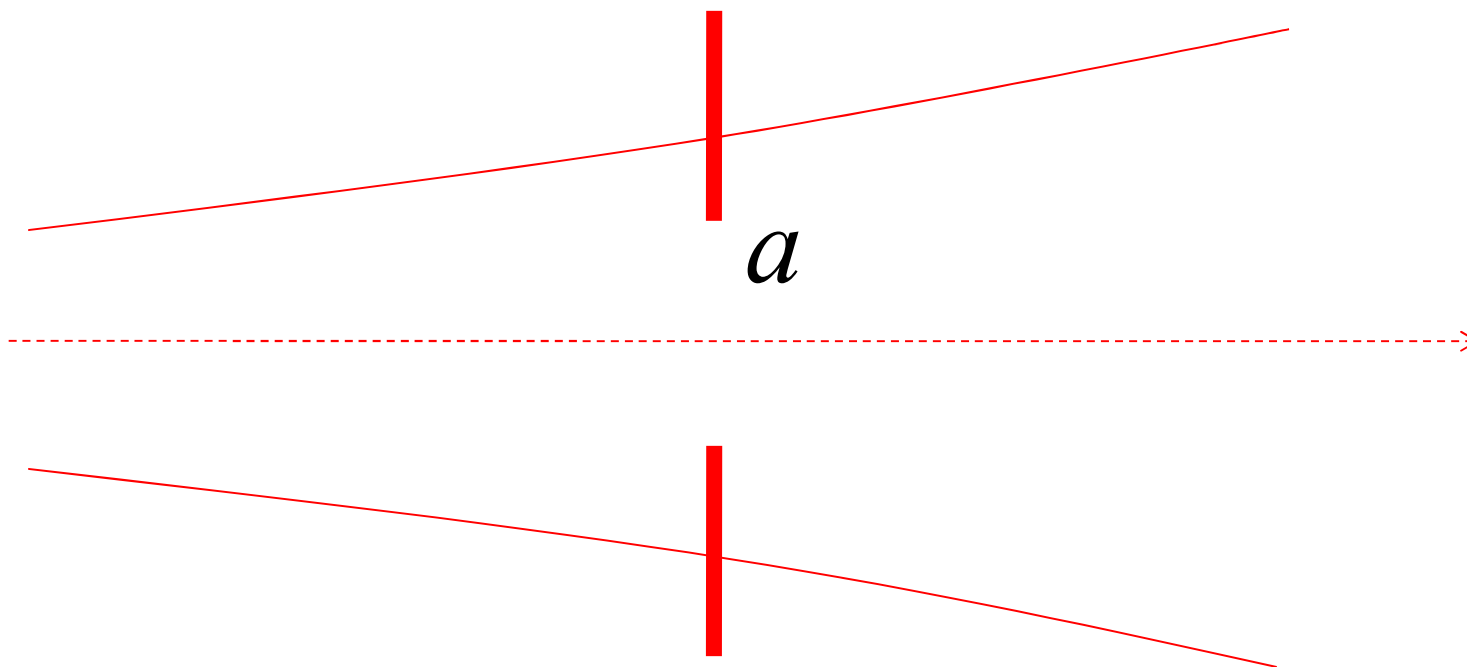
$$E_{00}(x, y) = C_{00} e^{-\frac{x^2+y^2}{w(z)^2}}, \rightarrow E_{00}(r) = E_0 e^{-\frac{r^2}{w(z)^2}}$$

$$I_{00}(x, y) = A e^{-2\frac{x^2+y^2}{w(z)^2}}, \rightarrow I_{00}(r) = I_0 e^{-\frac{2r^2}{w(z)^2}},$$

$$w(z) = \left(\frac{L}{k}(1 + \xi^2)\right)^{\frac{1}{2}} = w_0 \left(1 + \frac{z^2}{f^2}\right)^{\frac{1}{2}},$$

其中： $f = \frac{L'}{2} = \frac{R'}{2}$ ，而 $w_0 = \sqrt{\frac{\lambda L'}{2\pi}}$ ，为 $z = 0$ 光斑半径，束腰半径

•



高斯光束通过半径为  $a$  的圆孔后功率  $P_a$  与总的功率  $P_\infty$  之比:

$$\text{功率透过率 } T = \frac{P_a}{P_\infty} = \frac{\int_0^a \int_0^{2\pi} I(r) 2\pi r dr d\theta}{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} I(r) 2\pi r dr d\theta} = 1 - e^{-\frac{2a^2}{w^2(z)}}$$

- 理论和实验都表明:  $\frac{3}{2}w$  可以作为可靠的孔径下限

$\sim 99\%$

$\sim 86\%$

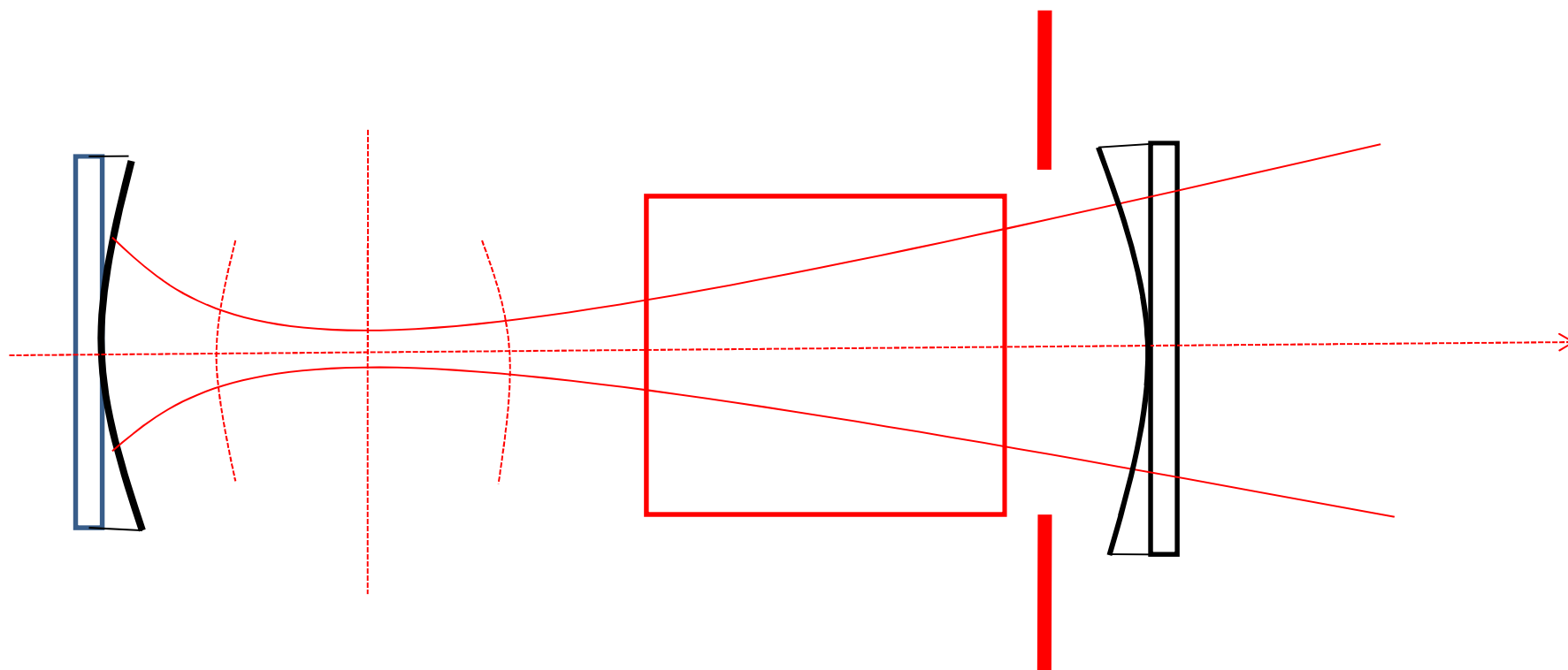
$d = 2w$

$d = \pi w$

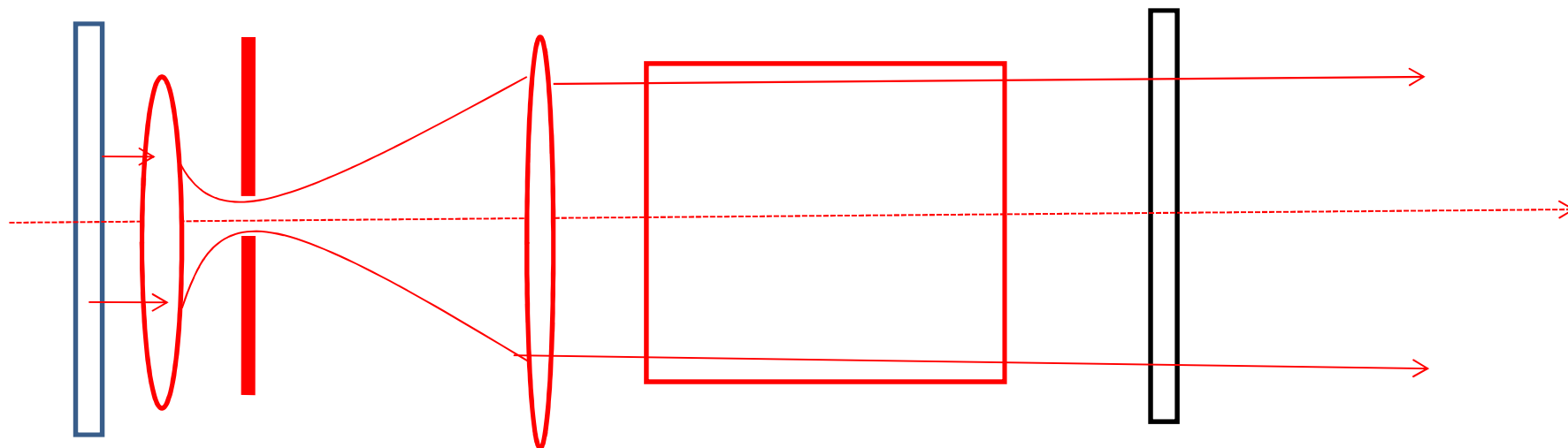
$T$

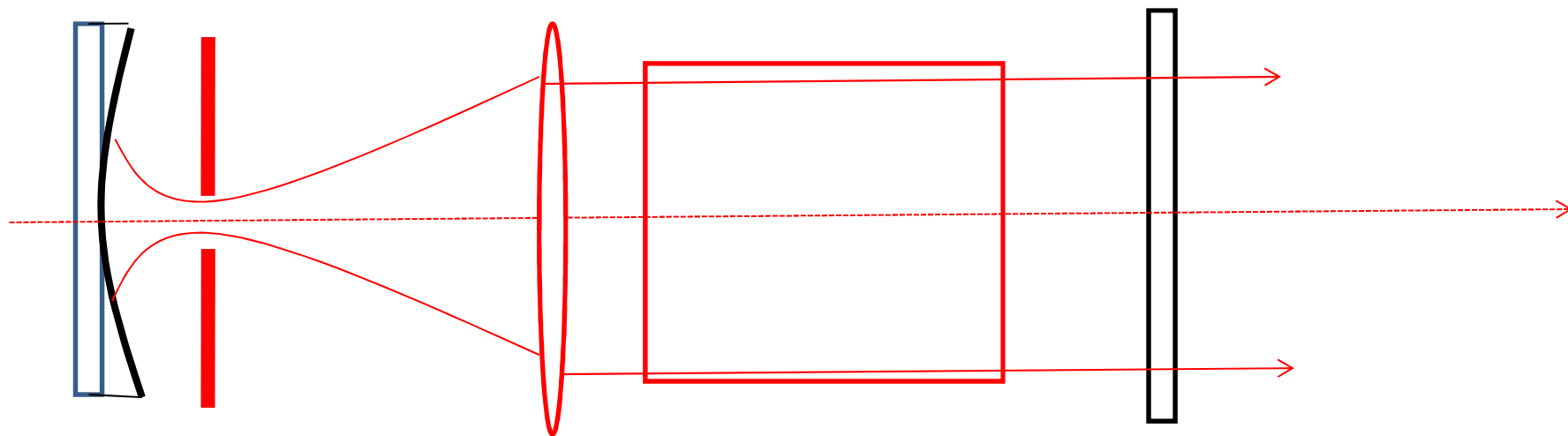
$a/w$

$d = 2a$

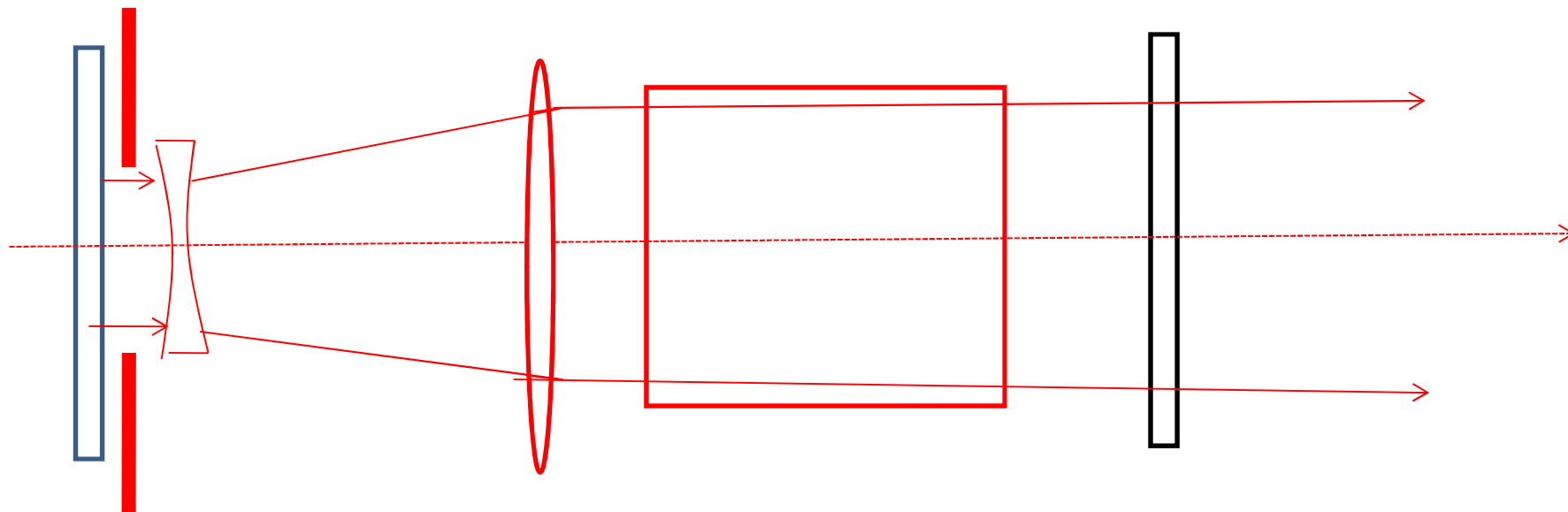


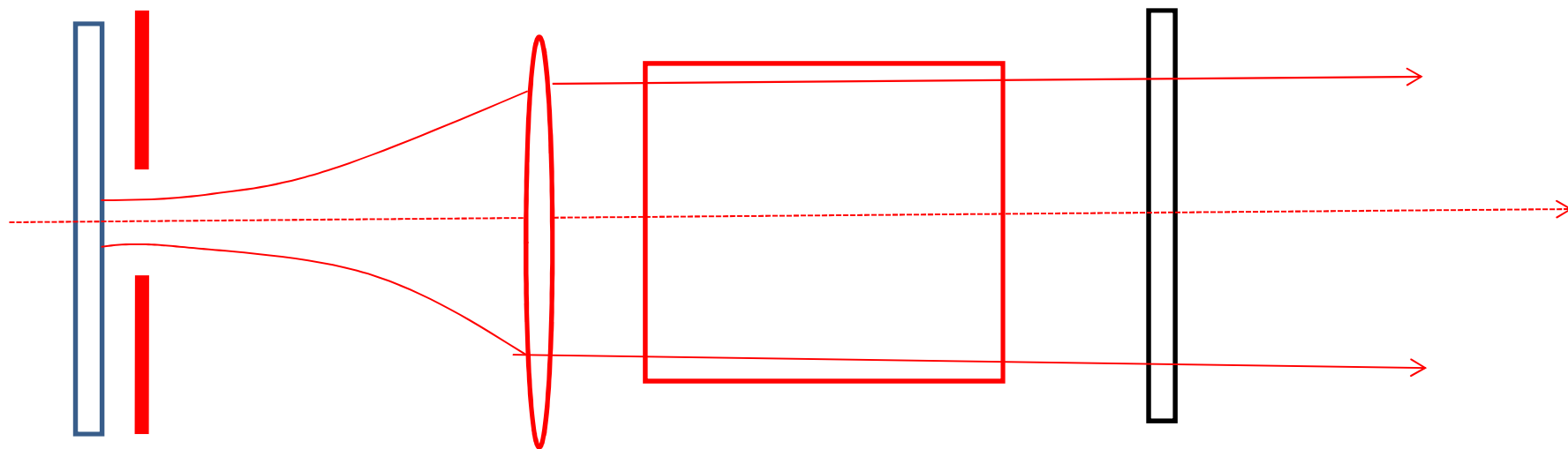
- C、腔内插入透镜选横模；











- D、非稳腔选横模。（模体积大）
- 非稳腔的几何偏折损耗大，易于实现基模振荡，获得接近于衍射极限的单模输出的高质量光束。

- 非稳腔(用几何光学定性描述)

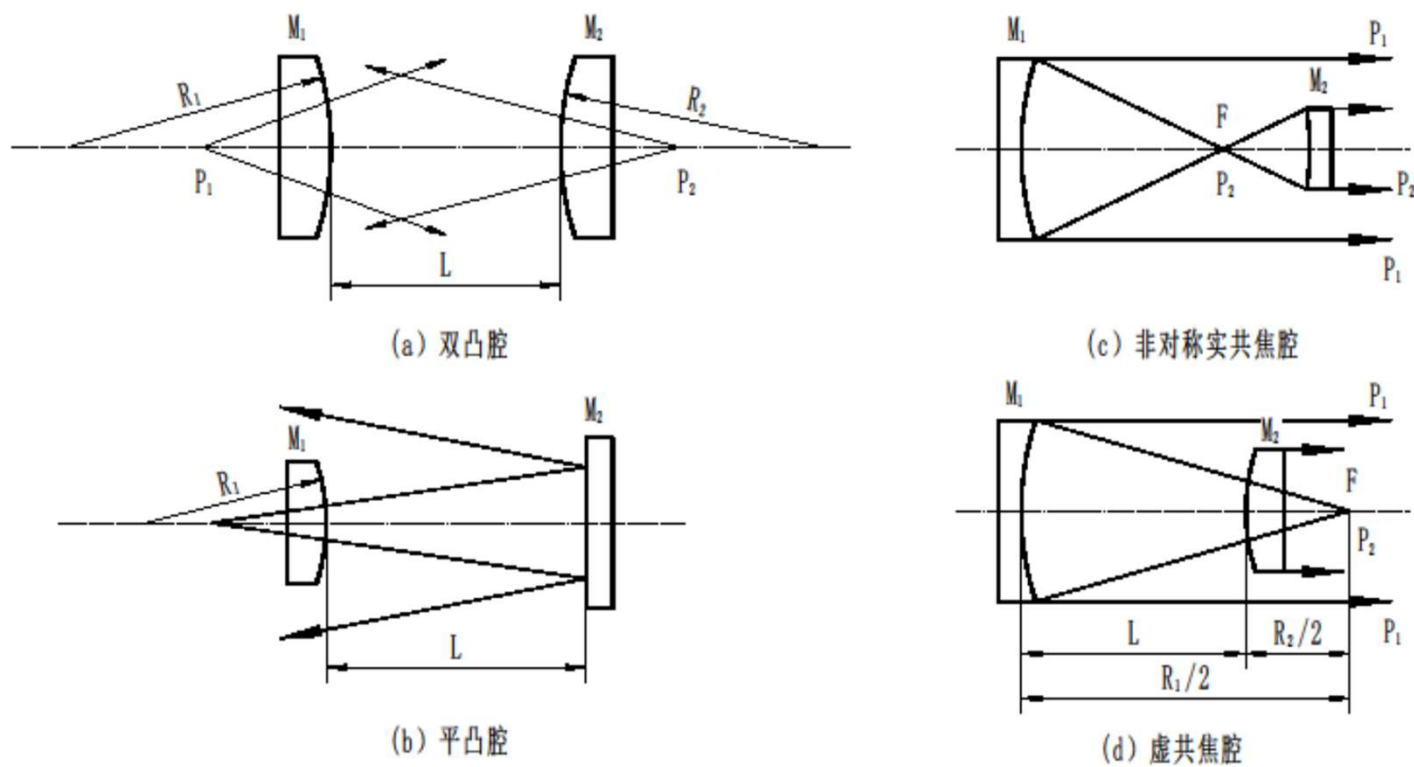


图2-9-1 非稳定腔的四种主要形式

(a) 双凸腔；(b) 平凸腔；  
(c) 非对称实共焦腔；(d) 虚共焦腔；

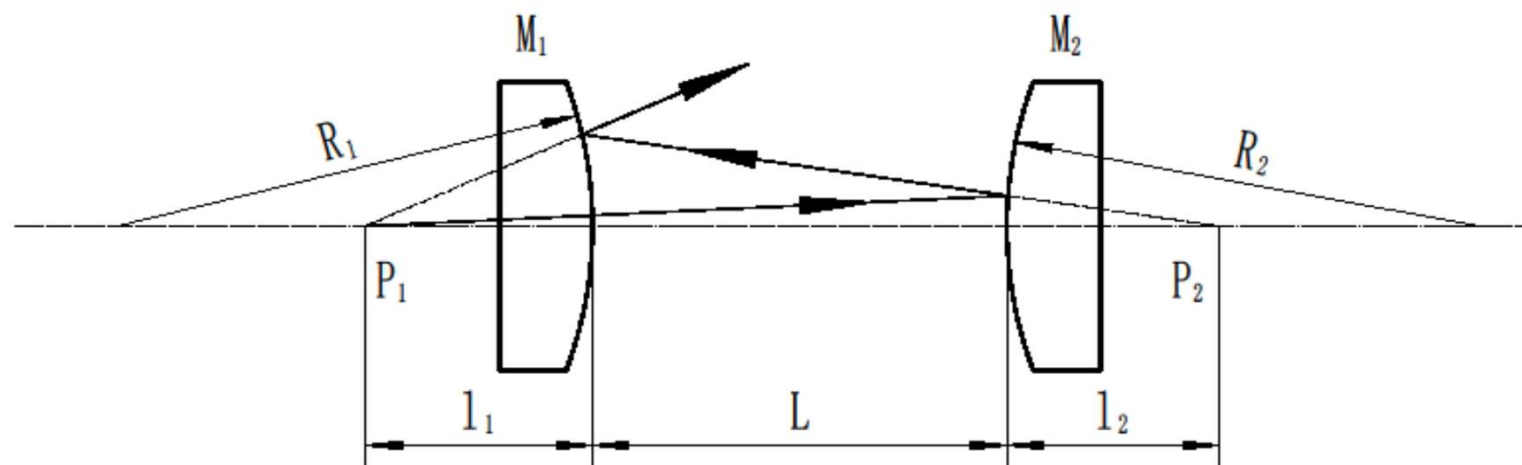


图2-9-3 双凸腔中光线传输路径

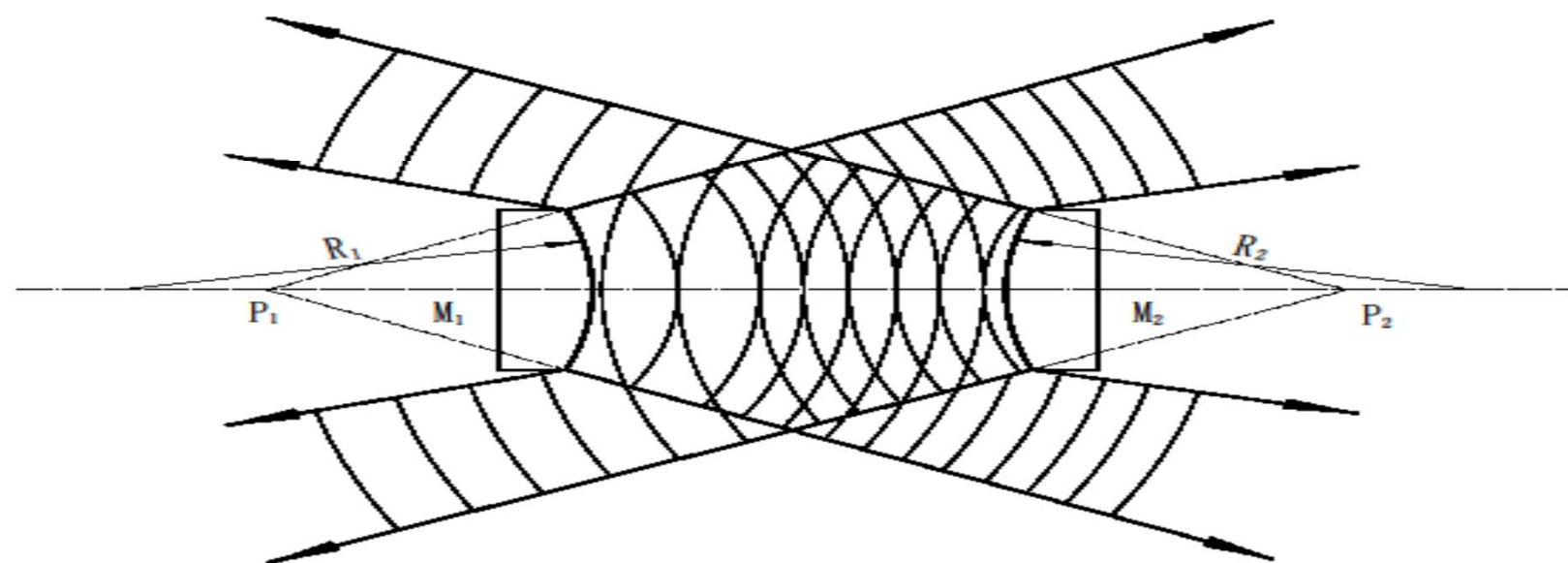


图2-9-2 双凸腔的共轭像点及几何自再现波型

## 输出环形激光束

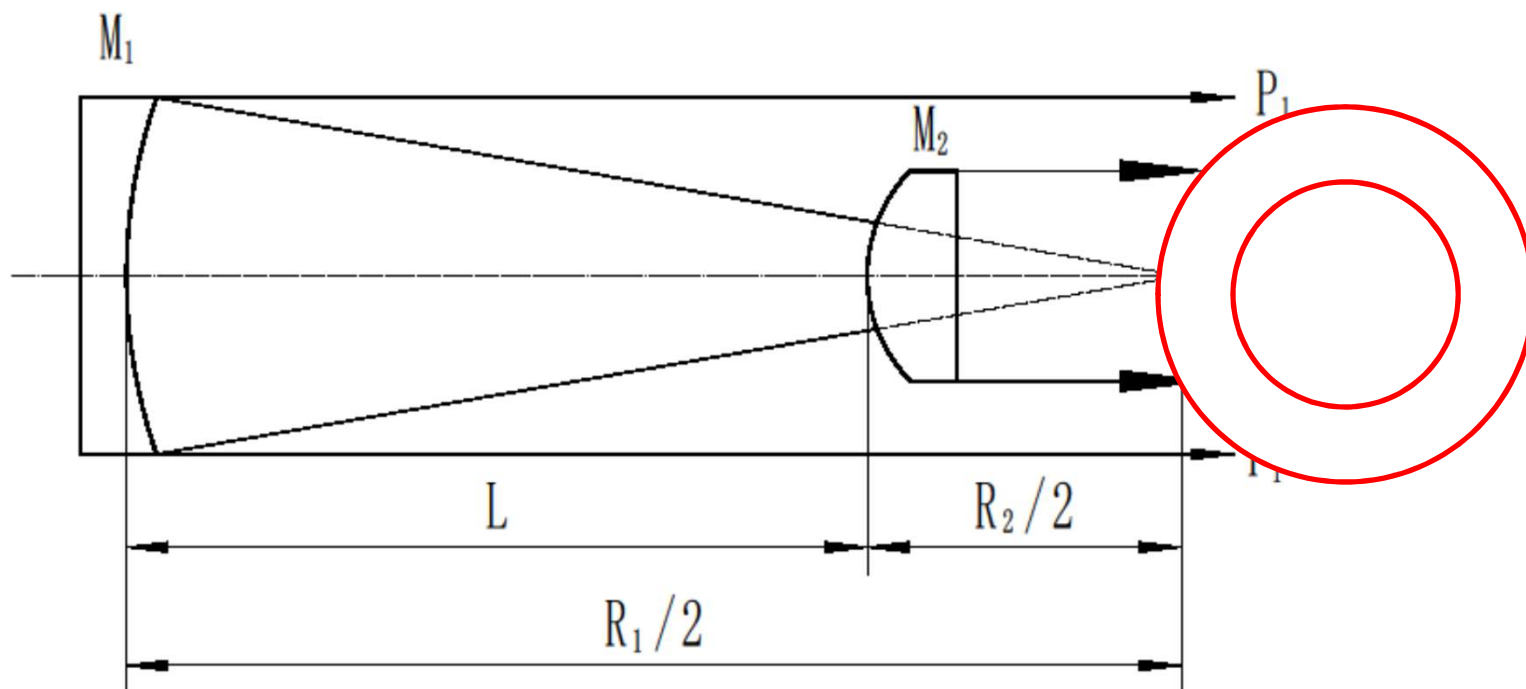
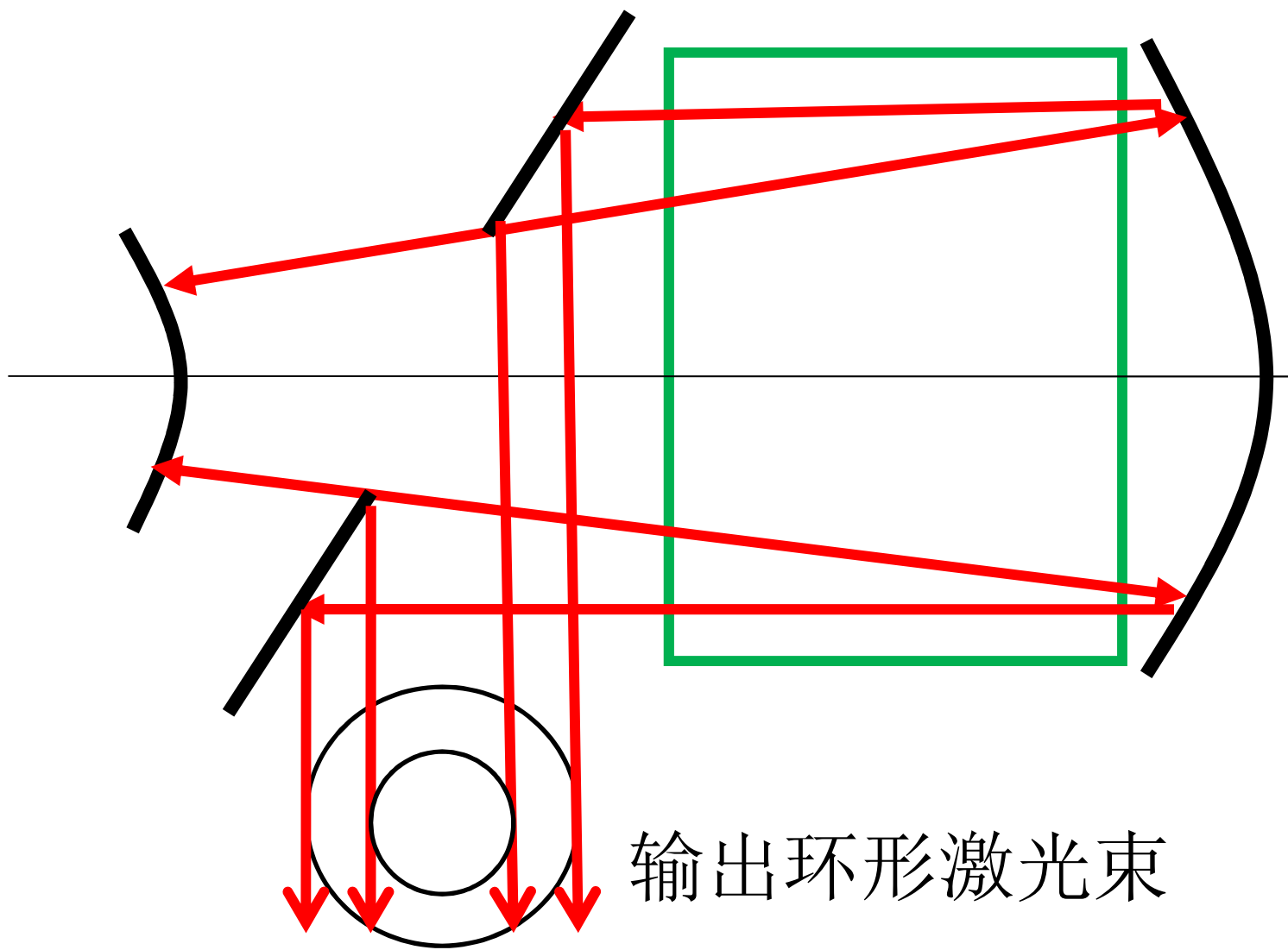


图2-9-4 虚共焦望远镜型非稳定腔





## • 第二节 激光纵模选择技术

稳定球面镜谐振腔谐振频率:

$$\nu_{mnq} = \frac{c}{2\eta L} \left( q + \frac{1}{\pi} (m + n + 1) \arccos \sqrt{g_1 g_2} \right)$$
$$\nu_{plq} = \frac{c}{2\eta L} \left( q + \frac{1}{\pi} (2p + l + 1) \arccos \sqrt{g_1 g_2} \right)$$

两腔镜的有效菲涅耳数:

$$F_{1eff} = \frac{a_1^2}{\pi w_{0s1}^2} = \frac{a_1^2}{L\lambda} \sqrt{\frac{g_1}{g_2} (1 - g_1 g_2)}$$
$$F_{2eff} = \frac{a_2^2}{\pi w_{0s2}^2} = \frac{a_2^2}{L\lambda} \sqrt{\frac{g_1}{g_2} (1 - g_1 g_2)}$$

可按共焦腔衍射损耗曲线,查出球面镜两镜面处的单程损耗值:

$$\gamma_{mn}^{(1)} \quad \gamma_{mn}^{(2)}$$

$\gamma_{mn\text{损}} \quad \gamma_{mn\text{损}}$

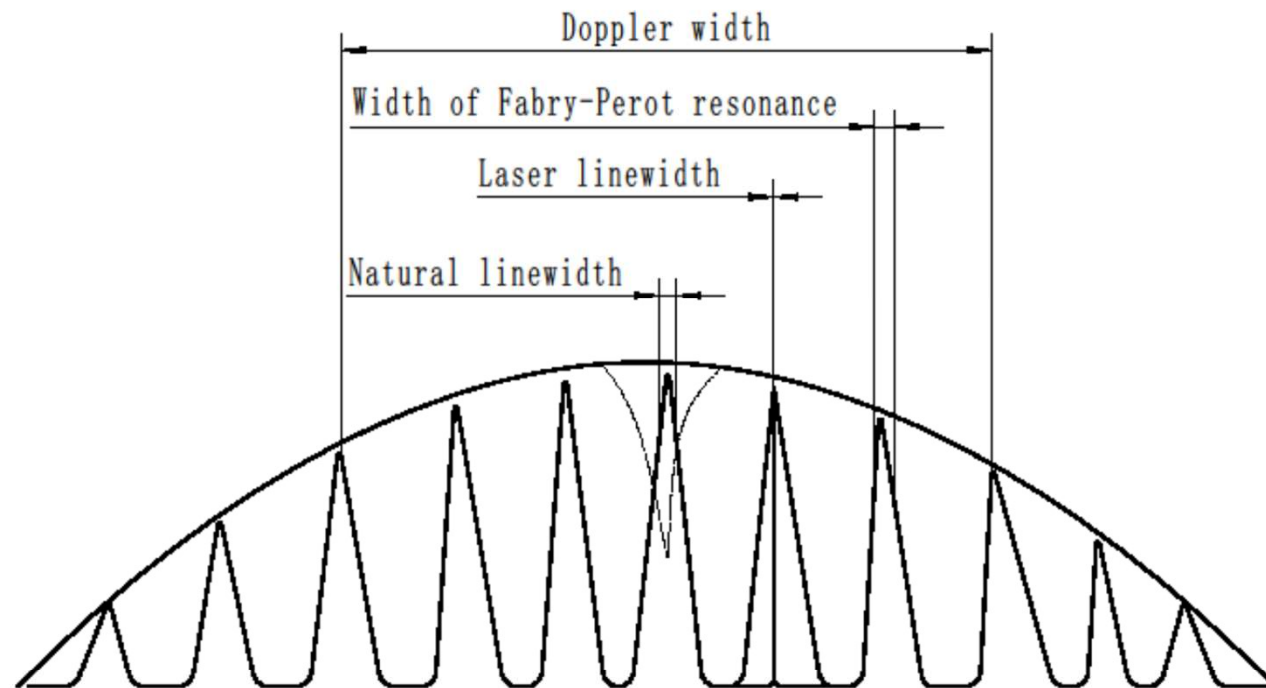


Fig.6.9. Linewidth factors in a laser.

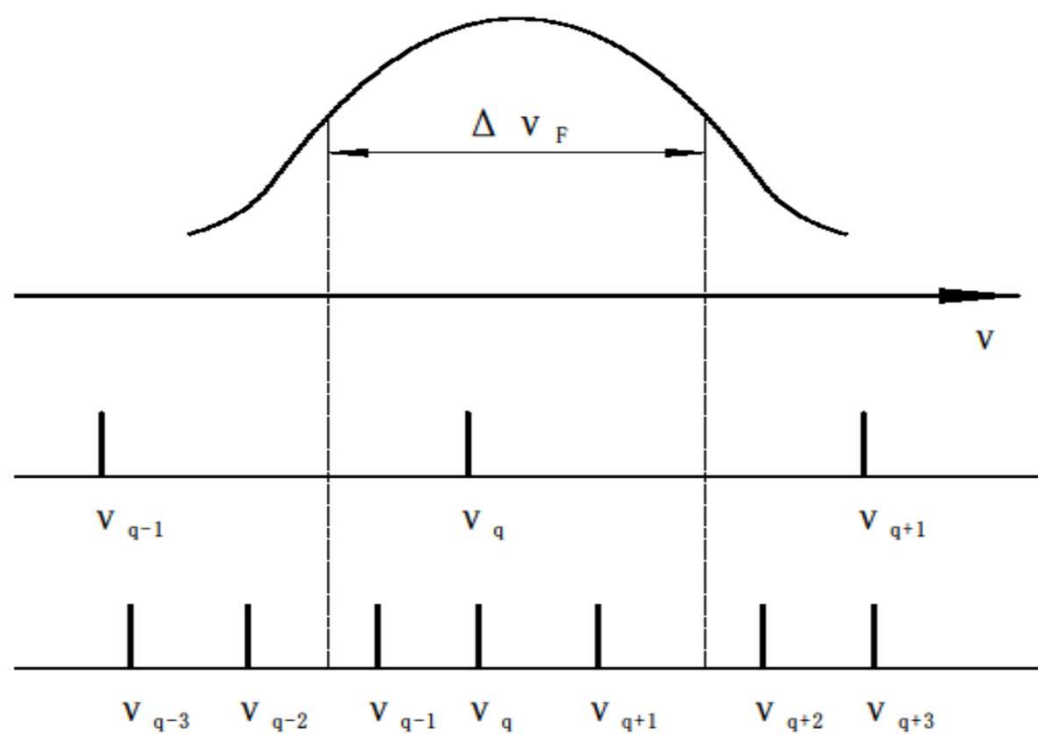


图2-2-3 激光纵模： (a) 荧光谱线；  
 (b) 单个纵模在荧光谱线宽内；  
 (c) 三个纵模在荧光谱线宽内；

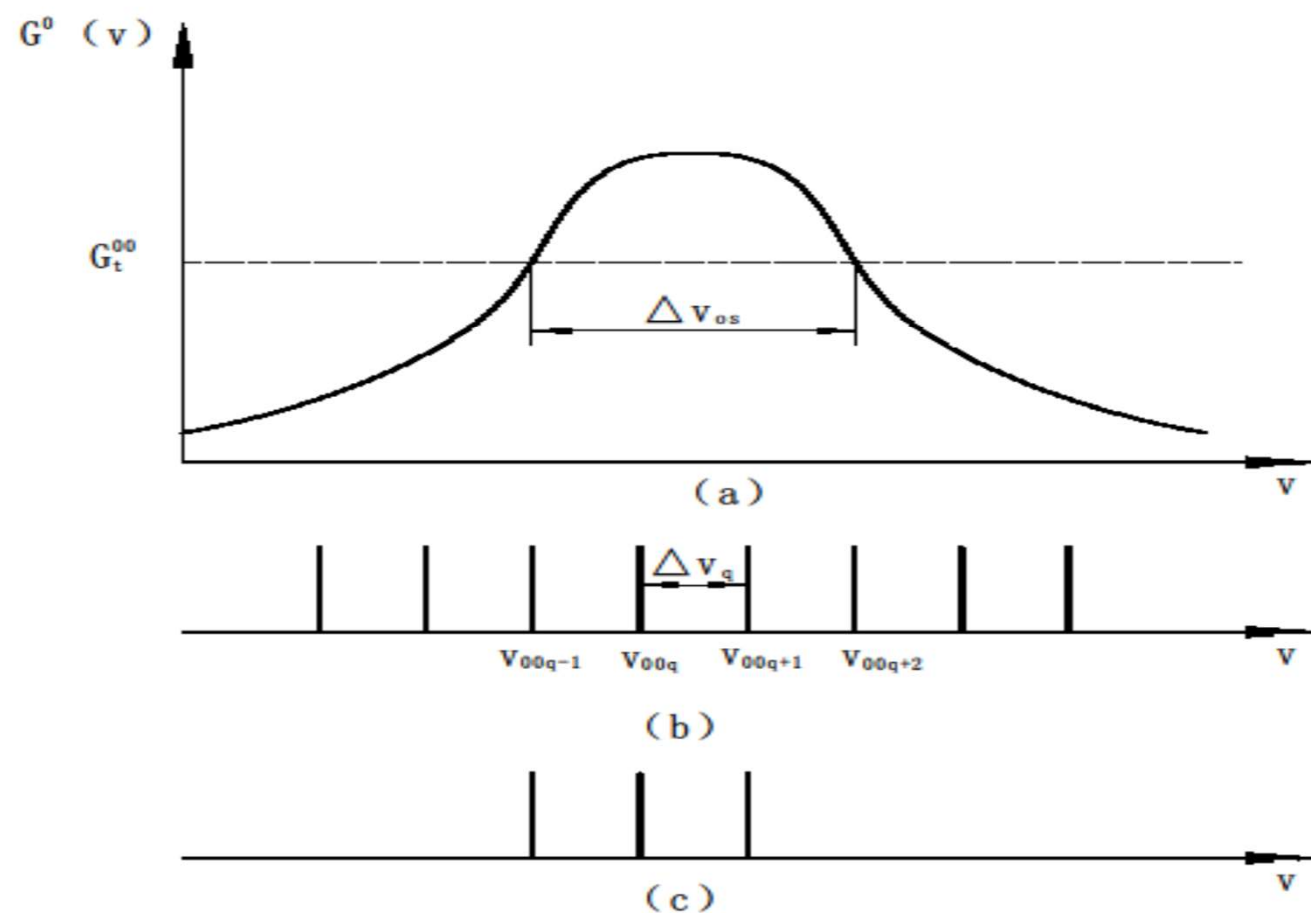
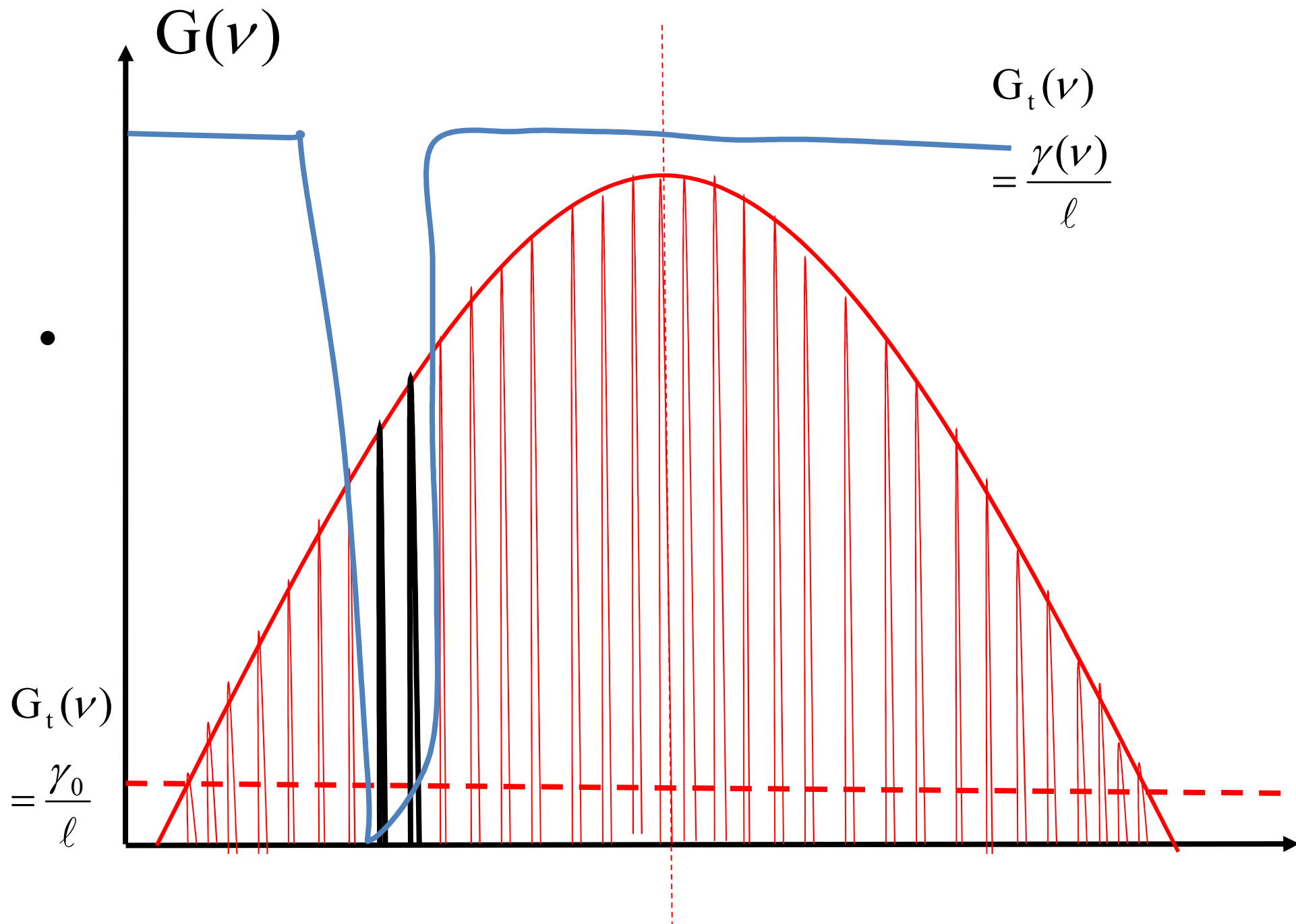
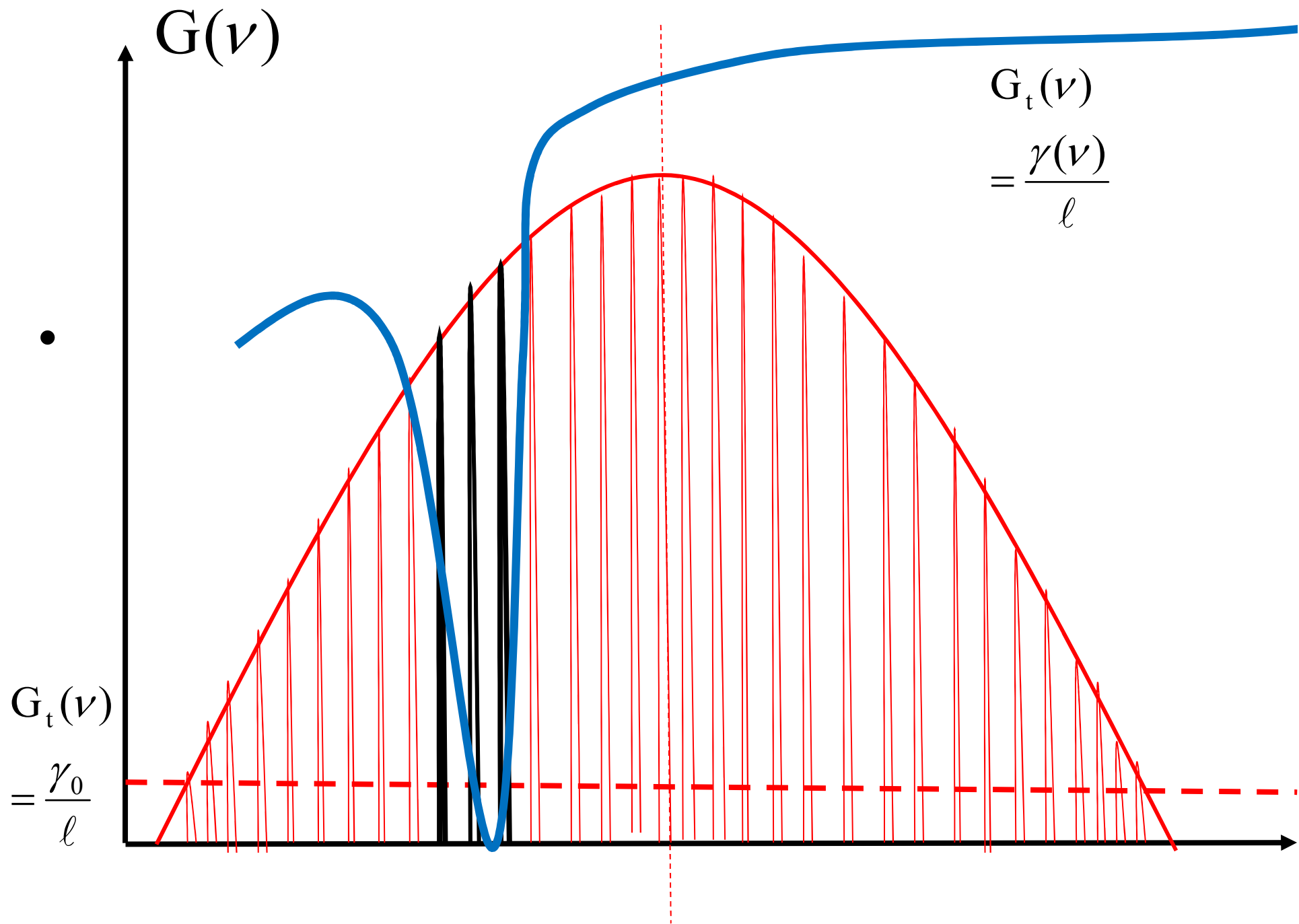
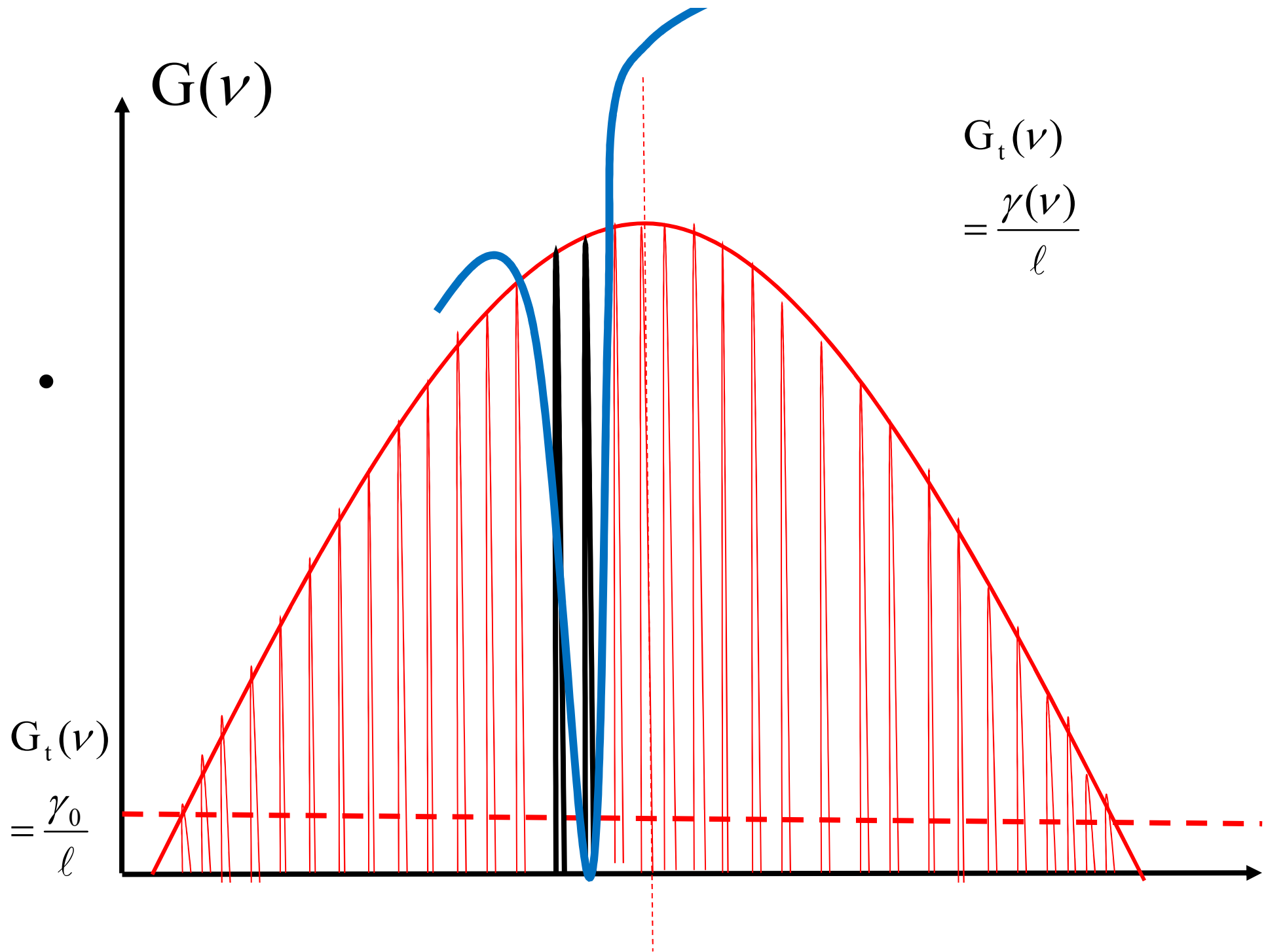


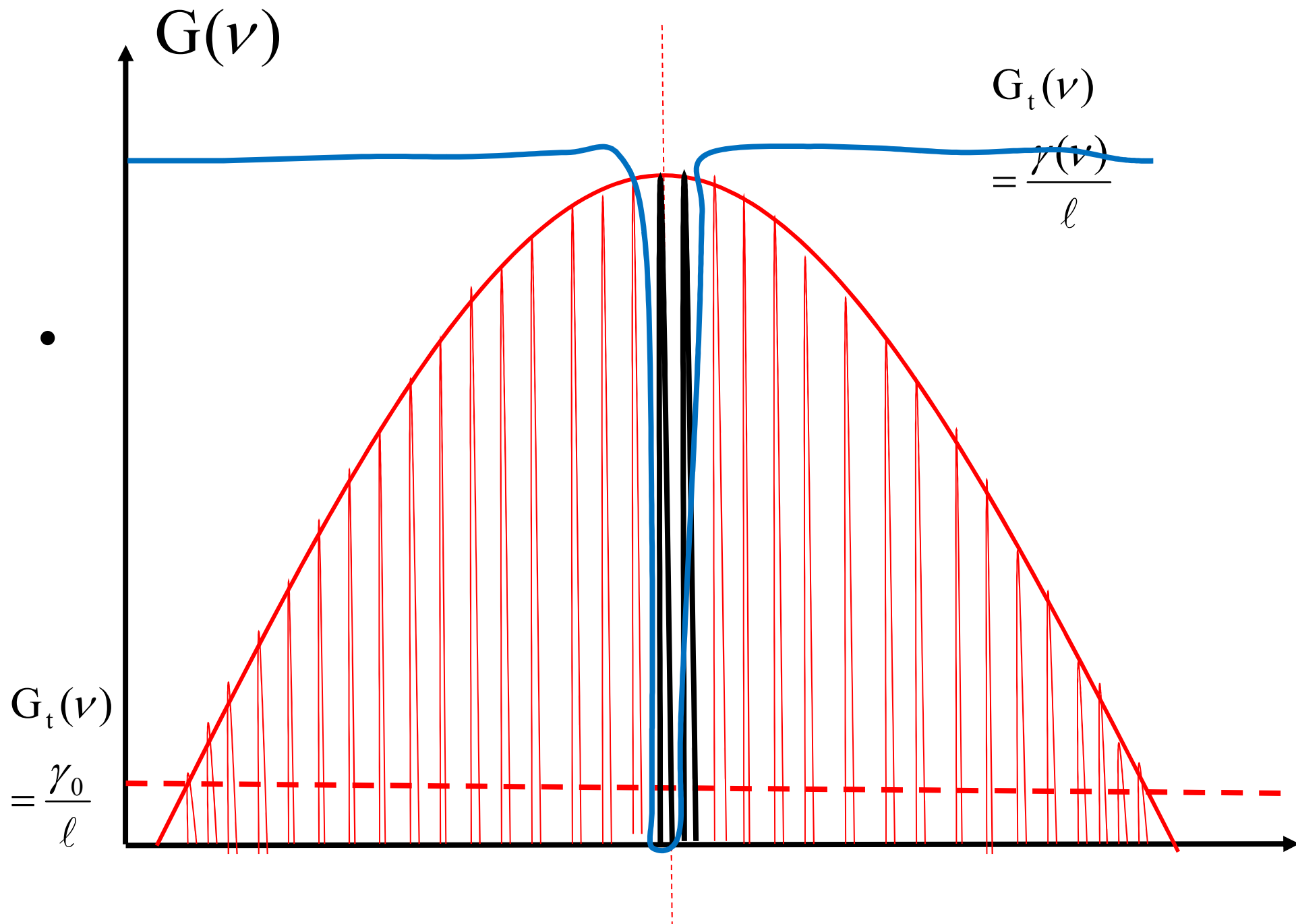
图5-3-8 激光器起振模谱

(a) 介质的小讯号增益曲线及  $\Delta v_{os}$  (b) 谐振腔的纵模频率  
(c) 起振的纵模频谱

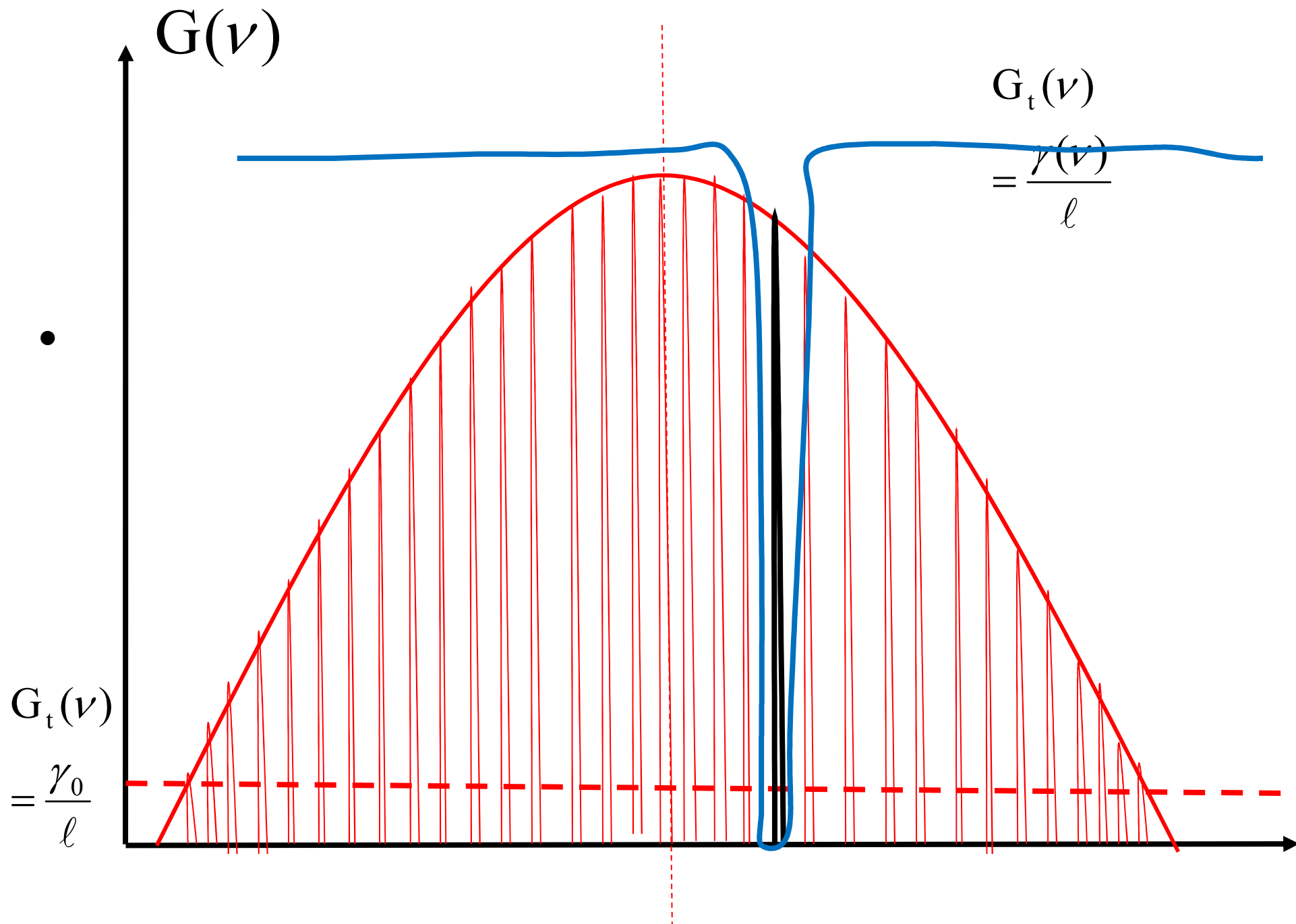


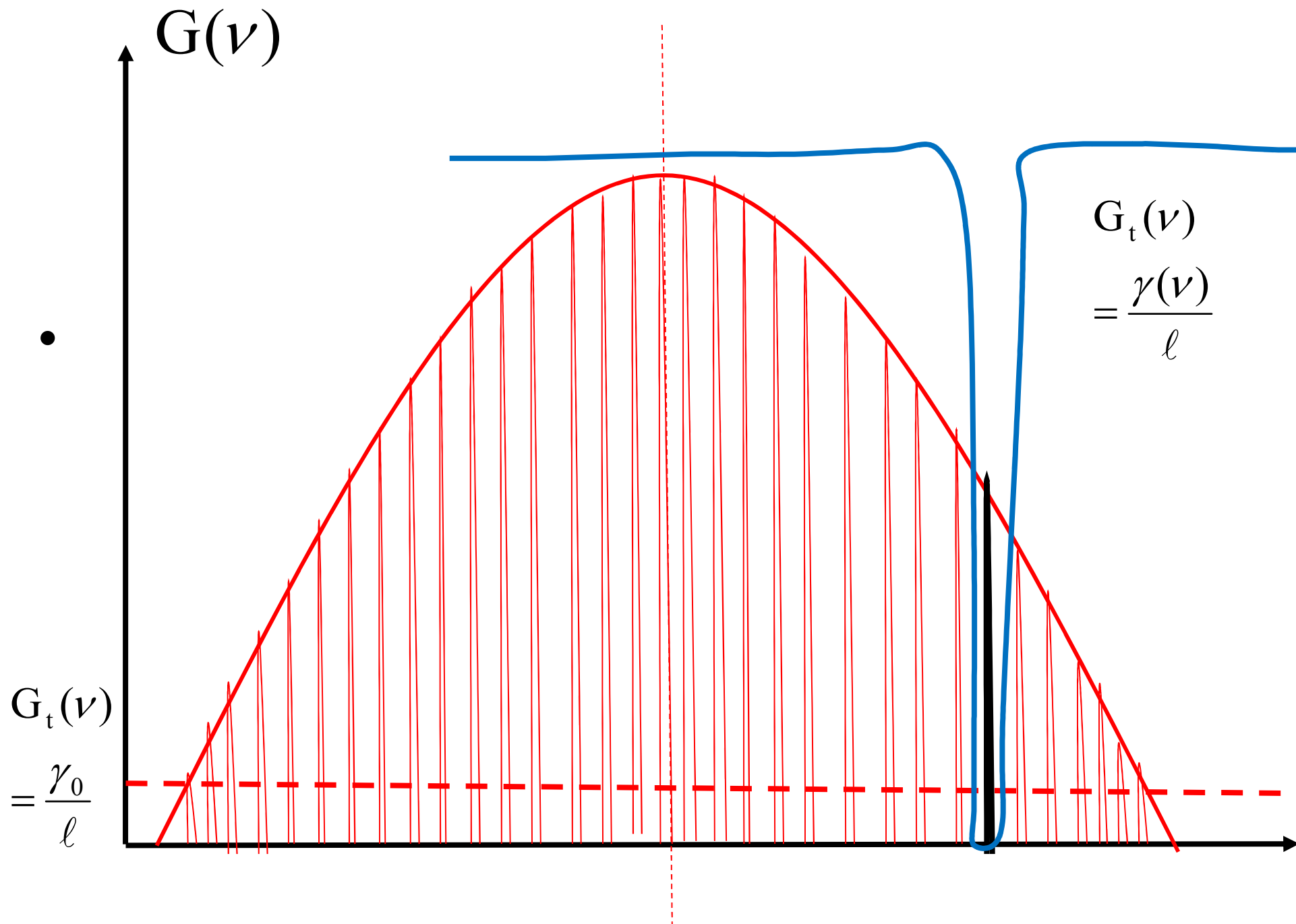


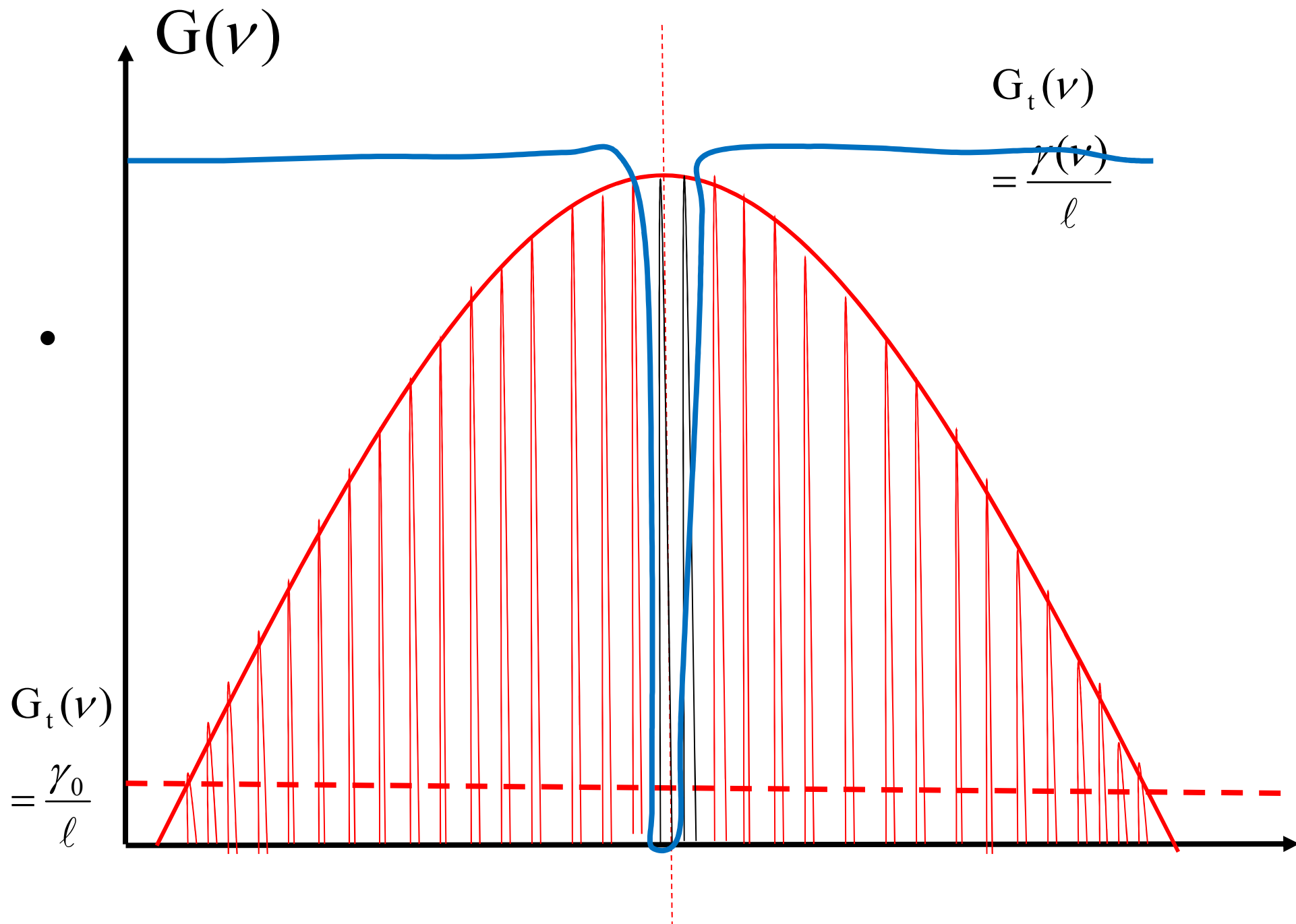






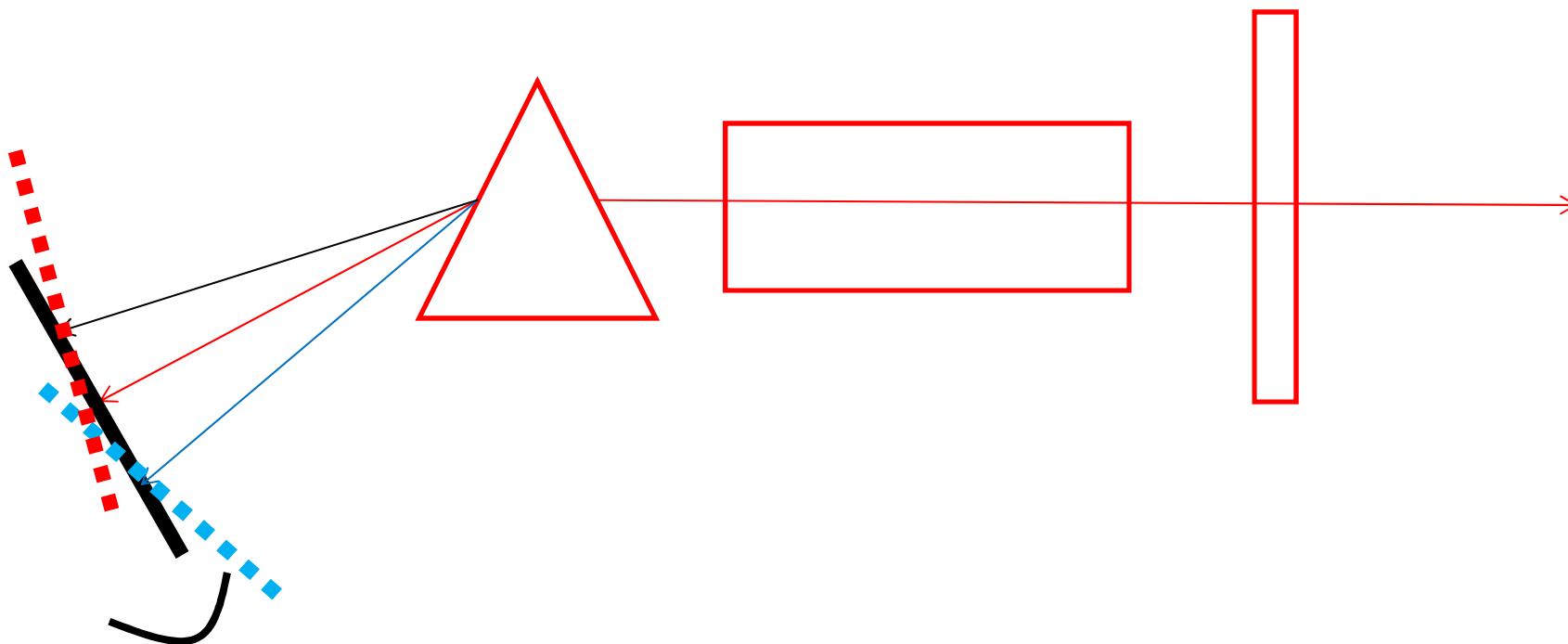






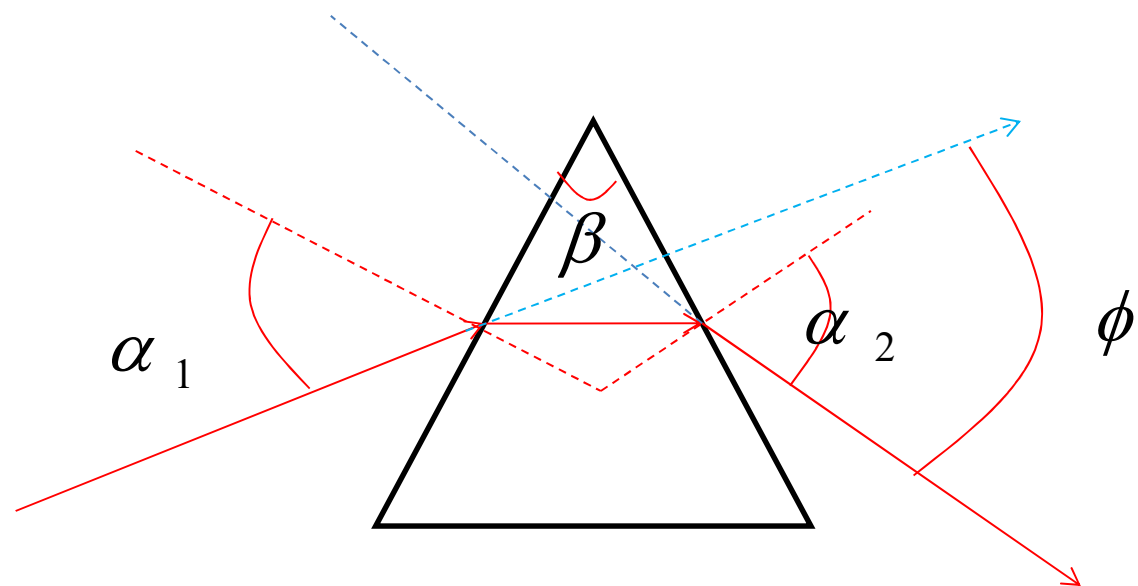
- 1、色散腔初选(也是可以调谐)

一般情况下,这一步初选难以达到 $\Delta\lambda < \frac{c}{\nu_q^2} \Delta\nu_q$ , 还需进一步选模



棱镜色散腔法

•



$$n = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \frac{\beta}{2}} = \frac{\sin \left( \frac{\phi + \beta}{2} \right)}{\sin \frac{\beta}{2}}, \phi - \text{最小偏向角}$$

$n$  - - 折射率

•

$$\text{角色散率: } D_{\lambda} = \frac{d\phi}{d\lambda} = \frac{d\phi}{dn} \frac{dn}{d\lambda} = \frac{2 \sin \frac{\beta}{2}}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{\beta}{2}}} \frac{dn}{d\lambda}$$

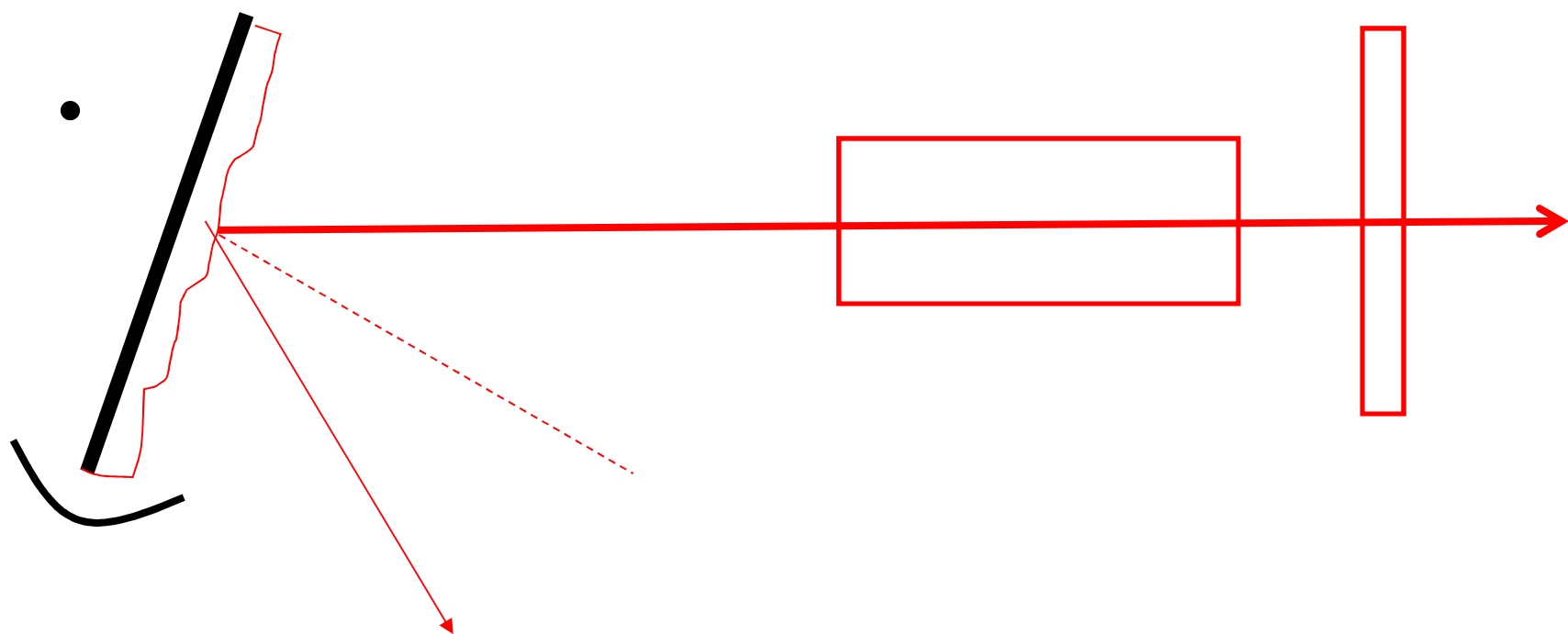
设腔内光束所允许的发散角为 $\theta$ ,则腔内激光波长允许的最小波长分离范围为:

$$\Delta\lambda = \frac{\theta}{D_{\lambda}} = \frac{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{\beta}{2}}}{2(\sin \frac{\beta}{2}) \frac{dn}{d\lambda}} \cdot \theta$$

一般情况下,这一步初选难以达到 $\Delta\lambda < \frac{c}{\nu_q^2} \Delta\nu_q$ ,还需进一步选模

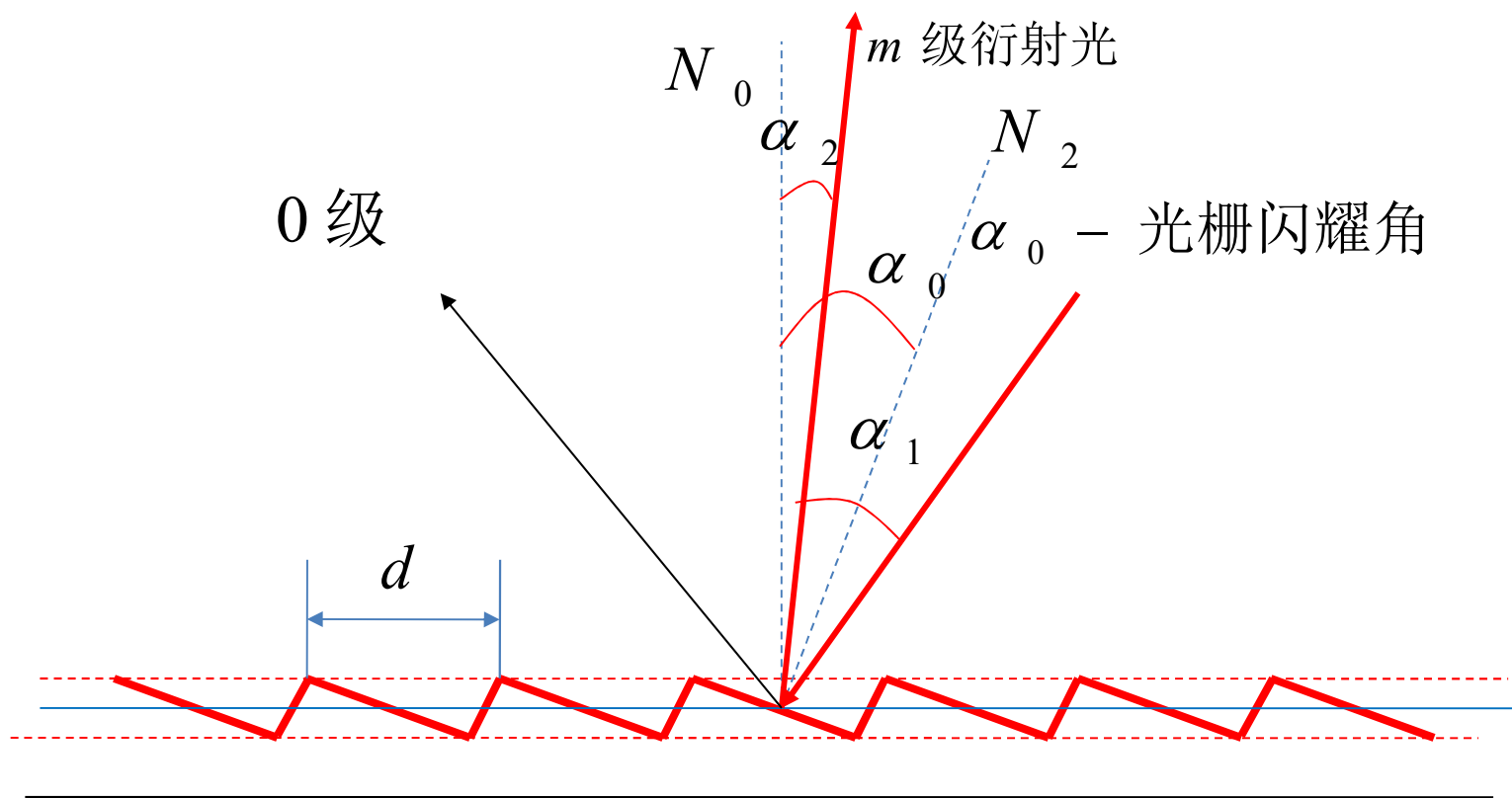
但是,如: $\theta \sim 1\text{mrad}$ , $\Delta\lambda \sim 1\text{nm}$ ,的分辨率,对激光器进行选择振荡是十分有效的.

如 $\text{Ar}^+$ 激光器的 $488\text{nm}$  $514.5\text{nm}$ 波长的分离。



0 级

光栅色散腔法



光栅  $m$  级衍射主极大条件（光栅方程）：

$$d(\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2) = m\lambda, m = 0, 1, 2, 3, \dots$$



- 光栅角色散率：
$$D_{\lambda} = \frac{d\alpha_2}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \alpha_2} = \frac{\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2}{\lambda \cos \alpha_2}$$

光栅在自准直情况下， $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_0$ ,

角色散率：
$$D_0 = \frac{2 \tan \alpha_0}{\lambda}$$

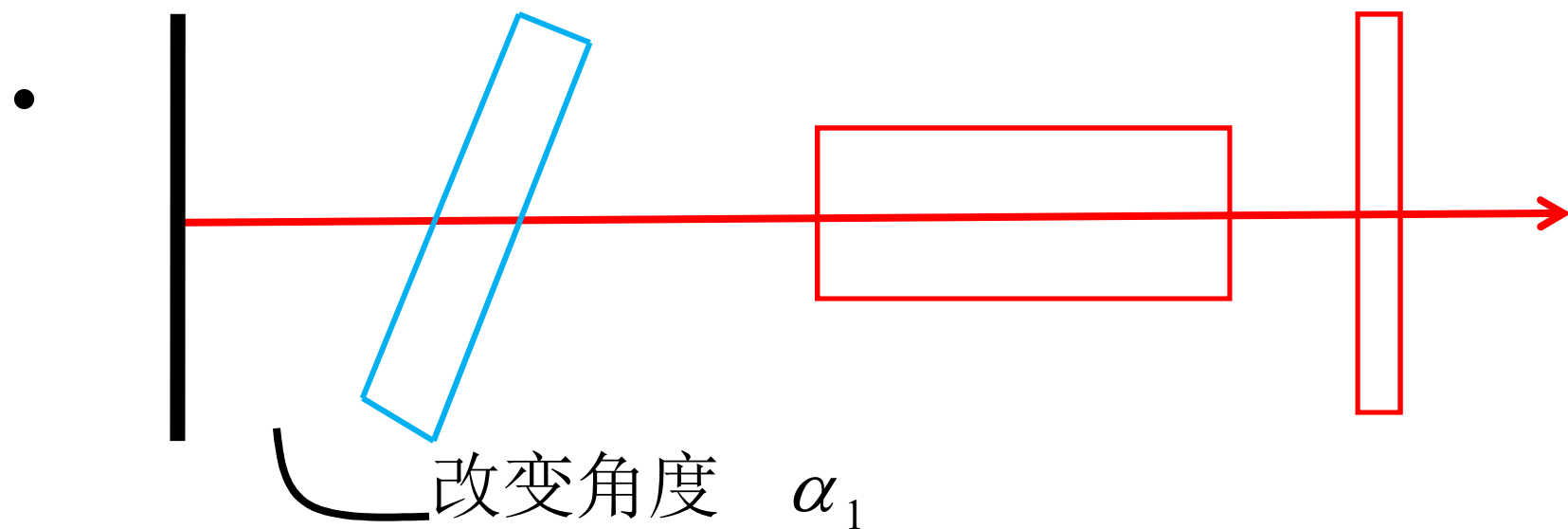
设腔内光束所允许的发散角为 $\theta$ ,则腔内激光波长允许的最小波长分离范围为:

$$\Delta\lambda = \frac{\theta}{D_0} = \frac{\lambda}{2 \tan \alpha_0} \theta$$

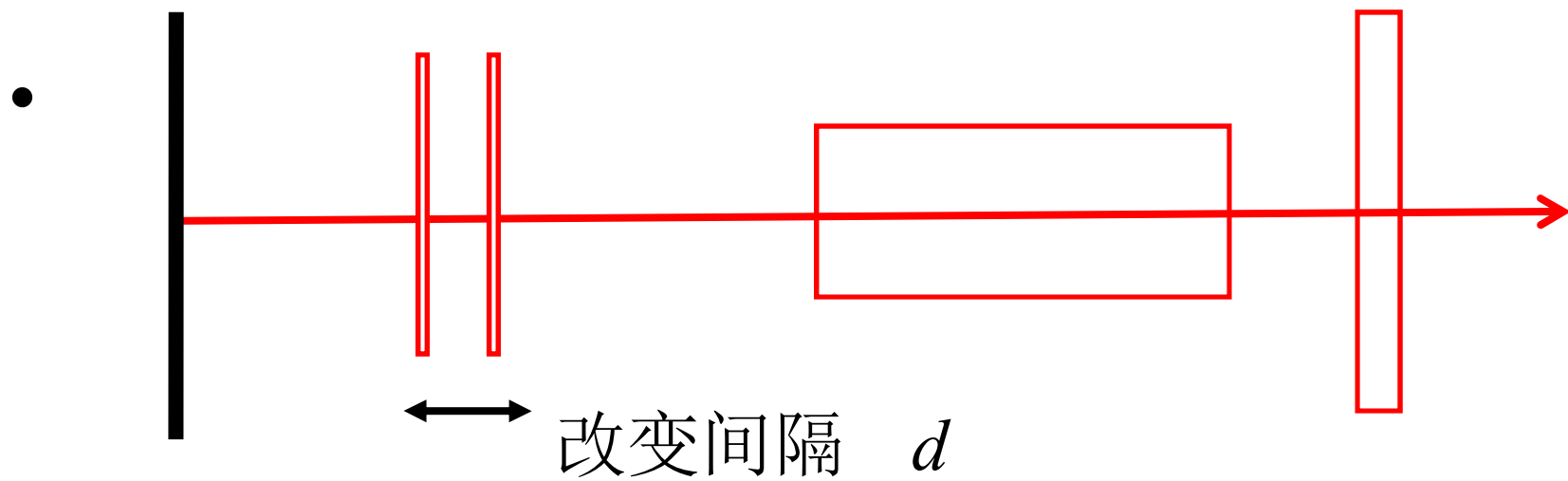
例： $\alpha_0 = 30^\circ$   $\theta \sim 1\text{mrad}$ , 可得 $\Delta\lambda < 1\text{nm}$ , 的分辨率.

比棱镜色散腔有更好的色散选择能力。

要注意光栅的抗损伤阈值比棱镜低。



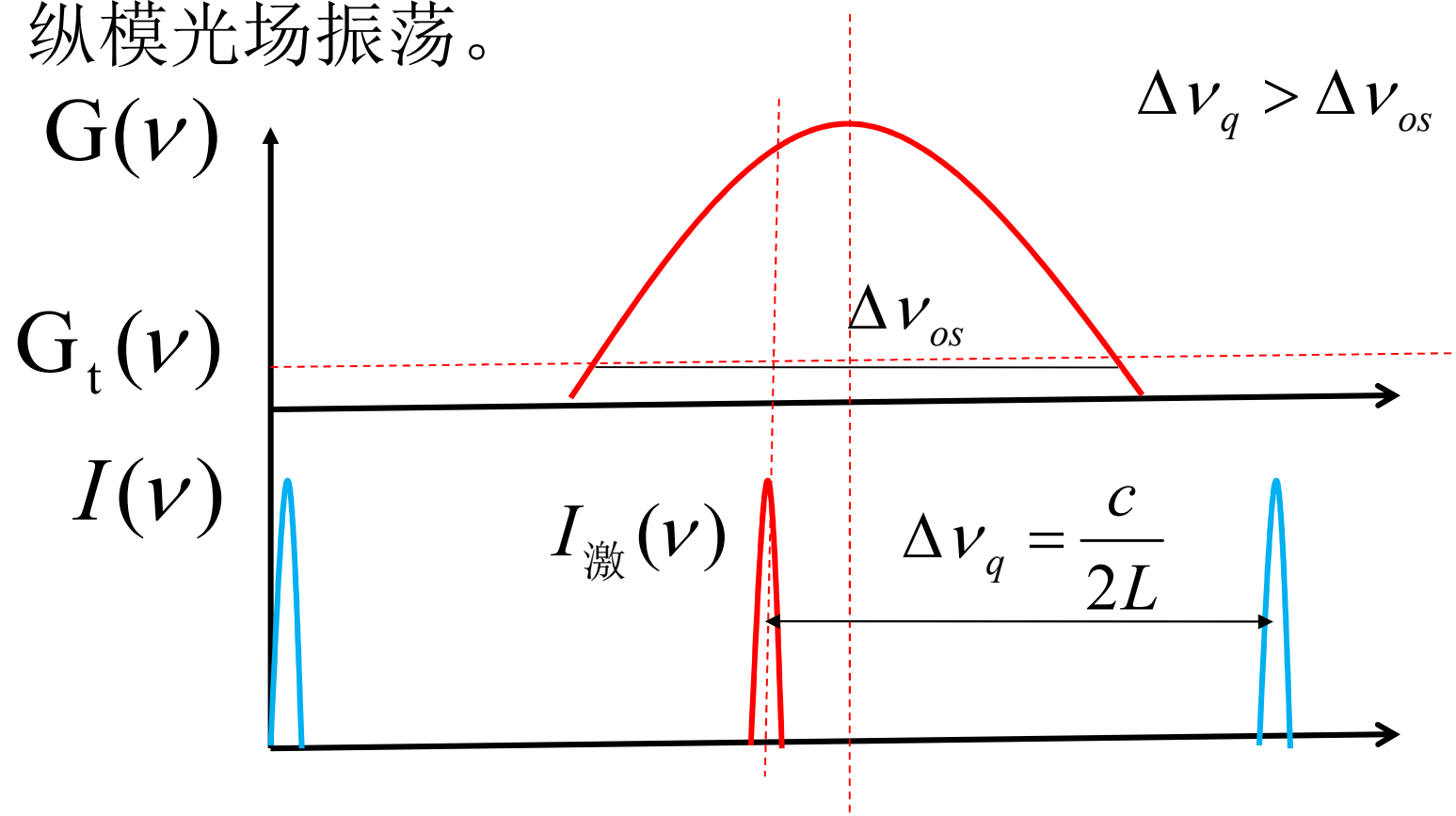
双折射滤光片或 $F-P$ 标准具色散腔法初选或调谐



扫描 $F-P$ 干涉仪色散腔法初选或调谐

- 2、短腔法（针对增益线宽窄的激光器很有效）

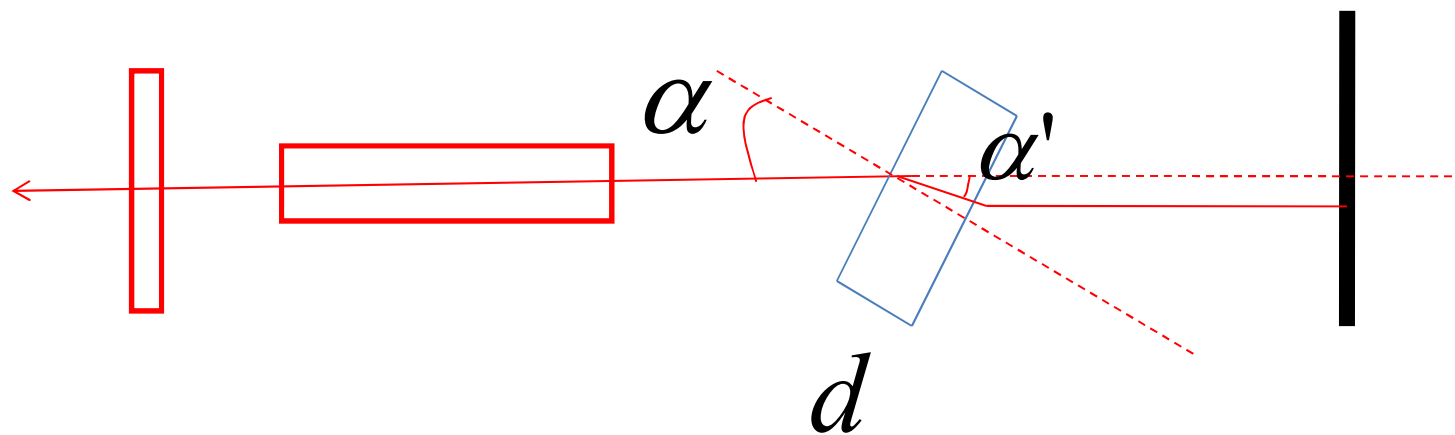
缩短谐振腔长度，使得相邻纵模频率间隔 $\Delta\nu_q$ 增大，到超过可振荡频率间隔 $\Delta\nu_{os}$ 时，导致 $\Delta\nu_{os}$ 内只有一个纵模光场振荡。



如：He-Ne激光器， $L = 1m$ ,  $\Delta\nu = 150MHz$ ,  
增益线宽 $\Delta\nu_{os} = 1500MHz$ 内有10个纵模振荡，  
当 $L = 10cm$ ,  $\Delta\nu_{os}$ 内只有一个纵模振荡。

如：Nd:YAG激光器，增益线宽 $\Delta\nu_{os} = 200GHz$ ,  
当采用1W连续波运转的半导体LD激光器  
泵浦0.5 ~ 1.0mm的YAG薄片时，  
 $\Delta\nu_{os}$ 内只有一个纵模振荡。  
可以获得大于100mW的单纵模激光输出。

3、 $F-P$ (法布里-泊罗, *Fabri-Palo-Etalon*) 标准具法



$F-P$ 标准具对不同波长的光束具有不同的透过率：

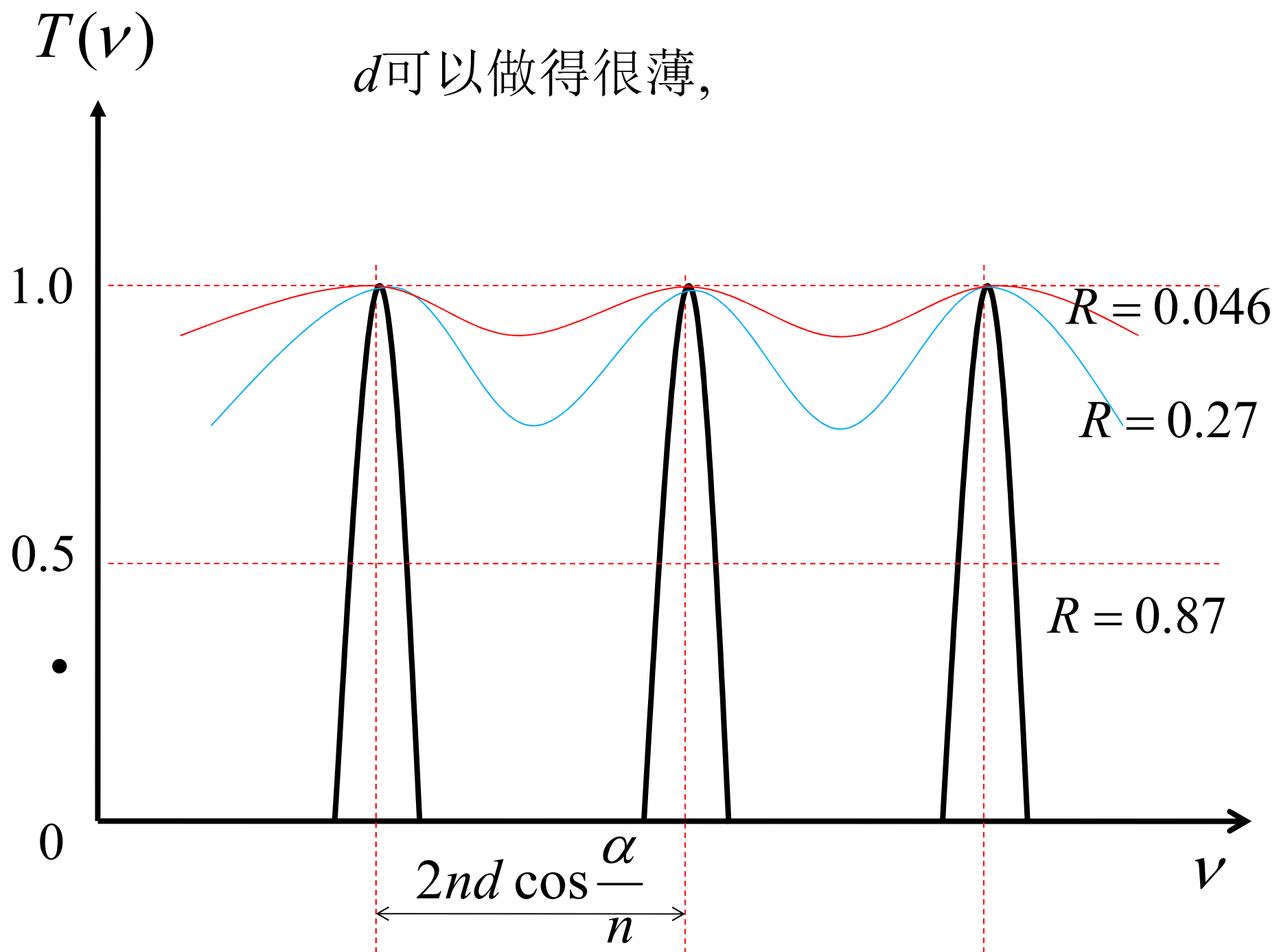
$$T(\lambda) = \frac{1}{1 + F \sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right)}, \text{相邻光束位相差 } \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2nd \cdot \cos \alpha'$$

$$\text{精细度 } F = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}, R--\text{标准具的反射率}$$

$$\alpha = 0 \rightarrow \alpha' = 0$$

$$T(\lambda) = \frac{1}{1 + F \sin^2\left(\frac{2\pi nd}{\lambda}\right)}, \text{相邻光束位相差 } \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2nd,$$

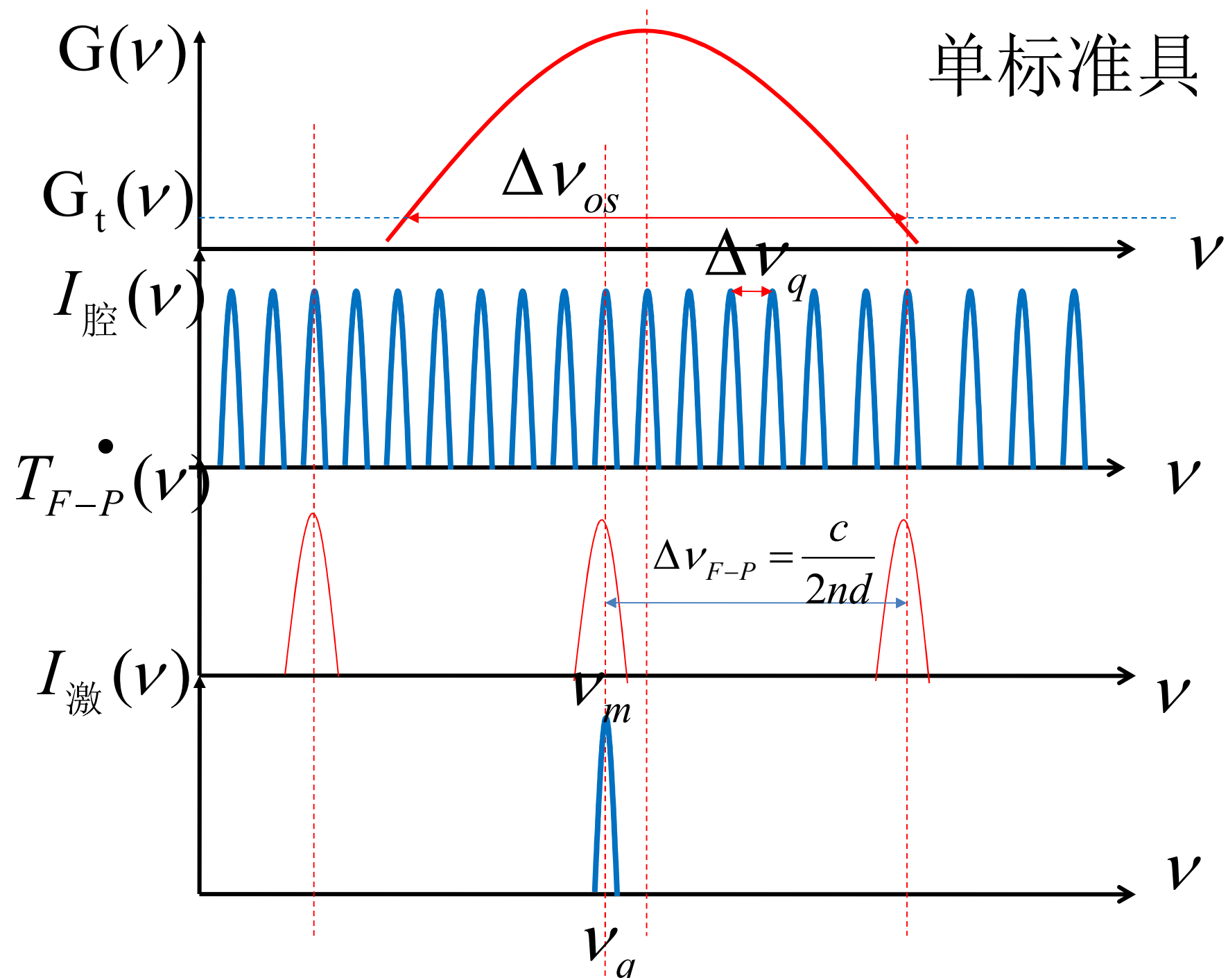
$$\text{相邻两透过率极大值频率间隔: } \Delta \nu_m = \frac{c}{2nd \cos \alpha'} = \frac{c}{2nd}$$



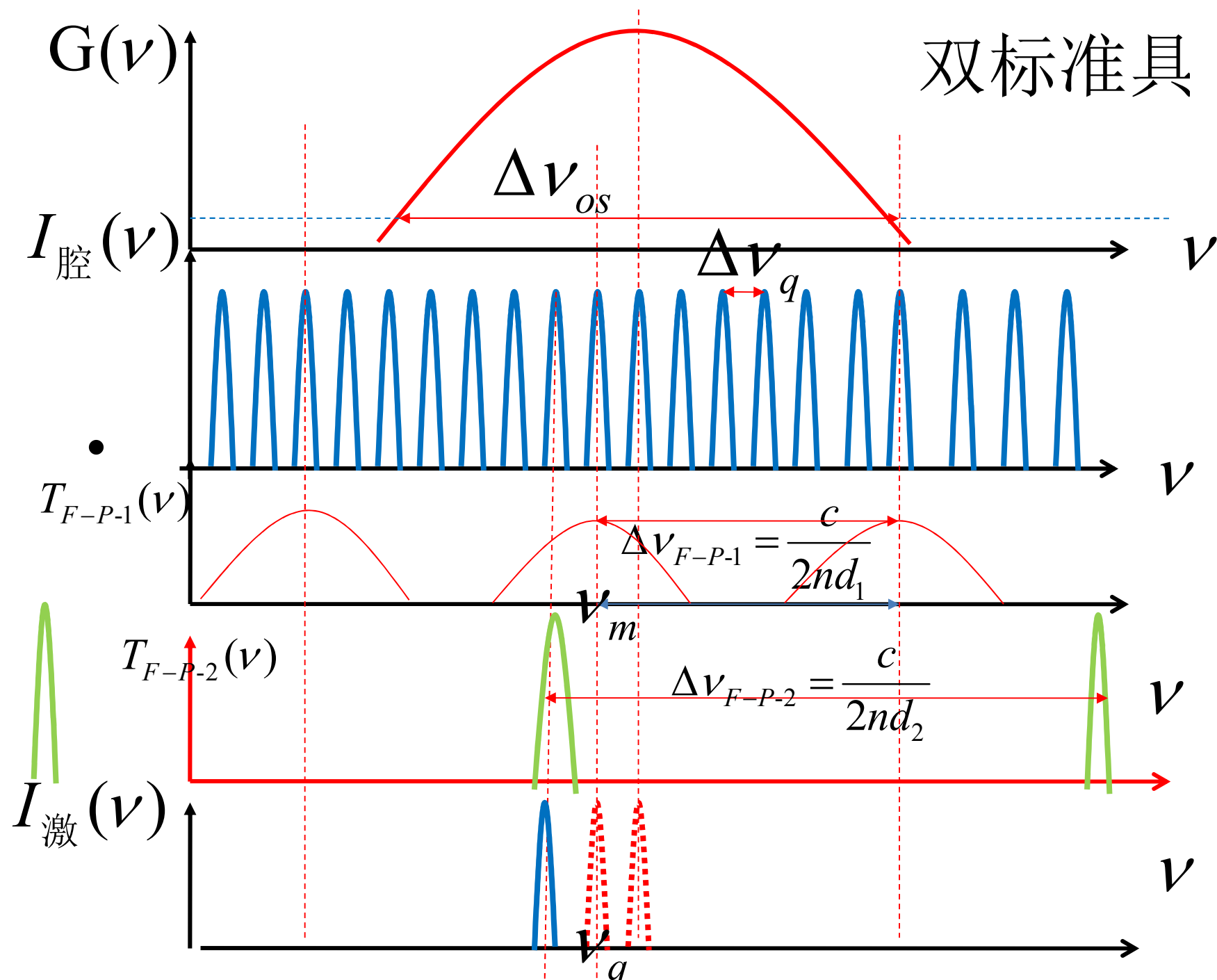


- 插入 $F-P$ 标准具，选择适当的厚度和反射率，使 $\Delta\nu_m$ 与激光工作物质的可振荡频率范围 $\Delta\nu_{os}$ （超阈值增益宽度）相当，可以选出单一纵模。

调节 $\alpha$ 角度，使 $\nu_m$ 与不同纵模重合，  
就可以获得不同频率的单纵模输出。--调谐



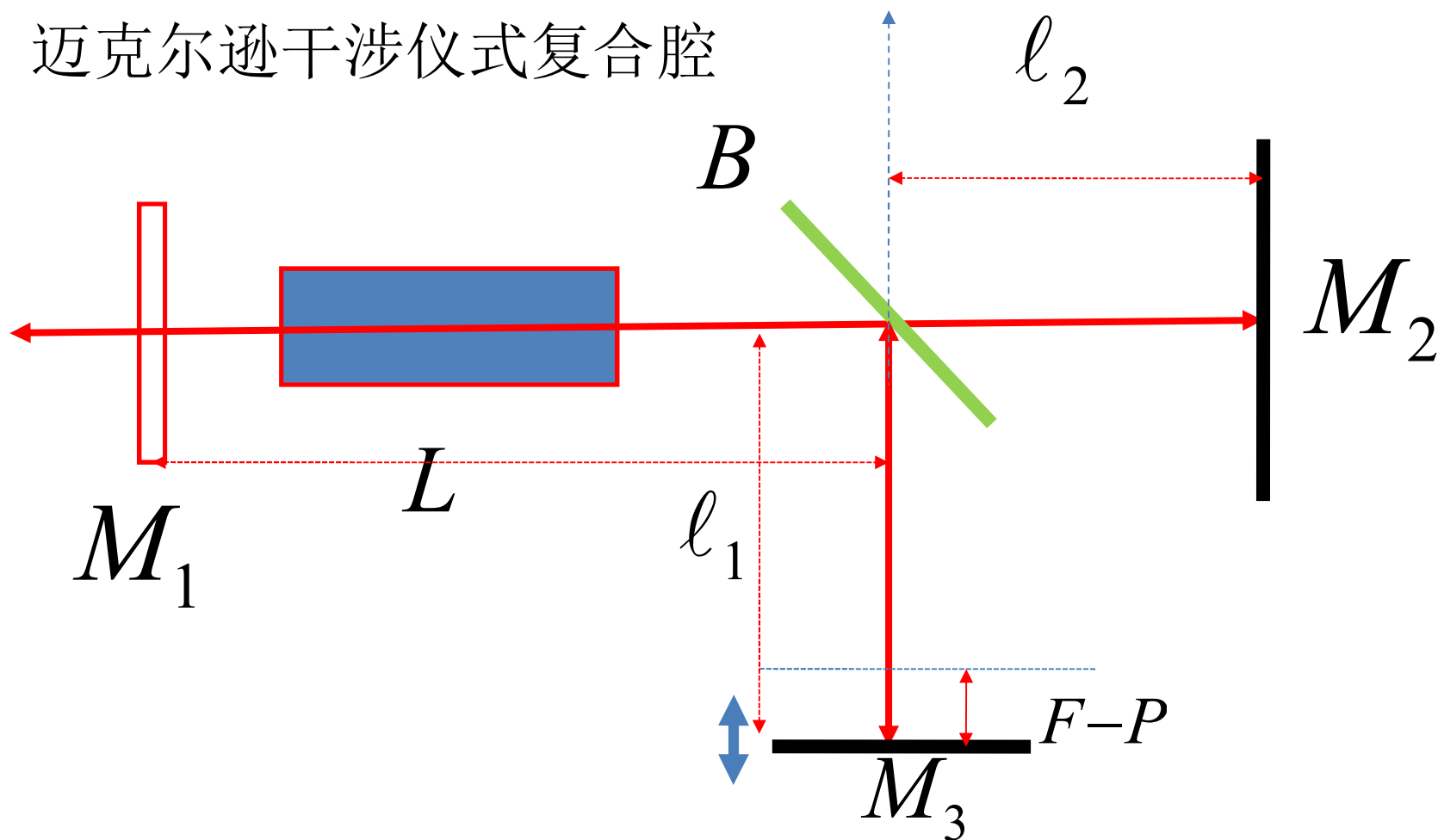
双标准具



#### 4. 复合腔法

如果用一个反射干涉仪系统取代谐振腔中的一个反射镜，  
则其组合反射率是光波长（频率）的函数。

迈克尔逊干涉仪式复合腔



- 迈克尔逊干涉仪式复合腔

$$M_1 \rightarrow M_3, \dots L + \ell_1, \nu_{1i} = \frac{c}{2(L + \ell_1)} \cdot q_i$$

$$M_1 \rightarrow M_2, \dots L + \ell_2, \nu_{2j} = \frac{c}{2(L + \ell_2)} \cdot q_j$$

激光器频率必须同时满足上述两个条件,即:

$$\frac{c}{2(L + \ell_1)} \cdot q_i = \frac{c}{(L + \ell_2)} \cdot q_j$$

第一个子腔的光束经过 $N$ 个频率间隔后正好和

第二个子腔的光束经过 $N + 1$ 个频率间隔后的频率相等。

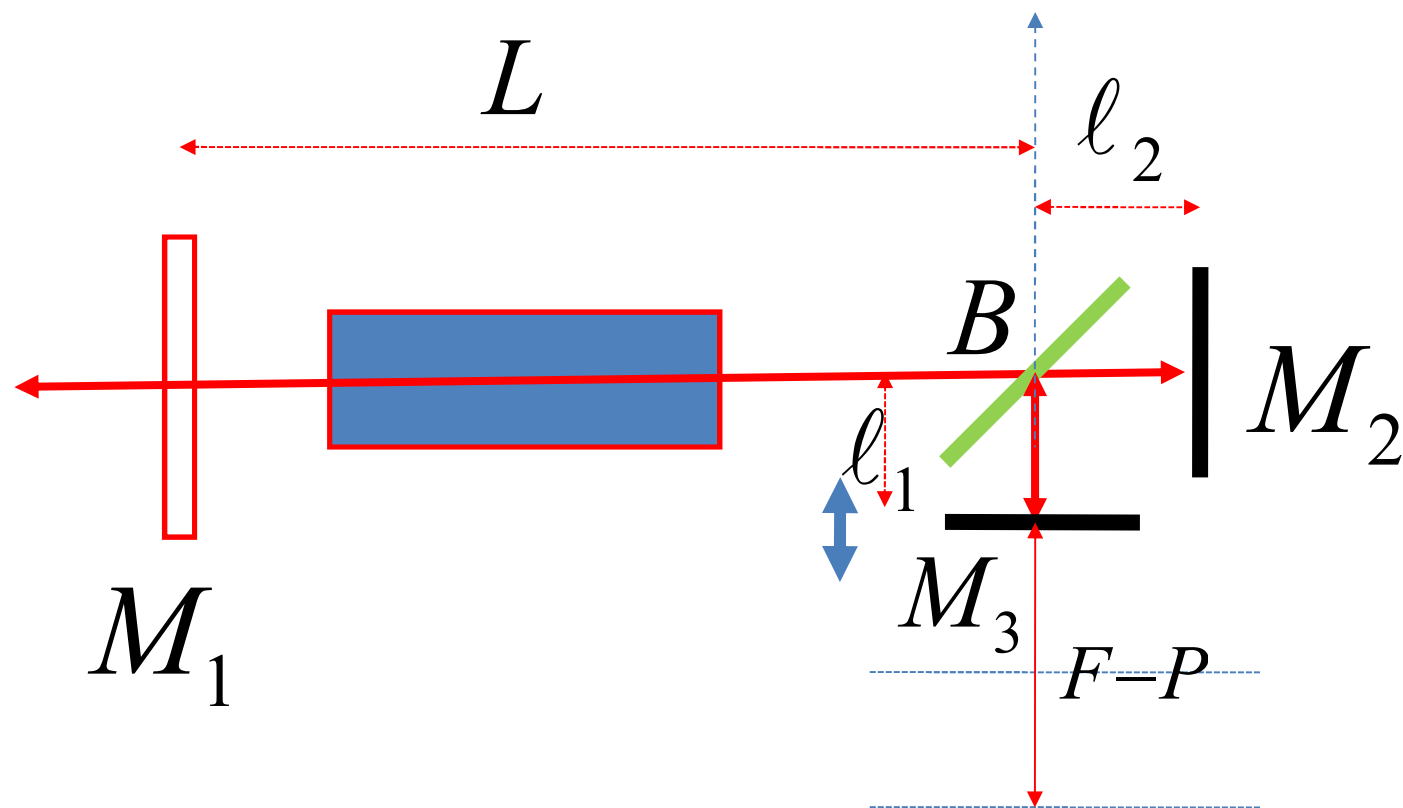
迈克尔逊干涉仪式复合腔的相邻纵模频率间隔:

$$\Delta \nu = \frac{c}{2((L + \ell_1) - (L + \ell_2))} = \frac{c}{2(\ell_1 - \ell_2)}$$

- 

适当选择 $\ell_1$ 和 $\ell_2$ 值， $(\ell_1 - \ell_2)$ 可以足够小，使得复合腔的相邻纵模频率间隔 $\Delta\nu$ 足够大，超过增益线宽（或阈值以上增益宽度 $\Delta\nu_{os}$ ），就可以获得单纵模运转。

福克斯-史密斯干涉仪复合腔



- 福克斯 - 史密斯干涉仪式复合腔

$$M_1 \rightarrow M_2, \dots L + \ell_2, \nu_{1i} = \frac{c}{2(L + \ell_2)} \cdot q_i$$

$$M_1 \rightarrow M_3, \dots L + 2\ell_2 + \ell_1, \nu_{2j} = \frac{c}{2(L + 2\ell_2 + \ell_1)} \cdot q_j$$

激光器频率必须同时满足上述两个条件,即:

$$\frac{c}{2(L + \ell_2)} \cdot q_i = \frac{c}{(L + 2\ell_2 + \ell_1)} \cdot q_j$$

第一个子腔的光束经过 $N$ 个频率间隔后正好和

第二个子腔的光束经过 $N + 1$ 个频率间隔后的频率相等。

福克斯 - 史密斯干涉仪式复合腔的相邻纵模频率间隔:

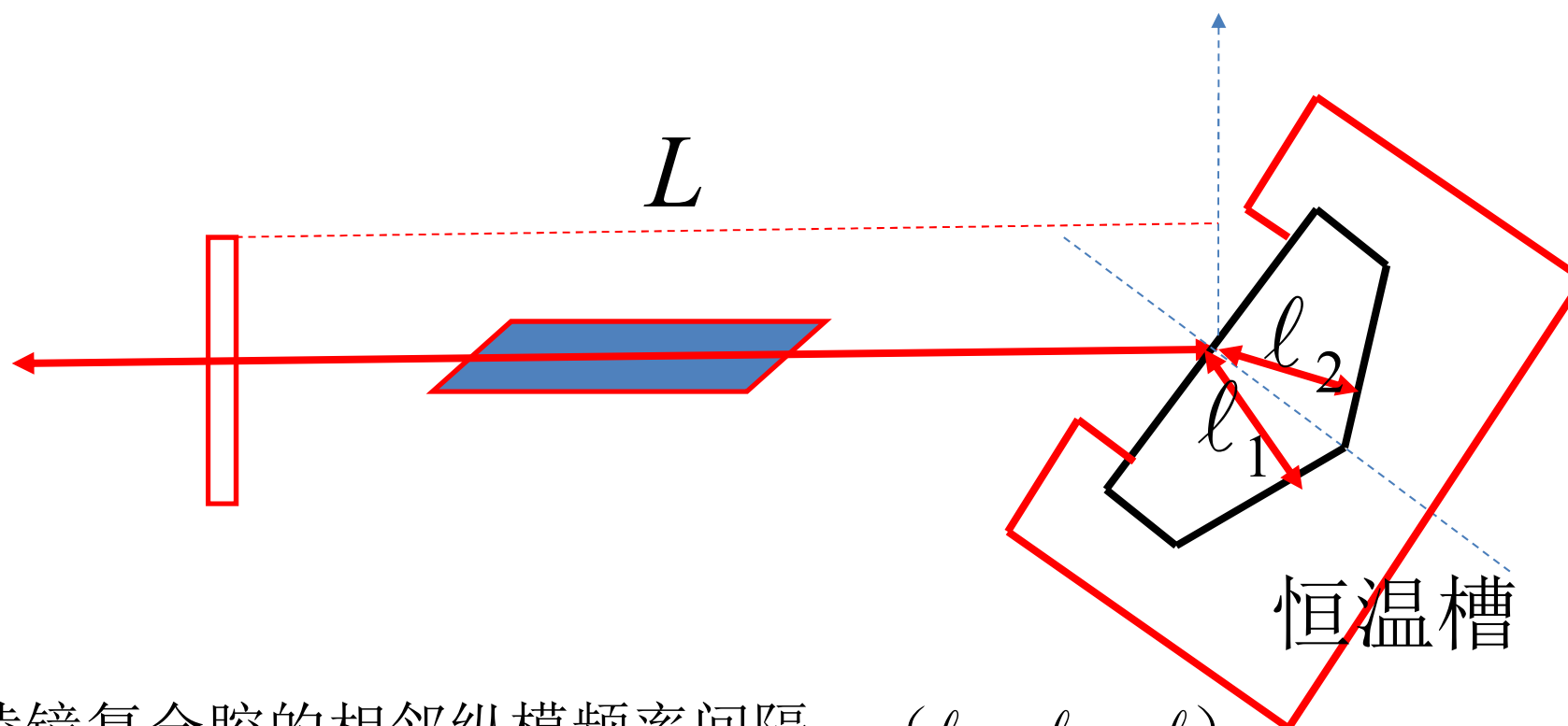
$$\Delta \nu = \frac{c}{2((L + 2\ell_2 + \ell_1) - (L + \ell_2))} = \frac{c}{2(\ell_1 + \ell_2)}$$



适当选择 $\ell_1$ 和 $\ell_2$ 值，使得 $(\ell_1 + \ell_2)$ 足够小，  
这就要求 $\ell_1$ 和 $\ell_2$ 都要足够小，才能使得复合腔的  
相邻纵模频率间隔 $\Delta\nu$ 足够大，  
超过增益线宽（或阈值以上增益宽度 $\Delta\nu_{os}$ ），  
就可以获得单纵模运转。

棱镜复合腔选纵模。

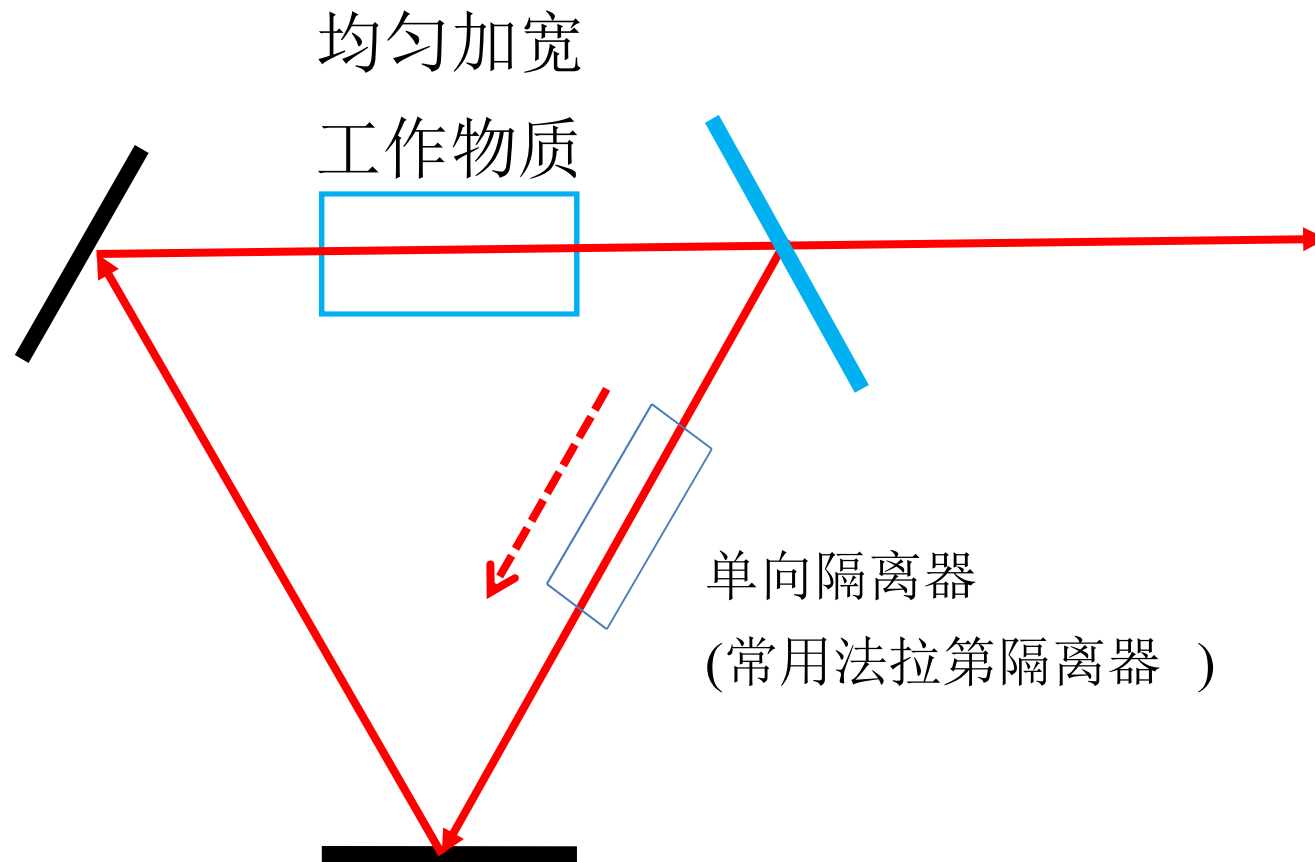
是福克斯-史密斯干涉仪复合腔的等价简单形式



棱镜复合腔的相邻纵模频率间隔： ( $\ell_1 = \ell_2 = \ell$ )

$$\Delta\nu = \frac{c}{2((L + 2\ell_2 + \ell_1) - (L + \ell_2))} = \frac{c}{2(\ell_1 + \ell_2)} = \frac{c}{4\ell}$$

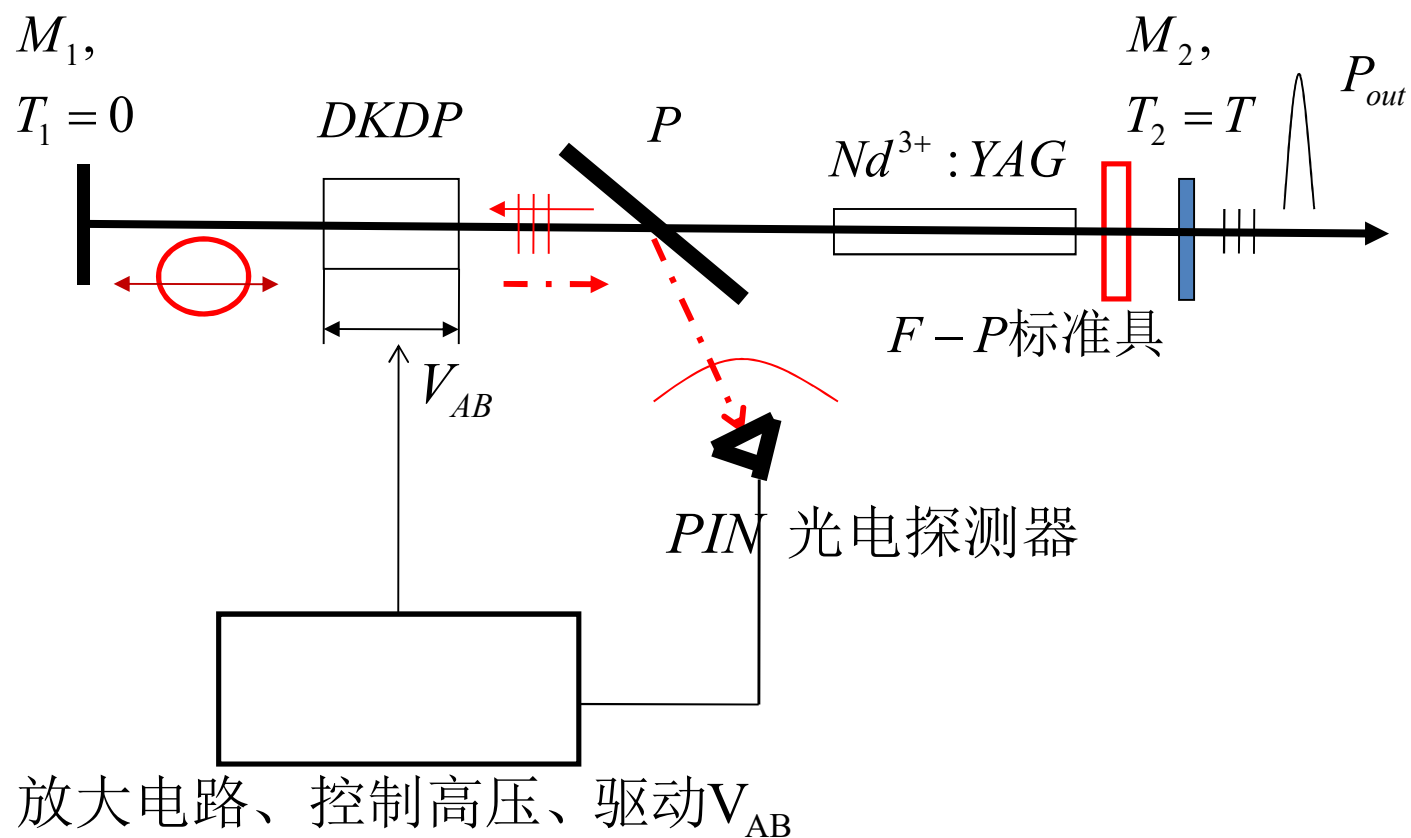
- 环形行波腔选纵模



- 

在行波腔中,光强最大值不是固定在空间某处,而是随着光波的传播而改变的,受激辐射可以均匀地消耗掉工作物质中粒子反转数,消除了由于驻波引起的"空间烧孔"效应。由于增益饱和引起的均匀加宽工作物质激光器中纵模的模式竞争结果,靠近中心频率附近的那个纵模占优势,可以获得该频率的单纵模激光输出。

5、退压式KDP类电光晶体预激光调Q + F-P标准具 Nd: YAG激光器  
(脉冲反射式PRM) 选单纵模



### 第三节 激光稳频技术（连续波气体激光器）

- 用频率稳定性和复现性来描述激光频率稳定的程度。

频率稳定度：激光器在连续运转时,在一定的观察时间 $\tau$ 内

- 频率的平均值 $\bar{\nu}$ 与该时间内频率的变化量 $\Delta\nu$ 之比,即:

$$S_{\nu}(\tau) = \frac{\bar{\nu}}{\Delta\nu(\tau)}, \text{通常用 } S_{\nu}^{-1}(\tau) \text{ 来作为稳定度的量度, 如 } 10^{-9},$$

$\tau \leq \tau_0$ , 短期频率稳定度;  $\tau > \tau_0$ , 长期频率稳定度。

$\tau_0$ 探测系统的响应（分辨）时间。

影响频率稳定度的因素:

- 1、温度变化影响;
- 2、大气变化影响;
- 3、机械振动影响;
- 4、磁场的影响。

- 最直接的办法是恒温、防震、密封隔声、稳定电源等。除此还必须采用电子伺服控制系统对激光器进行自动控制稳频。
- 稳频技术的实质就是保持谐振腔光程长度的稳定性。
- 主动稳频技术就是选取一个稳定的参考标准频率，当外界影响使激光频率偏离此特定的标准频率时，设法鉴别开来，再人为通过控制系统调节腔长，将激光频率恢复到此特定的标准频率上。
  - 1、利用原子跃迁谱线中心频率作为鉴别器进行稳频，如兰姆凹陷稳频；
  - 2、利用外界参考频率作为鉴别器进行稳频，如饱和吸收稳频法。

- 对参考谱线的要求：
- A、谱线中心频率的稳定性和复现性好；
- B、线宽要窄；
- C、有足够的信噪比；
- D、谱线频率要与受控激光器频率匹配，即参考谱线频率应落在受控激光器增益曲线峰值附近。



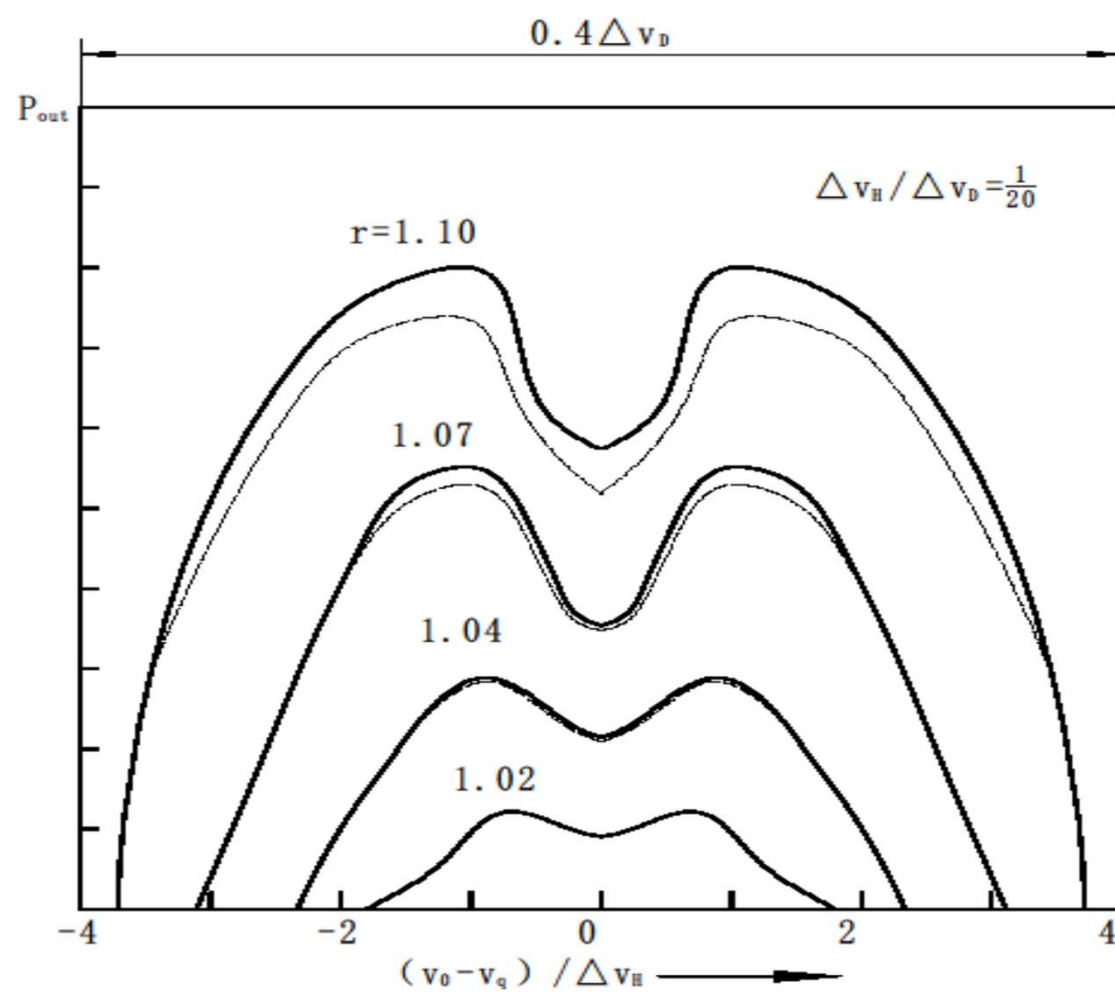


图5-3-6 多普勒加宽单模激光器输出功率随频率的变化

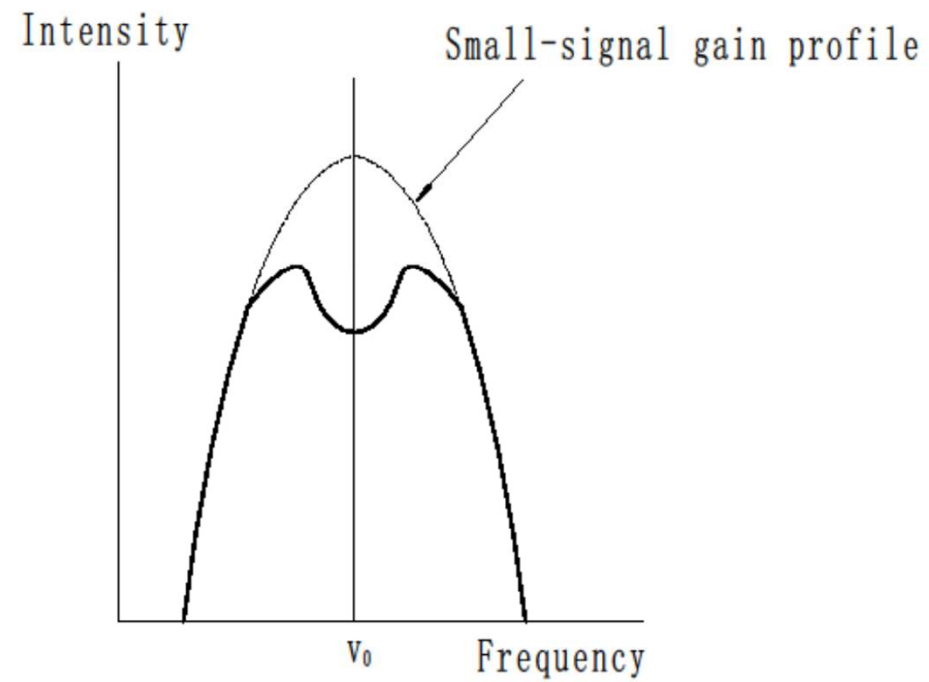
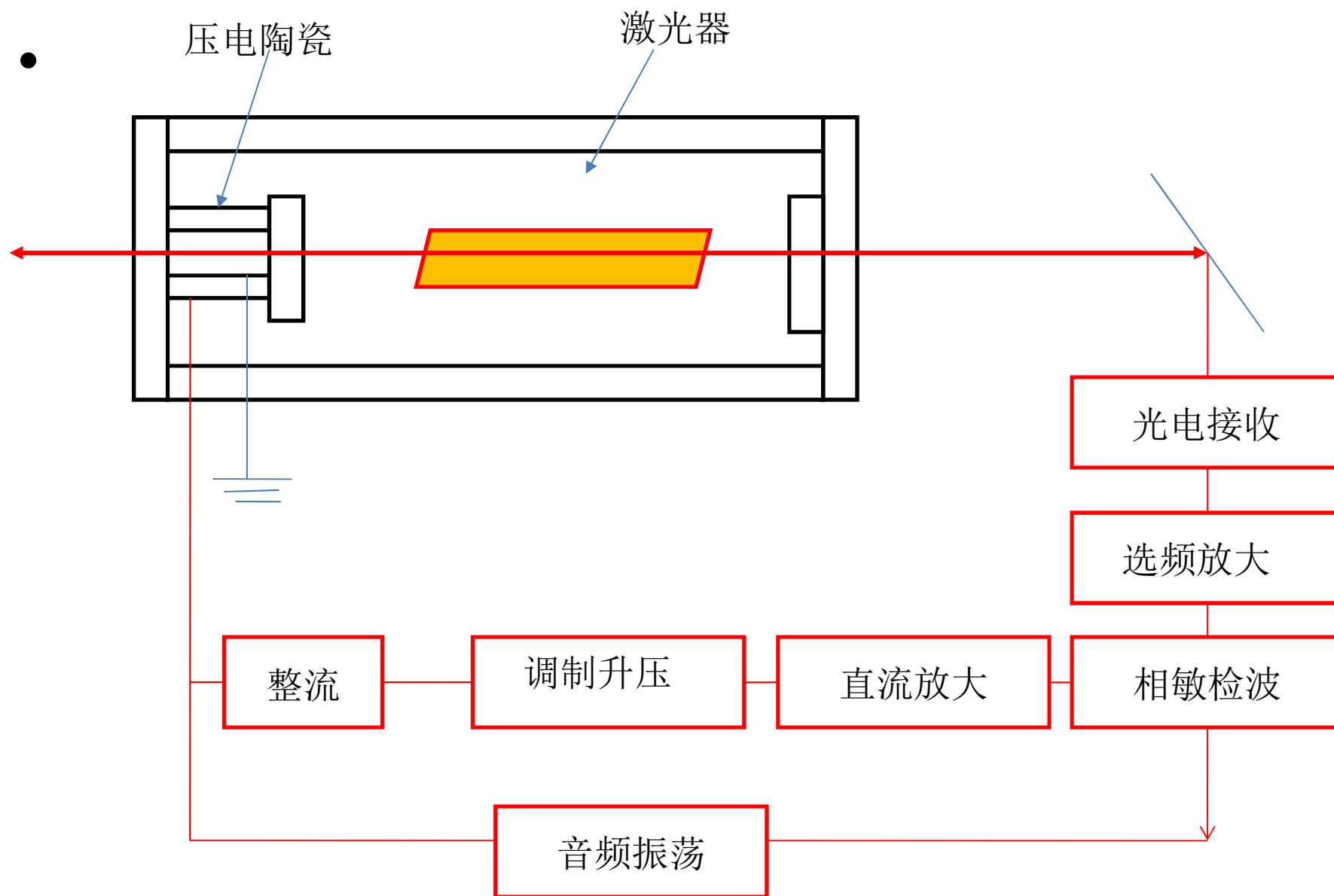


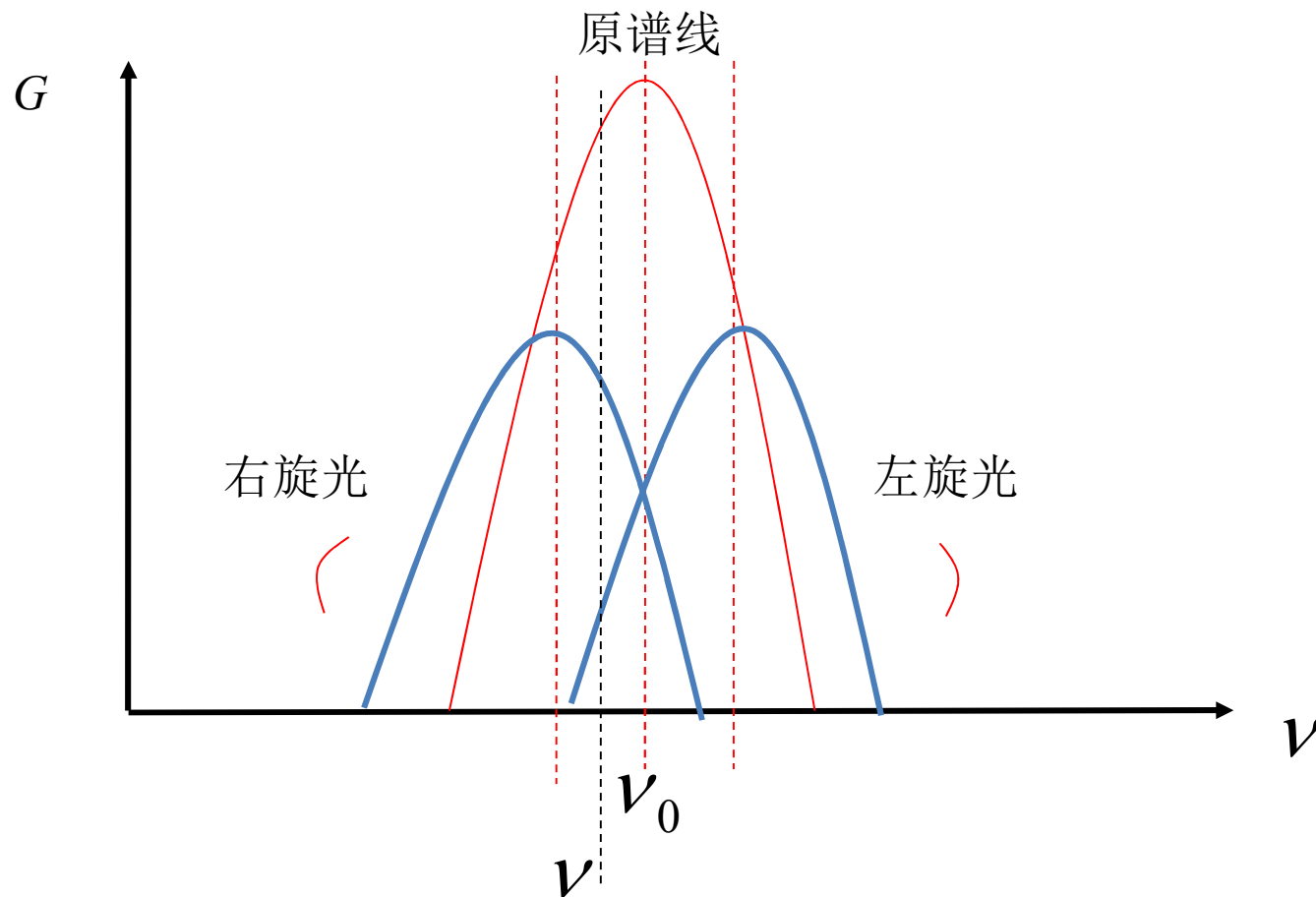
Fig.5.11. The Lamb dip- a reduction in the intensity of a single oscillating longitudinal mode in an inhomogeneously broadened laser as its frequency is scanned through line center.



兰姆凹陷稳频

- 兰姆凹陷稳频的实质：以谱线的中心频率  $\nu_0$
- 为参考标准，当激光振荡频率偏离  $\nu_0$  时，即输出一误差信号，通过伺服系统鉴别出频率偏离的大小和方向，输出一直流电压调节压电陶瓷的伸缩来控制腔长，从而把激光振荡频率自动锁定在兰姆凹陷中心处
- 稳频激光器必须是单横模、单纵模。

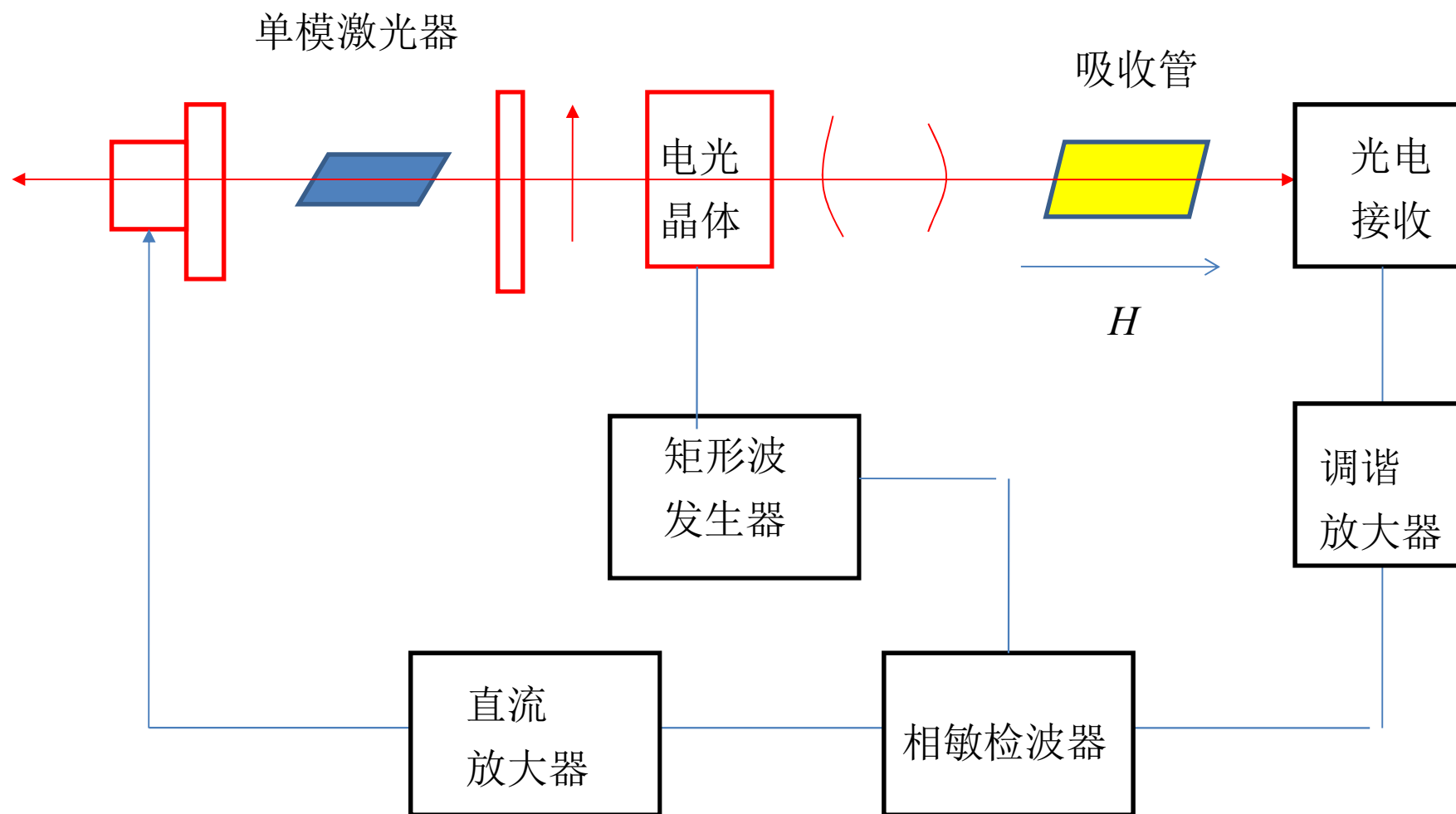
- 塞曼效应稳频：p235-236图
- 当一个发光的原子系统置于磁场中，其原子谱线在磁场作用下会发生分裂。-塞曼效应。



- 当激光振荡频率正好处于  $\nu_0$  时，左旋圆偏振光和右旋圆偏振光的光强相等。若激光偏离了  $\nu_0$ （如在  $\nu$  处），则右旋光的强度
- 大于左旋光的强度  $I_{\text{右}} > I_{\text{左}}$ ；反之，则有
- $I_{\text{右}} < I_{\text{左}}$ 。根据激光器输出的两个圆偏振光光强的差别，就可以判别出激光振荡频率偏离中心频率的方向和大小。这样可以设法形成一个控制信号去调节谐振腔腔长（同样用压电陶瓷），使它稳定在谱线中心频率处。

- 1、塞曼效应双频  $\nu_L, > \nu_R$  稳频激光器：
- 由加纵向均匀磁场的双频激光管（利用压电陶瓷控制腔长的内腔管）、电光调制器（电光晶体加偏振器起鉴别频率作用）、电子伺服系统组成。频率稳定参考点是塞曼效应分裂的左、右旋光频率曲线的交点。
- 2、塞曼效应吸收稳频：从单模激光器中输出线偏振光通过加有正负交变的  $V_{\lambda/4}$  矩形电压的电光晶体，变成交替变化的左旋和右旋圆偏振光；然后再通过加了纵向磁场的Ne吸收管，受到调制，形成误差信号，由光电接收器接收，再经过放大和伺服系统控制腔长的伸缩。

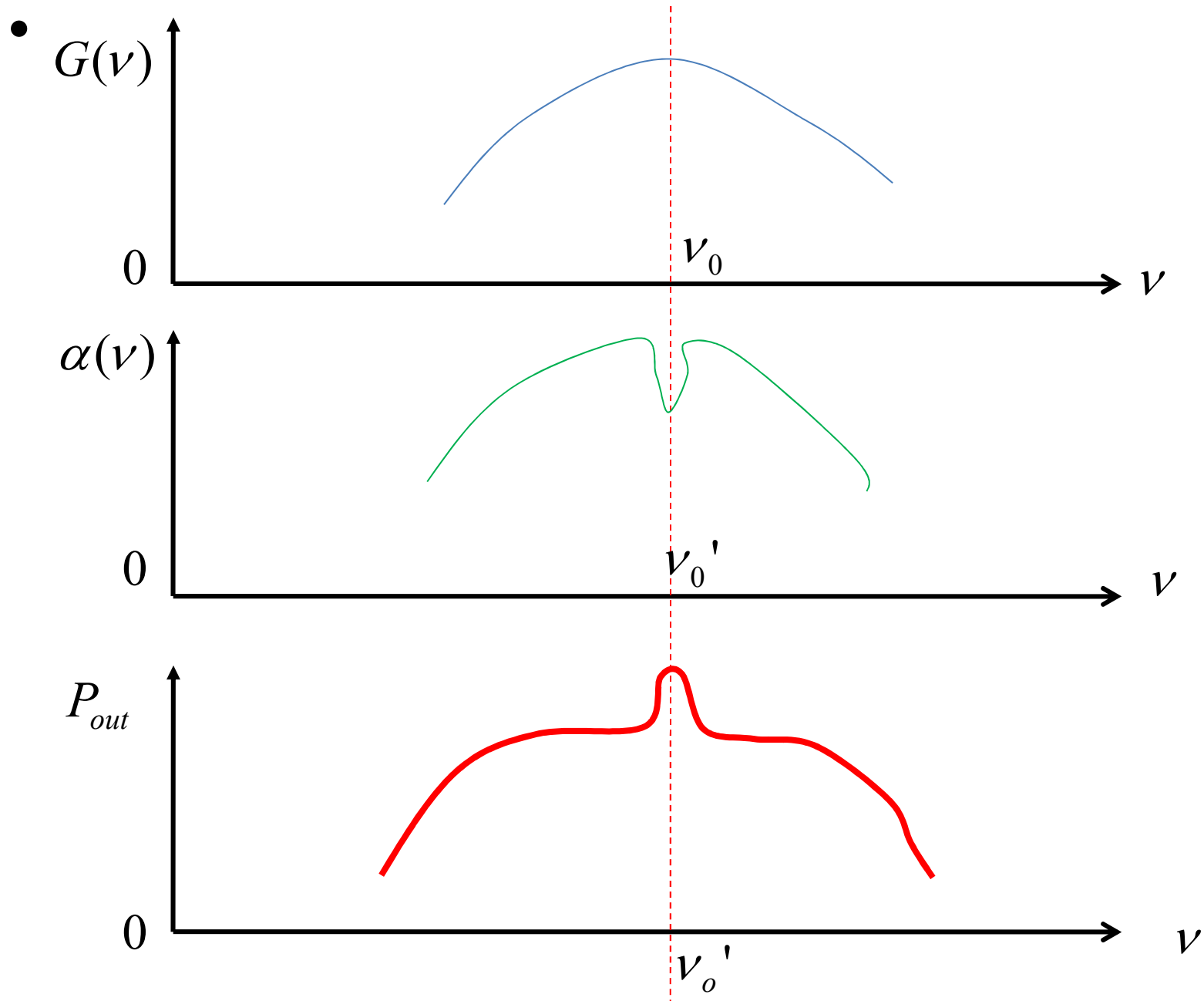
# 塞曼效应吸收稳频激光器

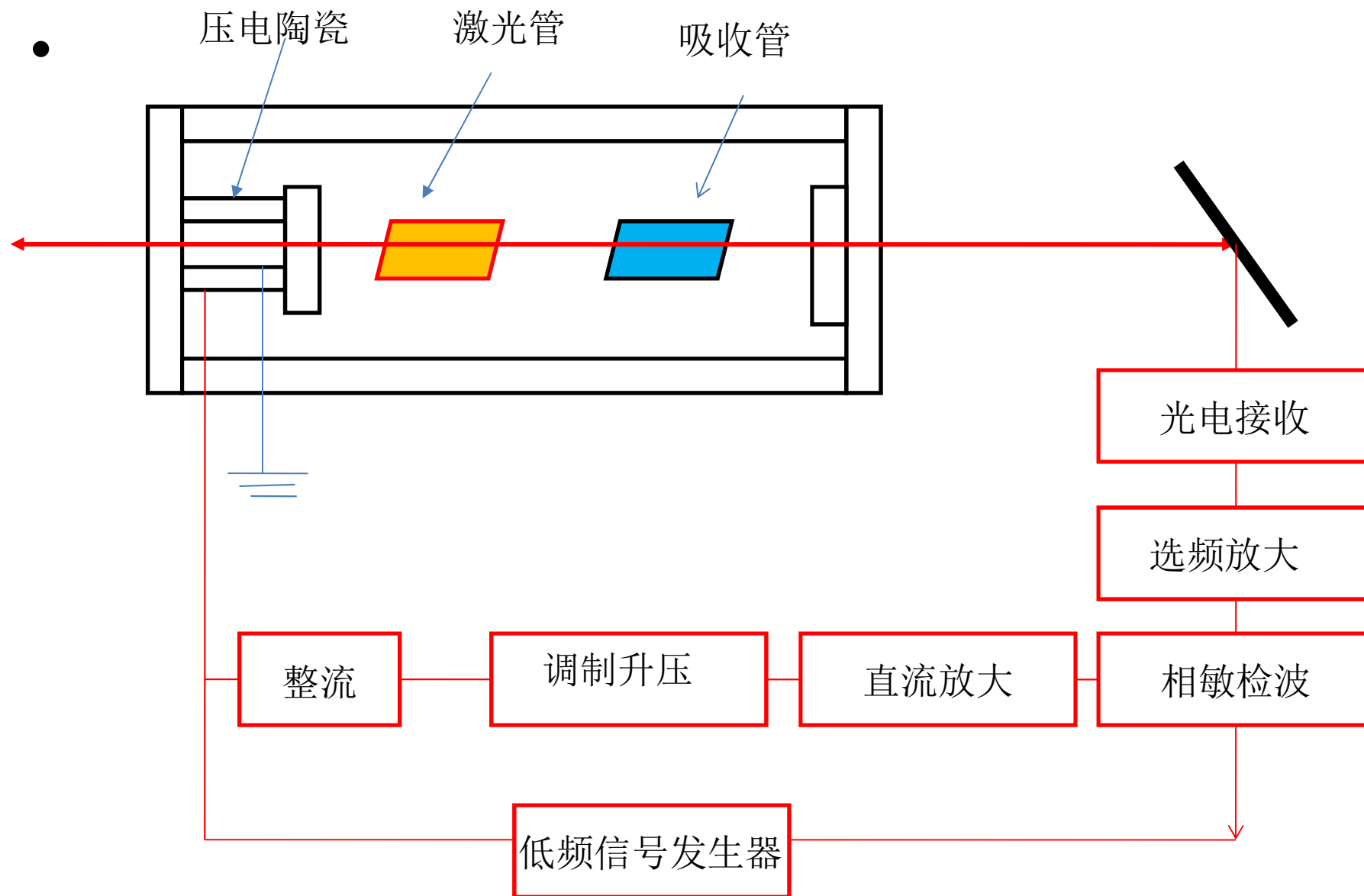




## 饱和吸收稳频（反兰姆凹陷稳频）

- 采用外界参考频率标准进行稳频：在谐振腔中插入一个充有低气压气体原子或分子的吸收管，它有与激光振荡频率配合很好的吸收线。在吸收线中心处形成一个位置稳定而且宽度很窄的凹陷，以此作为稳频参考点，可使其频率稳定性和复现性大大提高。





饱和吸收稳频（反兰姆凹陷稳频）