光泵谐振法检验激光谐振腔

周国生　王持正

（山西大学物理系）

文献[1]介绍了利用He-Ne激光调节谐振腔的方法。他们认为：透过谐振腔的激光模式高，基模强度大，则表示腔体已调节好。目前国内有些单位利用此方法制作He-Ne激光管。但是，有关机理还需要进一步澄清，实验验证也还需进一步完善。文献[2]介绍了另一种方法。他们利用扫频激光射入待调谐振腔，并用示波器测量透射光的峰值。实验证明，通过准直腔体的透射光的峰值功率为极大。本文介绍利用普通He-Ne激光射入谐振腔，根据透过腔体的激光模图的对称性及透射光峰值极大这二个标准，定性检验谐振腔。本文的目的在于阐述现象的物理机理，同时根据实验及简单的理论，提出检验谐振腔平行度的标准，并且讨论与输出激光模式间的联系。

一、机　理

检验谐振腔的实验装置如图1所示。L_1是普通He-Ne激光管，L_2是待调准激光谐振腔，利用屏接收透过待调腔的激光，凭肉眼观察模图。其物理机理如下：

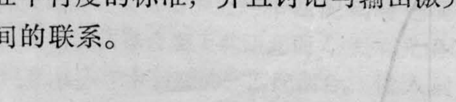

图1　实验装置

1）L_1和L_2间是二谐振腔的非匹配耦合。

根据理论[3]，当L_1、L_2的截面无穷，互相共轴，腔镜与光轴严格垂直时，则由L_1入射基模激光到L_2，将在L_2腔内分解成频率相同的TEM_{00}模及一系列偶数模，其中基模的耦合系数最大。

在实验装置中，由L_1注入待调谐振腔L_2的，是经过光阑（L_2的毛细管）、边缘已被削去的"基模"，而且L_1和L_2可能不完全共轴。附录中计算指出：(1)当L_1、L_2严格共轴，腔镜与光轴垂直时，入射的削了边的基模在L_2腔内分解成频率相同的TEM_{00}模及一系列偶数模，其中以基模的耦合系数最大。(2)当L_1光轴与L_2管轴平行而不共轴，或L_1、L_2不共轴，则入射的削了边的基模在L_2中将分解成TEM_{00}模及一系列奇、偶次模，并且随着腔镜M_3倾角的增大，TEM_{00}模的耦合系数变小。

2）文献[4]推导了以细激光束斜入射到准直的球镜干涉仪中去时腔的法布里-珀罗透射率公式。用完全相同的方法，注意到腔的本征模在腔中往复一周位相差改变为2π的整数倍[5]，而非本征模在腔中往复一周，位相改变不是2π的整数倍，同样可以证明，当入射到腔中光束的模和频率与谐振腔的模和谐振频率相同时，谐振腔的法布里-珀罗透射率最大（不同模的谐振频率不同）。所以谐振腔L_2是一选频器、选模器。

3）L_1激光器在使用过程中，由于热效应，有显著的频率漂移。激光管温度每升高1°C，频率漂移$\Delta\nu\sim10^3$兆周（设玻璃的热胀

收稿日期：1978年11月29日。

系数为 3.0×10^{-6})；因此入射到 L_2 中的激光频率随时间不断改变。当经分解后的入射光的频率与模恰巧和 L_2 腔的谐振频率与模相同时，该模的透射率达极大，在屏上即出现该模的图样。于是，随着时间的推移，屏上依次出现不同的模图。因此我们将这方法称为"光泵谐振法"检验谐振腔。

二、实　　验

实验装置与图 1 相同，L_2 是毛细管内径为 3 毫米的半内腔管，M_2 是曲率半径为 2 米的全反镜，二镜间距为 910 厘米。调节 L_2 使注入 L_2 的激光束与 L_2 共轴(这可由透过 M_2、L_2 后的激光衍射图的对称性观察出来)。M_3 是平面反射镜，它的倾角可调。在 M_3 的不同倾角下，摄制了透射模图(图 2)，并测量了各种模的透射光的强度。最后，将 L_2 点燃，拍摄 L_2 发出的激光模式(图 2)并测量了功率。

实验结果如下：

(1) 当透射光的模只出现偶次模：TEM_{00}、TEM_{02}，…(图 2)，且透射的基模光强度峰值最大(与腔镜 M_3 位于其它倾角时的基模光强峰值相比)，则 L_2 的反射镜与光轴垂直。此结果与理论相符。这时 L_2 的输出功率最大。但该待调激光管发射的是

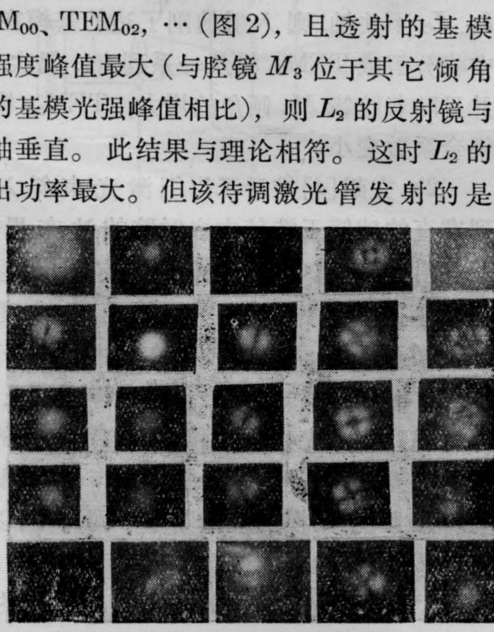

图 2　腔镜 M_3 倾角变化时，透射光模图与输出激光模式图(图中第一列)

(*该模图是经放大后拍摄的)

$r\text{-}\varphi$ 对称的 TEM_{01} 混合模。这是因为毛细管内径约为基模光斑尺寸的 5 倍。当镜 M_3 的倾角 $\theta<1.2'$ 时，L_2 发射 TEM_{01} 混合模(见图 2a 第一张照片)。

(2) 当镜 M_3 的倾角 $1.2'<\theta<1.3'$ 时，L_2 发射 TEM_{01} 模，透射光模图中出现 TEM_{01} 模以及 TEM_{11}、TEM_{21}，甚至更高阶模(图 2b)。

(3) 当镜 M_3 的倾角 $1.3'<\theta<1.7'$ 时 L_2 发射基模，这时透射光模图与(2)相似，但对称性比(2)差(图 2c)。

(4) 当镜 M_3 的倾角 $1.7'<\theta<2.2'$ 时，L_2 发射 $X\text{-}Y$ 对称模，这时透射光模图明显不对称，有 TEM_{02}、TEM_{21}，…模，透射的基模光强度更弱(图 2d)。

(5) 当镜 M_3 的倾角 $\theta>2.2'$ 时，L_2 不发射激光。透射光的模图特点是不存在明晰的低阶模，图形杂乱，光很弱(图 2e)。

总之，随着镜 M_3 倾角的增大，透射光模图的对称性变差。

图 3 是输出光强度(I)、透射光基模强度

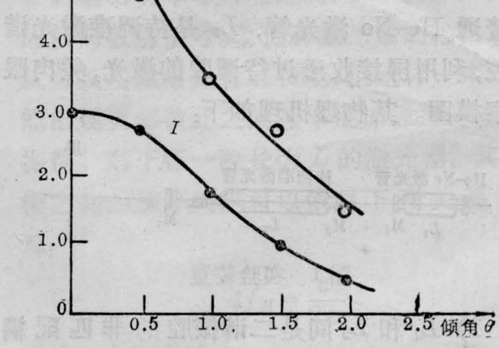

图 3　透射光基模最大强度 I_0、激光功率 I 对 M_3 倾角的关系曲线(图中都是相对坐标)

峰值(I_0)对腔镜 M_3 倾角 θ 的关系。随着透射光基模强度峰值的增大，输出激光功率亦随之增大。此结论与附录计算结果定性相符，也与文献[2]结果定性符合。取透射光基模强度峰值，是因为透射光强度有明显的涨落。由于谐振腔透射率带宽比光泵激光的带宽大得多，腔对不同频率的激光的透射率不同；另外 M_1、M_2 间也有“谐振”现象，使注入腔内的激光强度有明显的涨落。

单独根据透射光模图，不足以决定待调准激光管 L_2 未来发射激光的模式，尤其是在两种模式转变点附近。因为透射光模图和透射光峰值的变化一般是连续的，而激光管的各模式间有竞争效应，有突变。如若同时结合腔的几何参数等因素，加以综合考虑，在某些典型的情况下，可凭经验判断输出激光的模式。譬如选毛细管内径近似等于光斑尺寸的 3.3 倍，当透射模图是对称模式时，则激光管输出一定是基模。

附录　非共轴谐振腔的非匹配耦合

截面无界的共轴谐振腔的非匹配耦合已见文献[3]。现讨论在耦合面上和距此面 L_2 处有光阑(半径为 r)的非共轴谐振腔的非匹配耦合。设入射激光在 x 方向的场分布为 $U_m(x, z)$。它的光轴为 oz。费涅耳数趋于无穷的谐振腔的光轴为 $o'z'c$ (见图4)。它的正交归一化的场分布为 $U'_{m'}(x')$。设 $b \ll l$, $\alpha \ll 1$, $oo'=b$。入射激光在 $o'x'$ 平面上的 x 方向的场分布可近似表示为:

$$U_{mn}(x, y, z)\Big|_{z'=0} = C_{mn}^{(1)} H_m[\sqrt{2}\,\beta x' + \sqrt{2}\,\beta b'] \cdot \exp\{-\beta^2 (x'+b')^2\} \cdot \exp\left\{-\frac{ik}{2R}(x'+b')^2\right\}$$

这里 $\beta = \dfrac{1}{w}$, 是光斑尺寸的倒数。$b' = b + \left(\dfrac{L}{2} + l\right)\alpha$, R 是入射波的波面曲率半径。

与文献[3]的方法相同，可将 U_{mn} 在 $z'=0$ 处按 $U'_{m'}(x')$ 分解，得:

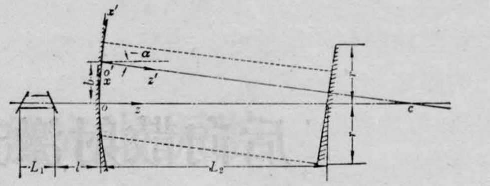

图4　非共轴谐振腔的非匹配耦合

$$U_m(x) = \sum_{m'} C_{mm'} U'_{m'}(x')$$

耦合系数 $C_{mm'}$ 由下式表示:

$$C_{mm'} = C_m^{(1)} C_{m'} \int_{-(r+b')+\alpha L}^{r-b'} H_m(\sqrt{2}\,\beta x' + \sqrt{2}\,\beta b') \cdot H_{m'}(\sqrt{2}\,\beta' x') \cdot \exp\left\{-\beta^2 (x'+b')^2 - \beta'^2 x'^2 - \frac{ik}{2R}(x'+b')^2 - \frac{ik}{2R'} x'^2\right\} dx'$$

设入射光为基模，则在 x 方向二低阶耦合系数为:

$$C_{00} = C_0^{(1)} C'_0 e^{+\frac{p^2}{q} - b'^2\left(\beta^2 + \frac{ik}{2R}\right)} \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{q}} [\Phi(a_1) + \Phi(a_2)]$$

$$q = \beta^2 + \beta'^2 - \frac{ik}{2R} - \frac{ik}{2R'}$$

$$p = b'\left[\beta^2 + \frac{ik}{2R}\right]$$

$$a_1 = \sqrt{q}\,(r - b') + \frac{p^2}{\sqrt{q}},$$

$$a_2 = -\sqrt{q}\,(r + b') + \frac{p^2}{\sqrt{q}} + \alpha L。$$

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

$$C_{01} = C_0^{(1)} C'_1 e^{+\frac{p^2}{q} - b'^2\left(\beta^2 + \frac{ik}{2R}\right)} \left(-\frac{\sqrt{2}\,\beta'}{q}\right) \cdot \left\{e^{-\sqrt{q}a_1} - e^{-\sqrt{q}a_2} + \sqrt{\pi}\frac{p}{\sqrt{q}}[\Phi(a_1) + \Phi(a_2)]\right\}$$

显然，若入射激光与谐振腔共轴，$\alpha=0$, $b=0$, 则 $C_{01}=0$。根据对称性，也可以证明，在此条件下，奇次模的耦合系数为零。

参　考　文　献

[1] “调准 He-Ne 气体激光管谐振腔的一种方法”，《激光》, 1975, **2**, No 1, 41～43。

[2] K. G. Herngvist, A. H. Firester; *Rev. Sci. Instrum.*, 1975, **46**, 1040.

[3] H. Kogelnik; Proceedings of the Symposium on Quasi-Optics (Polytechnic Press, 1964), 333,

[4] D. Herriott, H. Kogelnik, R. Kompfner; *Appl. Opt.*, 1964, **3**, 523.

[5] A. G. Fox, T. Li; *Bell. Sys. Tech. J.*, 1961, **40**, No. 2, 453～488.