

一种分析望远镜热稳定腔的新方法

陆祖康 范畴康 赵 阳 邱文法
张利明 包成芳
(浙江大学光仪系)

提 要

本文报道了一种分析望远镜热稳定腔的新方法——组合透镜法。运用这种方法,成功地实现了 Nd:YAG 脉冲激光器的稳定而大体积 TEM₀₀ 模运转,在 1~10 pps 重复率范围内,振荡级的单脉冲输出能量达 250 mJ,输出能量起伏小于 ±2%。

关键词: 望远镜热稳定谐振腔。

一、引 言

望远镜热稳定腔由于具有抗热效应扰动性强及能实现大体积 TEM₀₀ 模运转的优点而受到重视,它已在重复率 Q 开关 Nd:YAG 脉冲激光器^[1,2]及锁模脉冲激光器^[3]等方面获得应用。

望远镜热稳腔利用望远镜系统的光束的扩束作用实现大体积 TEM₀₀ 模运转,并通过合理选择腔参数使谐振腔在一定的泵浦功率下处于热不灵敏的工作状态。但随之带来的问题可归纳如下三个方面:(1) 望远镜系统在负透镜至全反镜区域内对光束产生压缩,易造成腔内光学元件的光损伤;(2) 必须选择合适的望远镜离焦量 δ , 不然,会使腔处于热敏感状态或甚至处于非稳腔状态;(3) 由于腔内光学元件多,导致腔耗增加,同时由于光学元件间不可避免地存在非共轴安装误差,导致在调节 δ 时的腔失谐。

对于望远镜热稳定腔的分析,一般采用光线传递矩阵的解析法^[4],这种方法具有较高的精确性,但难以找出能揭示一般规律的简明关系来指导对这种腔的最佳设计和正确调整,为此,人们已做了许多工作^[1,5,6]。

本文报道了一种简明且保持较高精密性的计算方法。利用这种方法可对望远镜热稳腔的结构作出最佳设计,同时,还研制出在大重复率范围内都能实现高稳定度、高功率输出的 Nd:YAG 激光器,反复实验证明,激光器运转安全可靠,并发现实验结果和理论分析基本符合。

二、望远镜热稳腔的一般特性

望远镜热稳定腔的基本结构如图 1 所示。图中 F_1, F_2 构成具有适当离焦量 δ 的望远镜系统,它们的焦距分别为 f_1, f_2 , 望远镜的名义放大率为 $\Gamma = (-f_2/f_1)$; F_R 是激光棒的

等效热透镜, 在重复率脉冲 Nd:YAG 激光器的平均泵浦功率下, F_R 可看成一等效薄透镜,

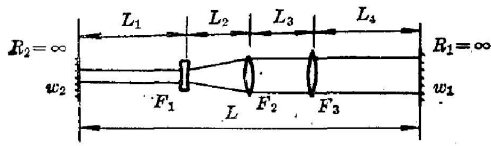


Fig. 1 Experimental arrangement of a telescopic resonator

其焦距为 f'_R 。 L_2 为望远镜的光学筒长: $L_2 = f'_1 + f'_2 + \delta$ 由于可方便地通过对 δ 的调节实现腔稳定状态的选择, 故谐振腔一般采用平行平面腔, 即 $R_1 = R_2 = \infty$ 。

图 1 所示的谐振腔, 其腔内单程光线传递矩阵为

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & L_4 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -(1/f'_R) & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -(1/f'_2) & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -(1/f'_1) & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

一旦腔结构参数确定后, 且满足稳定腔条件, 可利用 (1) 式中的矩阵元 A, B, D 确定输出端镜和全反镜上的光斑尺寸 ω_1, ω_2 :

$$\omega_1^2 = \frac{\lambda_0 B}{\pi} \left[\frac{G_2}{G_1(1 - G_1 G_2)} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

$$\omega_2 = \omega_1 \sqrt{G_1/G_2}, \quad (3)$$

式中 $G_2 = A, G_1 = D$, 矩阵之 B 的含义是作为望远镜腔的等效腔长。

L_4 较小时, 按热不灵敏条件^[7]腔参数之间须满足:

$$\left. \frac{\partial \omega_1}{\partial f'_R} \right|_{f'_R=f'_{R_0}} = 0, \quad (4)$$

这里 f'_{R_0} 是某一确定的泵浦功率下, 激光棒的名义等效热焦距。

为了了解望远镜热稳定腔的一般特性, 利用 (1)~(3) 式计算并绘制出光斑尺寸 ω_1, ω_2 对热焦距 f'_R 的关系曲线, 如图 2 所示, 以及对离焦量 δ 的关系曲线, 如图 3 所示。图 2 表示当其它腔结构参数不变时, 随着 f'_R 减少, 必须相应地增加望远镜的离焦量 $|\delta|$, 即以大的负光焦度补偿加剧了的热透镜效应, 但此时热稳区压缩, 使激光器处于不利的运转状态。因而欲获得重复率 Nd:YAG 脉冲激光器稳定和大体积 TEM₀₀ 模运转, 必须对泵浦的平均功率 (包括重复率、单次泵浦能量等) 提出限制, 同时选择光学质量均匀、热效应小的 Nd:YAG 棒也是极为重要的先决条件。

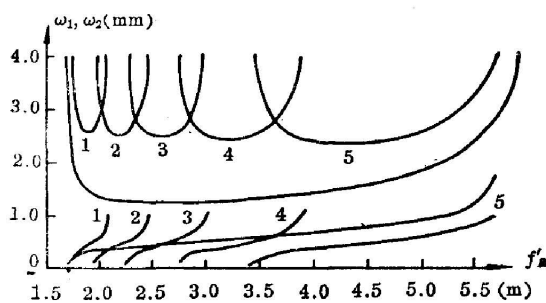


Fig. 2

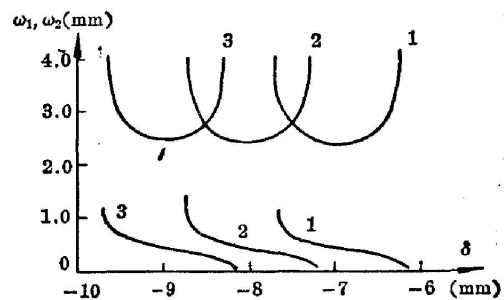


Fig. 3

图 3 表示当 f'_{R_0} 改变时, δ 有大致相同的调节误差范围, 只要调节 δ 值恰当, 仍能在不同的热焦距 f'_{R_0} 下在满足热稳定条件时有大致相等的光斑尺寸。从图 2、图 3 中还可看出, 望远镜处于热稳状态时, 并不满足 $(\omega_1/\omega_2) = F$ 的关系。换言之, 望远镜的横向放大率不能

简单应用于望远镜热稳腔。故在注意提高 TEM_{00} 模体积(即 ω_1)的同时, 应充分考虑 ω_2 的减小可能带来的危害。

望远镜热稳腔的各结构参数对光斑尺寸 $\omega_1\omega_2$, 稳定区域及离焦量的充许失调范围有不同程度的影响。图 4 表示在总腔长、热透镜及望远镜放大倍率相同的条件下, 仅使 L_1 和 L_3 在布置上发生改变, 发现随 L_1 的减少 ω_1 明显下降, 但稳定区展宽了, 即热稳定性能得到改善。

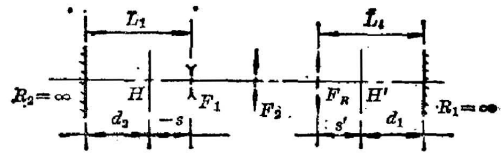
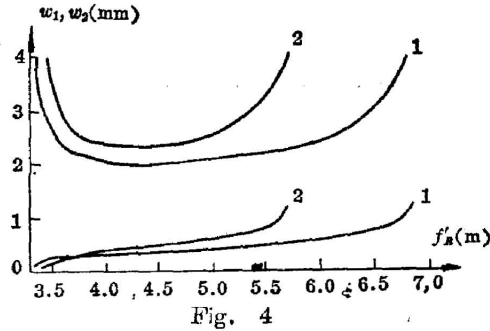


Fig. 5

三、运用合成光组的近似分析法

为了寻求能反映望远镜热稳定腔的腔结构参数对腔特性的影响, 我们采用合成光组的近似分析方法。

首先将图 1 中的 F_1 , F_2 及 F_R 等效成一合成光组物, 等效情况如图 5 所示。 f' 为合成光组的焦距, s 为合成光组物方主面至 F_1 的距离, s' 为合成光组像方主面至 F_R 的距离。

根据几何光学中有关合成光组的计算方法, 并考虑到在一般情况下有 $f'_R \gg f'_2$ 以及 $f'_2 \gg \delta$, 经过合理近似后, 可得到

$$f' = \frac{-f'_1 f'_2 f'_R}{f'_2 + \delta(f'_R - L_3 + f'_2)}, \quad (5)$$

$$s = \frac{-f'_1(L_2 f'_R + L_2 f'_2 - f'_1 L_3)}{f'_2 + \delta(f'_R - L_3 + f'_2)}, \quad (6)$$

$$s' = \frac{f'_R(L_2 f'_2 - \delta L_3)}{f'_2 + \delta(f'_R - L_2 + f'_2)}. \quad (7)$$

因此, 可利用平行平面腔内插入一透镜的简单情况计算腔参数。参阅图 5 的布置, 则腔参数 G_1 , G_2 及等效腔长 B 为

$$G_1 = 1 - \frac{d_2}{f'} = 1 - \frac{L_1 + s}{f'}, \quad (8)$$

$$G_2 = 1 - \frac{d_1}{f'} = 1 - \frac{L_4 - s'}{f'}, \quad (9)$$

$$B = d_1 + d_2 - \frac{d_1 d_2}{f'} = f'(1 - G_1 G_2). \quad (10)$$

有了上述关系式, 仍可利用 (2)、(3) 式较为精确地求得 ω_1 , ω_2 值。

如果存在 $L_2 f'_R \gg (L_2 f'_2 - L_3 f'_1)$ 以及 $L_2 f'_2 \gg \delta L_3$, 对 (6)、(7) 式可作进一步近似

$$s = \frac{f' L_2}{f'_2}, \quad (11)$$

$$s' = -\frac{f' L_2}{f'_1}. \quad (12)$$

以(10)式代入(3)式,并令 $(\partial\omega_1/\partial f'_R)=0$,同时在演算中利用(11)、(12)式,从而得到近似条件下的望远镜的热稳条件

$$L_1 G_2 - L_4 G_1 (1 - 2G_1 G_2) - 2f' G_1 G_2 (1 - G_1 G_2) = 0. \quad (13)$$

从大量的计算(典型的结果如表1所示)以及文献[6]的结论知,当 $(\partial\omega_1/\partial f'_R)=0$ 时,可选取 G 参数近似有 $G_1 G_2$ 等于0.5的关系,故(13)式、(10)式可进一步简化为

$$f' - s = 2L_1, \quad (14)$$

$$B = (f'/2). \quad (15)$$

Table 1 The resonator parameters* on the condition of the thermo-stability operation

structure parameter of cavity $f'_1 = -0.0408, f'_2 = 0.149$	cavity characteristics									
	$G_1 G_2$	f' (m)	B'_0 (m)	B_0 (m)	δ'_0 (mm)	δ_0 (mm)	ω'_1 (mm)	ω_1 (mm)	ω'_2 (mm)	ω_2 (mm)
$L_1=0.5, L_3=0.4$ $L_4=0.16, f'_R=2.5$	0.50	4.59	2.28	2.29	-8.3	-8.4	2.47	2.38	0.48	0.46
$L_1=0.5, L_3=0.4$ $L_4=0.16, f'_R=4.0$	0.49	4.26	2.18	2.13	-4.3	-4.4	2.36	2.30	0.43	0.44
$L_1=0.7, L_3=0.4$ $L_4=0.16, f'_R=4.0$	0.49	5.80	2.96	2.90	-4.8	-4.8	2.76	2.67	0.50	0.52
$L_1=0.3, L_3=0.4$ $L_4=0.16, f'_R=4.3$	0.49	2.71	1.41	1.35	-3.1	-3.0	1.87	1.83	0.35	0.35

* In the table 1, the $\delta'_0, B'_0, G_1 G_2, \omega'_1, \omega'_2$ are calculated with the single-pass ray matrix and the $\delta_0, B_0, f', \omega_1$ and ω_2 are calculated with the equations (16), (15), (5), (17) and (18) respectively.

以(5)、(6)式代入(14)式,化简中略去相对小量,得到在热稳条件下插入平行平面腔中的望远镜系统的合适离焦量 δ_0 为

$$\delta_0 = \frac{[f'_1(f'^2_2 + f'_1 f'_R)/2L_1] - f'^2_2}{f'_R + f'_2 - L_3}. \quad (16)$$

将(10)式代入(2)式,并注意到热稳条件下有 $G_1 G_2 \sim 0.5$ 的关系,不难求得热稳条件下TEM₀₀模在输出镜上的束腰半径 ω_1 为

$$\omega_1^2 = \frac{\lambda_0 B}{\pi} \left[\frac{G_2}{G_1(1 - G_1 G_2)} \right]^{1/2} = \lambda_0 f' \frac{G_2}{\pi}.$$

以(12)式代入(9)式,并考虑到热稳条件的假设条件之一,即Nd:YAG棒应尽可能接近输出镜^[7],故 (L_4/f') 可予忽略,故得 $G_2 = \Gamma - \frac{\delta}{f'_1} - \frac{L_4}{f'} \simeq \Gamma$ 。所以,输出光束的束腰半径为

$$\omega_1 = \left(\frac{\lambda_0 f' \Gamma}{\pi} \right)^{1/2}. \quad (17)$$

同样,从(2)、(12)式,可求得此时在全反镜上的光束束腰半径

$$\omega_2 = (\omega_1 / \sqrt{2} \Gamma). \quad (18)$$

所以,当望远镜稳定腔处于热稳定状态时,在两个腔端镜上的光束束腰比为

$$(\omega_1/\omega_2) = \sqrt{2} \Gamma. \quad (19)$$

它们不再简单地符合望远镜横向放大率的关系, ω_2 要比想象的情况更为小一些。

值得再次强调的是,在运用(15)、(17)、(18)式时必须注意到只有当望远镜腔处于热稳定条件时它们才近似成立。

为了更直观地表示影响 f' 的主要因素,可将(11)式代入(14)式得 $f' \sim 2L_1\Gamma$, 它说明望远镜热稳腔的 TEM₀₀ 模体积主要取决于 L_1 及 Γ , 因此在一般的望远镜热稳腔的结构中都采用较长 L_1 的布置。

四、实验及结论

望远镜热稳腔可以用平行平面腔内插入一等效合成光组 F 进行简化分析。表 1 所示的计算结果,充分说明这种近似分析方法具有较高的准确性。

一旦腔参数确定后,可利用(16)式精确地计算出合适的离焦量 δ_0 , 然后可用(5)、(17)、(18)式估算出热稳条件下的合成焦距 f' 及光斑尺寸 $\omega_1\omega_2$, 使得 $\omega_1 = (kD/2)$, 其中 D 为激光棒的直径而 k 是考虑限模光阑和 TEM₀₀ 束腰的比值,一般 $k=1\sim 0.7$ 。

图 6 是利用腔内单程光线传递矩阵的计算方法求得的 ω_1 、 ω_2 、 B 及 G_1G_2 值随 f'_R 的变化关系曲线以及用(5)式求得的合成焦距 f' 变化曲线,从该图中可以看出:当 $0 < G_1G_2 < 1$ 时,腔处于稳定腔状态,且当 $G_1G_2 \rightarrow 1$ 时,合成焦距 $f' \rightarrow \infty$, 而等效腔长 B 在稳定区变化缓慢, B 值可以用(15)式得到较精确的估算。

设计望远镜热稳腔时还应注意如下几方面:

(1) 光损伤: 由于 ω_2 的压缩使全反镜至望远镜负透镜间的光功率密度高度集中,易造成光学元件的光破坏或者在光迹处产生光致大气电离,例如图 2 所示的系统中 $(\partial\omega_1/\partial f'_R) = 0$ 时的 $\omega_2 \approx 0.5$ mm, 如果此时的单脉冲输出能量为 100 mJ, 脉宽为 15 ns, 输出镜反射率为 20%, 则全反镜上应承受的平均光功率密度达 1 GW/cm^2 。这就对全反镜的介质高反膜的抗光性提出苛刻的要求。即使介质膜的抗光性能满足这一要求,仍有两个问题值得注意: 其一是高重复率运转条件下,由于强光烧蚀吸附在全反镜上的尘埃,导致局部范围内介质膜因吸收增加而加速破坏。因此对重复率 Nd:YAG 望远镜热稳腔,严格的防尘及防水气的保护措施是非常必要的。其二由于离焦量

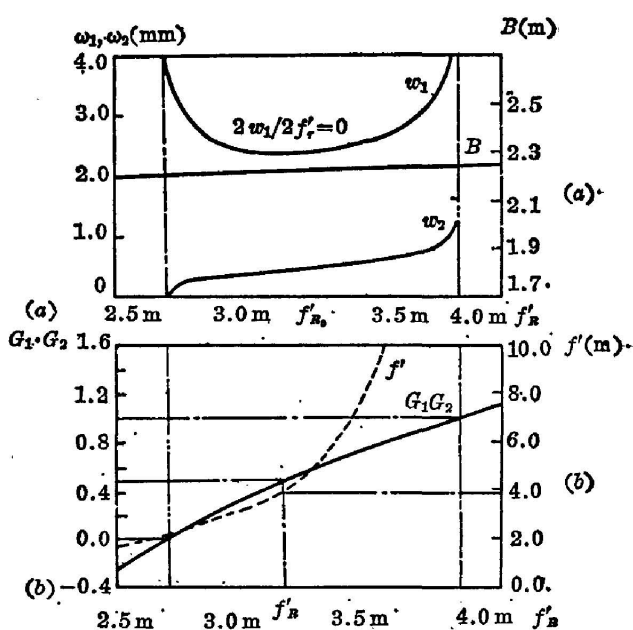


Fig. 6

的失调很有可能使腔工作在图 7 阴影所示的被称为“危险区”的范围内, 此时 ω_2^2 成倍减少, 这将不可避免地造成光破坏。图 7 还启示我们, 若 f'_R 的实际值未知时, 应使 δ 向负方向预置一个足够大的离焦量, 然而再在激光器运转的实验中仔细调节至正确位置。

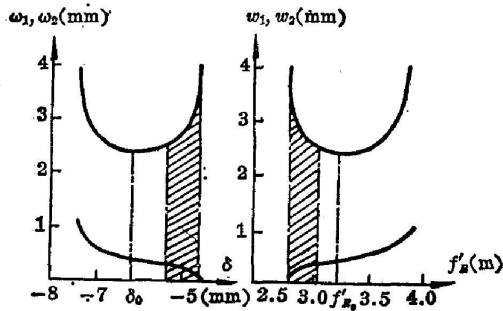


Fig. 7

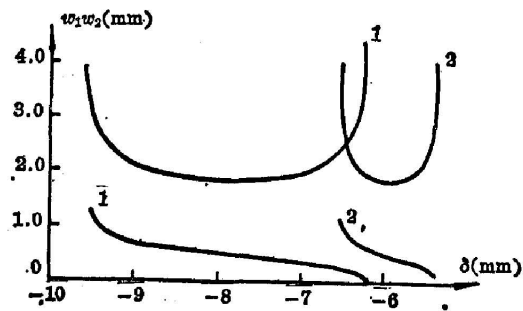


Fig. 8

(2) 望远镜焦距的选择: 图 8 展示了保持一定 $\Gamma = (-f'_2/f'_1)$ 值及其它的腔结构参数不变的情况下, 望远镜光组焦距的选择对离焦量调节范围的影响。显然, f'_1 (或 f'_2) 选择得大, δ 所允许的相对调节误差也大, 它将对结构设计及实验工作带来方便。

(3) 重复率范围: 在总腔长确定后, 选择大的 Γ 及 L_1 会有效地提高 TEM₀₀ 模体积。但在不同的重复率下, 由于 f'_R 的变化, 必须重新调节离焦量 δ , 如果望远镜光组在装校上存在偏差, 则重新调节 δ 时, 会导致腔失谐。这对使用者极不方便。适当减少 Γ 或 L_1 虽然会使 ω_1 下降, 但望远镜在某一固定的离焦量处, 稳定区所覆盖的 f'_R 范围扩大了。图 2 中用虚线表示的曲线是 Γ 减一倍而其它参数不变的情况下得到的。此时谐振腔可以适应于 1~15 pps 重复率范围, 而不必重新改变 δ 。在 10 pps 重复率处 (即 $f'_R \sim 2.5$ m) 恰是热稳定点, 换言之, 10 pps 是该激光器的标称重复率。

(4) 望远镜腔由于结构需要, 一般均采用长腔方式。这样会使脉冲展宽, 输出功率相应减少, 对后继的倍频等非线性谐波转换不利。但其优质的光束质量以及接近衍射极限的束发散度却有利于谐波转换时的位相匹配^[8], 另外, 宽脉冲还有利于泵浦染料激光器及光参量振荡器时的线宽压缩, 故适当的腔长从上述意义上看是可取的。

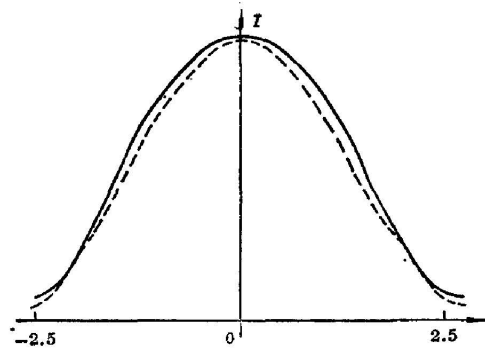


Fig. 9

基于上述考虑, 我们成功地在 STY-1000 型重复率 Nd:YAG 激光器中实现了望远镜热稳腔的运转。激光器的重复率为 1~10 pps, 振荡级采用 $\phi 6 \times 85$ 的 YAG 棒。在 10 pps 重复

率下, 单脉冲输出能量达 250 mJ, 脉宽为 13~15 ns, 并实现了长期稳定而安全的运转, 输出能量起伏小于 $\pm 2\%$, 振荡级输出优良的 TEM₀₀ 模, 其远场分布 (如图 9 所示) 与高斯分布基本一致, 光束的发散度为 0.4 mrad, 接近衍射极限, 整机的二次谐波效率达 56%, 三次谐波效率达 20%。

参 考 文 献

- [1] D. C. Hanna *et al.*; *Optics Comm.*, 1981, **37**, No. 5 (Jun), 359.
- [2] 私人通信。
- [3] A. J. Berry *et al.*; *Optics Comm.*, 1981, **40**, No. 1 (Aug), 54.
- [4] L. Z. Kang and Y. Zhou; *«ICL 83'»*, digest p. 556.
- [5] P. H. Sarkies; *Optics Comm.*, 1979, **31**, No. 2 (Aug), 189.
- [6] D. C. Hanna *et al.*; *Opt & Quant. Elec.*, 1981, **13**, No. 6 (Nov), 493.
- [7] J. Steffen *et al.*; *IEEE J. Q. E.*, 1972, **QE-8**, No. 2 (Feb), 339.
- [8] Y. C. Hua, Z. K. Lu *et al.*; *«光学学报»*, 1986, Vol. 6, No. 5 (May), 413.

A new method for analysing the thermo-stable telescopic resonator

LU ZUKANG, FAN QIKANG, ZHAU YANG, WIN WENFA,

ZHANG LIMING AND BAO CHENFANG

(Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou)

(Received 1 December 1986; revised 16 February 1987)

Abstract

A new simplified method—compound lens method— for analysing the thermo-stable telescopic resonator is reported. Using this method, we successfully obtained the stable output with a large volume of TEM₀₀ mode for a high repetition rate Nd:YAG laser. The output energy of the resonator at 1.06 μm is 250 mJ per. pulse over the range of 1~10 pps, and the output energy fluctuation is less than $\pm 2\%$.

Key Words: Telescope; thermo-stable; resonator.