

腔内倍频晶体对环形激光腔参数的影响*

李健 刘杰

(山东师范大学物理系, 济南 250014)

徐剑秋 吴令安

(中国科学院物理研究所, 北京 100080)

提要 在六镜环形腔 YAG 稳频激光器的基础上, 讨论了插入倍频晶体对激光腔参数的影响, 并实验验证了分析结果。

关键词 六镜环形腔, 内腔倍频, 谐振腔稳定性

1 引言

连续高功率输出的 YAG 稳频倍频激光器在基础光学和应用光学领域里有广泛的应用, 特别是研究量子光学和非线性光学时往往需要高功率的单纵模连续光源。获得高功率的倍频输出一般采用内腔倍频的方法。目前国内在环形腔 YAG 激光器上利用 $MgO: LiNbO_3$ 晶体和 KTP 晶体进行内腔倍频已获得较高的单纵模倍频光输出^[1,2]。使用的方法均为在近共焦腔内插入倍频晶体进行倍频, 但在讨论确定激光腔参数时只对无晶体状态进行了计算。文献[1]虽对计算结果进行了修正^[3], 但仍未给出插入倍频晶体对激光腔参数影响的讨论。这使得实验结果带有偶然性。我们利用光学矩阵方法对插入倍频晶体时激光腔参数的变化进行了讨论, 并进行了实验验证。

2 计算与讨论

六镜环形腔 YAG 激光器的腔形如图 1 所示。图中 $M_1 \sim M_4$ 为平面反射镜, M_5, M_6 为曲率半径为 R 的凹面反射镜, 组成一近共焦谐振腔, C 为倍频晶体, YAG 为激光棒。

设倍频晶体长度为 $2d$, 折射率为 n , 晶体端面到 M_5 或 M_6 的距离为 L , YAG 棒的等效热透镜焦距为 F_1 , M_5 和 M_6 的 YAG 棒等效热透镜的光程分别为 l_2 和 l_3 , 以倍频晶体中心 O 为参考面。考虑到最佳倍频效果, 参考面 O 处应恰为光腰, 因此光路应为对称形光路, 这时有 $l_2 = l_3 = l$, 则等效光路如图 2, 其中 $f = R/2$, 为 M_5, M_6 的等效焦距。

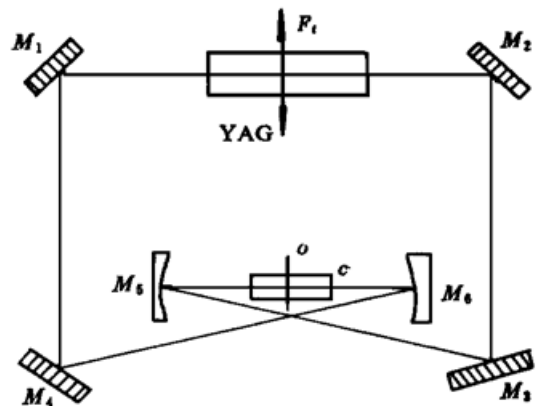


Fig. 1 Schematic of a six-mirror ring YAG laser cavity

* 国家自然科学基金委资助项目。

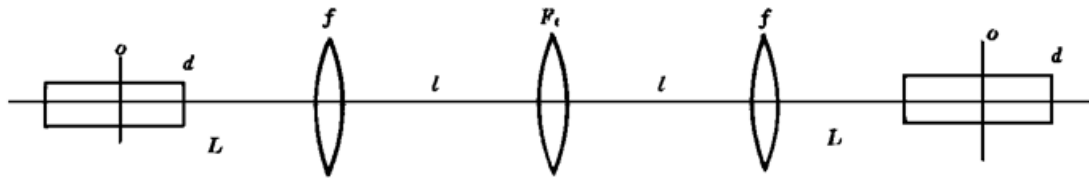


Fig. 2 The equivalent light way of the laser cavity

由此可计算出激光腔的 $ABCD$ 矩阵及各矩阵元为:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1/n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/F_t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & n_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$A = D = \frac{1}{nf^2} \{ nf^2 + 2[(l-f)(d+nL) - nfl] \} - \frac{1}{F_t} (l-f) [(l-f)(d+nL) - nfl] \quad (2)$$

$$B = 2 \left[1 - \frac{d}{nf} \right] [d + n(l+L)] - \frac{1}{f} [(2l+L)(d+2nL) + dL] + \frac{2l}{nf^2} (d+nL)^2 - \frac{1}{nf^2 F_t} [(l-f)(d+nL) - nfl]^2 \quad (3)$$

$$C = \frac{1}{nf^2} (l-f) \left[2 - \frac{l-f}{F_t} \right] \quad (4)$$

$$\text{当矩阵元} \quad A + D = 0 \quad (5)$$

时, 激光腔对 YAG 棒热透镜焦距 F_t 随泵浦功率的起伏反应是不灵敏的^[4], 这时有

$$F_t = \frac{(l-f) [(l-f)(d+nL) - nfl]}{nf^2 + 2[(l-f)(d+nL) - nfl]} \quad (6)$$

由激光腔的稳定条件

$$|A + D| < 2 \quad (7)$$

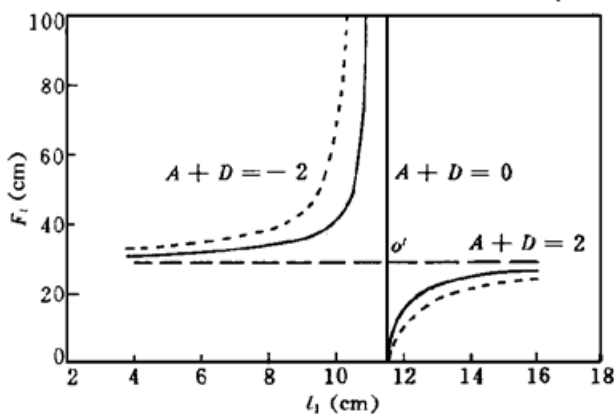


Fig. 3 Relation of thermal lens focal length F_t vs concave mirrors spacing l_1 in stability diagram of the ring YAG laser

则可作出激光腔的热透镜焦距 F_t 与近共焦腔长 l_1 [$l_1 = 2(L+d)$] 对应的稳定区域图及最佳稳定曲线 ($A + D = 0$)。以 MgO: LiNbO_3 倍频晶体为例, 其 $n = 2.25$, $2d = 12 \text{ mm}$, 则稳定区域如图 3 所示, 图中的 O' 点为由第一稳区到第二稳区的交界点, 对应的近共焦腔长为 l_{10}' , 则当 $l_1 < l_{10}'$ 或 $l_1 > l_{10}'$ 时激光腔分别处于第一、二稳定区, 激光器工作在第二稳定区时的输入功率比第一稳定区时的要高。随着晶体长度 $2d$ 的不同, 稳定区的位置也将发生变化, 令

$$A + D = K(L) + \frac{M(L)}{F_t} \quad (8)$$

则在交界点 O' 处, $F_t = 0$, 这时应满足 $M(L) = 0$, 经计算可得到:

$$l_{10}' = \frac{2lf}{l-f} + 2d(1-1/n) \quad (9)$$

交界点 O' 的位置随 $2d$ 呈线性变化。

激光腔内倍频晶体中心 O 处的光腰半径 w_0 可由光学传递矩阵给出^[5]

$$w_0^2 = \frac{\lambda}{\pi|c|} \sqrt{1 - \left[\frac{A+D}{2} \right]^2} \quad (10)$$

再考虑到 $A + D = 0$, 则有

$$w_0^2 = \frac{\lambda}{\pi(l-f)} \left| (l-f)(d+nL) - nfl \right| \quad (11)$$

即可得到在 $A + D = 0$ 条件下的 w_0 与 l_1 的对应变化关系(图4), w_0 的极小值对应于 l_{10}' 。

由满足相位匹配条件的最佳耦合条件可求出激光棒内的光束半径 w_p 与倍频晶体中光束半径 w_0 之比应满足^[6]

$$\frac{w_0}{w_p} = \frac{8\alpha n_1}{\lambda} \left[\frac{\mu_0}{\epsilon_0} \right]^{3/4} \left[\frac{h^3 \pi^3 \Delta v^3 \Delta v}{n^3} \right]^{1/2} \frac{2d}{\sqrt{L_i}} \quad (12)$$

其中 α 为倍频晶体的有效非线性系数, n_1 为 YAG 棒的折射率, λ 为基频光波长, μ_0, ϵ_0 分别为真空磁导率和真空介电常数, h 为普朗克常数, $v, \Delta v$ 为基频光频率及谱线宽度, L_i 为腔内功率损耗, n 为倍频晶体折射率。

为利用 YAG 棒的增益, 让基频光尽可能充满棒, 这时由(12)式可算出 w_0 有一最佳值 w_{0m} , 则由图4或(11)式找出对应的最佳近共焦腔长的值 l_{1m} , 并可由(6)式算出最佳热透镜焦距 F_{1m} , 最后推断出输入功率的最佳值, 由此即确定了最佳的激光腔参数, 这时的激光腔应最稳定, 倍频效率最高。

3 实验验证

我们利用山西大学光电所制作的环形腔 YAG 激光器, 在中国科学院物理研究所改成六镜环形腔后, 将计算结果进行了验证, 实验结果与理论分析符合得很好, 实验装置如图5所示。

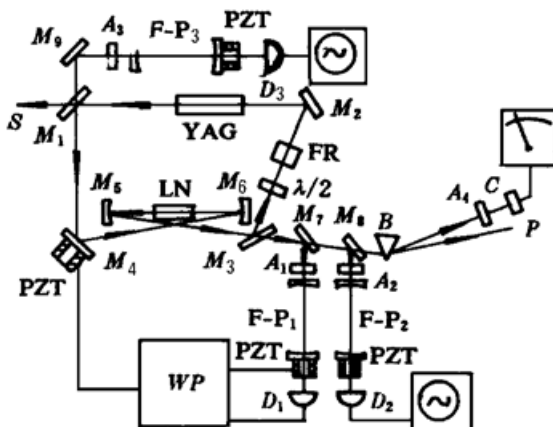


Fig. 5 Schematic of an internally frequency doubled cw stabilized ring YAG laser system. M_1, M_2, M_4 : plane mirrors highly reflecting at 1064 nm; M_3 : plane mirror highly reflecting at 1064 nm at Brewster's angle; M_5, M_6 : Concave mirrors of radius of curvature 10 cm, highly reflecting at 1064 nm and 96% reflecting at 532nm; FR: Faraday rotator; $\lambda/2$: half-wave plate for 1064nm; LN: Ti: MgO: LiNbO₃ crystal

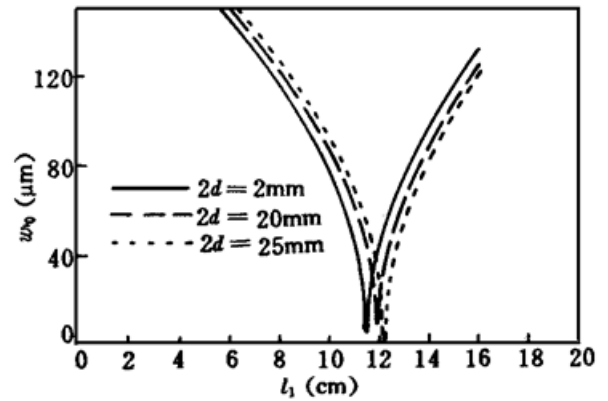


Fig. 4 Relation of beam waist w_0 vs concave mirrors spacing l_1

我们分别对无倍频晶体腔 ($2d = 0$) 和长度分别为 12 mm, 20 mm 及 25 mm 的 MgO: LiNbO₃ 晶体插入近共焦腔进行了计算和实验, 其中 12 mm 的晶体为角度匹配, 20 mm 及 25 mm 的晶体是温度匹配的。理论计算数据与实验结果的比较如表 1。

Table 1 Comparison of the theoretical data and experimental results

$2d$ (mm)	w_{om} (μm)	l_{10}' (cm)		l_{1m} (cm)		F_l (cm)	Input power
	Theoretical data	Theoretical data	Experimental results	Theoretical data	Experimental results	Theoretical data	Experimental results
0	33.4	10.86	10.8	10.21	10.2	83.10	0.7 kW
				11.52	11.5	17.52	2.1 kW
12	56.29	11.53	11.5	10.70	10.8	60.43	1.0 kW
				12.36	12.4	19.10	2.0 kW
20	64.09	11.97	11.9	10.90	11.0	48.48	1.2 kW
				13.05	13.0	20.71	1.9 kW
25	69.28	12.25	12.2	10.99	11.1	44.06	1.2 kW
				13.51	13.3	21.60	1.9 kW

从表 1 中可看出, 插入倍频晶体后, 近共焦腔长 l_1 的最佳值有一明显的变化, 而且倍频晶体越长, 凹面反射镜间距需越大, 实验已经验证了这一点, 这和文献[1, 3] 中所指出的一致, 即在一共焦腔中加一块晶体, 腔长必须拉长才能保持稳定度, 利用此方法可在激光器其他光学参数稳定的前提下, 将激光器的倍频效率调整到最佳状态, 这时输出的倍频光是最稳定的。

参 考 文 献

- 1 Li Jian, Wu Ling-An. Single-mode CW 532 nm output of 1.3 W by internal frequency doubling with Ti: MgO: LiNbO₃. *Chinese J. of Lasers*, 1994, **B3**(1): 17
- 2 郜江瑞, 王海, 黄茂全等. 六镜环形腔 Ce: Nd: YAG 倍频稳频激光器. *中国激光*, 1993, **A20**(10): 721
- 3 Wu Ling-An, Ph. D. Dissertation. Squeezed states of light from an optical parametric oscillator, Univ. Of Texas at Austin, Texas, U. S. A., 1987. 26
- 4 Peng Kunchi, Wu Ling-An, Kimble H. J.. Frequency-stabilized Nd: YAG laser with high output power. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(7): 938
- 5 卢亚雄, 吕百达. 矩阵光学. 大连: 大连理工大学出版社, 1989 年第一版. 206
- 6 雅里夫 A.. 光电子学. 北京: 科学出版社, 1983 年第一版. 232

Influence of an Internal Frequency-doubling Crystal on the Cavity Parameters of a Ring Laser

Li Jian Liu Jie

(Department of Physics, Shandong Normal University, Jinan 250014)

Xu Jianqiu Wu Lingan

(Institute of Physics, Academia Sinica, Beijing 100080)

Abstract The insertion of a frequency-doubling crystal in a single mode six-mirror ring YAG laser cavity will influence the stability region and other parameters. The presented experimental results are in good agreement with a theoretical analysis.

Key words six-mirror ring cavity, internal frequency doubling, resonator stability