

文章编号: 1001-3806(2003)04-0328-03

折叠腔腔参数对内腔倍频系统稳定性的影响*

王鹏飞 吕百达

(四川大学激光物理与化学研究所, 成都, 610064)

摘要: 使用矩阵光学方法分析了 V 型折叠腔内腔倍频激光系统稳定运行的条件。分析了腔几何参数包括腔的尺寸、反射镜的曲率半径以及倍频晶体的热焦距对系统稳定性的影响, 并作了数值计算和讨论。

关键词: V 型折叠腔; 内腔倍频激光器; 谐振腔稳定性; 矩阵光学

中图分类号: TN248.1+3 文献标识码: A

The influence of folded-resonator parameters on the stability of intracavity frequency-doubled lasers

Wang Pengfei, Lü Baida

(Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu, 610064)

Abstract: The thermally stable condition of V-shaped intracavity frequency doubled lasers with folded resonator is analyzed based on the matrix optics. The influence of resonator parameters including the resonator length, curvature radii of mirrors and thermal focal lengths of the laser rod and doubled crystal on the system stability is analyzed with numerical examples.

Key words: V-folded resonator; intracavity frequency doubled laser; resonator stability; matrix optics

引 言

谐振腔参数的选择在内腔倍频激光器的设计中非常重要, 腔参数选择不当不仅影响谐振腔的稳定性, 也很容易激发腔内非线性过程引起的功率波动。对高功率、高次谐波的光束质量, 谐振腔的稳定性变得尤其关键^[1]。激光器动态运行时, 腔内晶体包括增益晶体和倍频晶体的热焦距也将对腔的稳定性产生影响。作者使用矩阵光学的方法研究了折叠腔内包括腔的尺寸、反射镜的曲率半径等几何参数及腔内倍频晶体热焦距对系统稳定性的影响, 所得结果对 V 型折叠腔内腔倍频激光器的设计有参考意义。

1 理论分析

现以图 1 所示 V 型折叠腔内腔倍频激光器为例进行分析。增益晶体设为 Nd:YAG, 倍频晶体为 KTP。在腔的设计中考虑到 Nd:YAG 和 KTP 的

透镜效应后得到图 2 的等效光路图。其中 Nd:YAG 的等效热透镜焦距为 f_t , KTP 的等效热透镜焦距为 f_k 。KTP 的端面到 M_1 的距离 l_1 , 到 M_2 的距离 l_2 , Nd:YAG 到 M_2 的距离为 l_3 , 到 M_3 的距离为 l_4 。 M_1, M_2, M_3 的曲率半径分别为 R_1, R_2, R_3 。

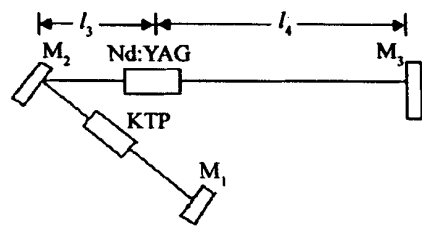


Fig. 1 Schematic diagram of a V-shaped folded resonator

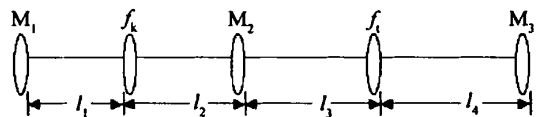


Fig. 2 Equivalent optical configuration of the V-shaped folded resonator shown in Fig. 1

以镜 M_1 为参考系统单程变换矩阵为:

$$m = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & l_4 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_t & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & l_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_k & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

* 国防科技重点实验室基金及国家高技术基金资助项目。

作者简介: 王鹏飞, 男, 1977 年 10 月出生。硕士研究生。主要从事高功率固体激光技术的研究。

收稿日期: 2002-07-12; 收到修改稿日期: 2002-09-02

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_k & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, $f_i = R_i/2 (i = 1, 2, 3)$ (2)

$$\begin{cases} a = [(1 - l_4/f_1)(1 - l_3/f_2) - l_4/f_2] \times \\ \quad (1 - l_2/f_k) - (l_3 + l_4 - l_3l_4/f_1)/f_k \\ b = [(1 - l_4/f_1)(1 - l_3/f_2) - l_4/f_2] \times \\ \quad (l_1 + l_2 - l_1l_2/f_k) + \\ \quad (l_3 + l_4 - l_3l_4/f_1)(1 - l_1/f_k) \\ c = [- (1 - l_3/f_2)/f_1 - 1/f_2] \times \\ \quad (1 - l_2/f_k) - (1 - l_3/f_1)/f_k \\ d = [- (1 - l_3/f_2)/f_1 - 1/f_2] \times \\ \quad (l_1 + l_2 - l_1l_2/f_k) + \\ \quad (1 - l_3/f_1)(1 - l_1/f_k) \end{cases} \quad (3)$$

则以 M_1 为参考系统的往返变换矩阵为:

$$M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d & b \\ c & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_3 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

M_2 离轴放置, 在子午面和弧矢面内的焦距分别为 $f_{子午} = R_2 \cos \varphi/2, f_{弧矢} = R_2 \sec \varphi/2$ (φ 为球面反射镜上的入射角), 导致在子午面和弧矢面内模参数不同, 此即像散。若取 $R_2 \rightarrow \infty$, 则 $f_{子午} = f_{弧矢}$ 。考虑 $R_2 \rightarrow \infty, R_1 = R_3 = R$ 的情形, 并令 $l_2 + l_3 = l_{23}$, 得:

$$\begin{cases} a = (1 - l_4/f_1)(1 - l_{23}/f_k) - l_4/f_k \\ b = l_1 + l_4 - l_1l_4(1/f_1 + 1/f_k) + \\ \quad l_{23}[1 - (l_1/f_k + l_4/f_1) + l_1l_4/f_1f_k] \\ c = [l_{23} - (f_1 + f_k)]/f_kf_1 \\ d = - (l_1 + l_{23})/f_1 + l_1l_{23}/f_1f_k + 1 - l_1/f_k \end{cases} \quad (5)$$

使用 G 参数等价法分析^[2]。令 $G_1 = a - b/R_1, G_2 = d - b/R_3$, 系统的稳定性条件为:

$$0 < G_1G_2 < 1 \quad (6)$$

$$G_1G_2 = 0.5 \quad (7)$$

是系统最佳稳定运行的条件, 此时激光腔对 f_1 随泵浦功率的起伏反应是不灵敏的。

为了提高 2 次谐波转换效率一般有 $l_1 = l_{01}$, 其中 $l_{01} = bG_2(a - G_2)/(G_1 + a^2G_2 - 2aG_1G_2)$ 为以 M_1 为参考的腰斑位置: $f_1^{-1} = kP_{LD}^m$, 系数 k, m 由具体的实验条件决定, 在文献^[3]的高功率内腔倍频实验中 $k \approx 0.11, m = 1$; 认为 KTP 的热透镜效应源于折射率随温度的变化则有 $f_k = \gamma A/P_a(0.5dn/dT)^{-1}$, 其中 $\gamma = 3.3W/m \cdot K$ 为 KTP 的热导率, A 为腔内基波光束的截面面积, P_a 为 KTP 晶体吸收

的泵浦功率, $dn/dT = 1.6 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 为折射率的温度系数^[4]。鉴于 KTP 晶体对基波的吸收是对倍频波吸收的 10 倍以上, 故在上面认为 KTP 的热透镜效应主要由对基波的吸收引起。

有了以上参数, 可以在给定部分腔参数的情况下研究某些特定参数对激光系统稳定性的影响, 对于给定的激光系统也可以分析并确定其稳定运行的最佳区域。由数值计算可以研究 W_{end} (增益晶体端面的光斑半径) 与 P_{LD} (泵浦功率) 的关系, l_1, l_4, l_{23}, R_i 等腔参数对 W_{end}, W_{01} (M_1M_2 腔臂光束腰斑半径) 以及 l_{01} (以镜 M_1 为参考 W_{01} 的位置) 的影响; 若给定谐振腔, 可以由数值计算得到 W_{end} 与 P_{LD} 的关系曲线, 研究系统热稳定的泵浦功率范围。 $f_k \rightarrow \infty$ 为不考虑 KTP 热焦距的情形, 这是中小功率水平下对倍频晶体的处理方式, 高功率运行下应考虑 f_k , 只要给定倍频晶体的相关参数就可以研究其热焦距对系统稳定运行的影响。

2 计算结果及讨论

先暂不考虑 KTP 热焦距, 图 3 给出了满足最佳稳定条件, $l_4 = 450\text{mm}$ 时对于不同的 R, W_{end} 随 f_1 的变化曲线。可以看出 R 越小, W_{end} 也越小, 同时

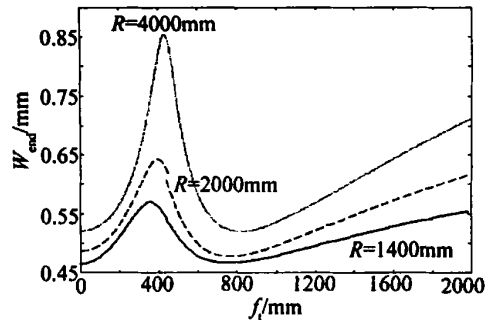


Fig. 3 W_{end} as a function of f_1 for different values of R under the optimized stable condition

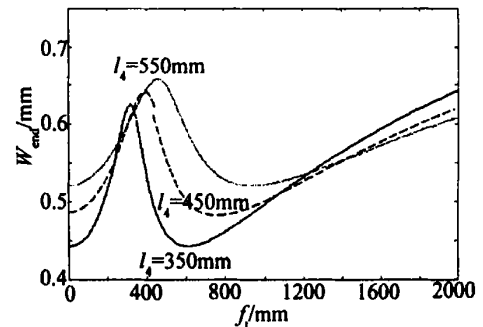


Fig. 4 Parameter W_{end} as a function of f_1 for different of l_4 under the optimized stable condition

随泵浦功率的波动也较小, 还可以看出在最佳稳定运行条件下 W_{end} 对泵浦功率的变化并不敏感。图 4

给出了满足最佳稳定条件 $R = 2000\text{mm}$ 时对于不同的 l_4 , W_{end} 随 f_t 的变化曲线, 在高泵浦功率端, l_4 增大 W_{end} 随之增大且波动减小。一般来说, 较大的 W_{end} 更有利于基频光充满激光介质棒, 从而获得更高的基频光转换效率, 由上述分析可知, 在保持系统最佳稳定运行条件下, 适当增大 l_4 以及 R 是获得较高基频光转换效率的可行方法。

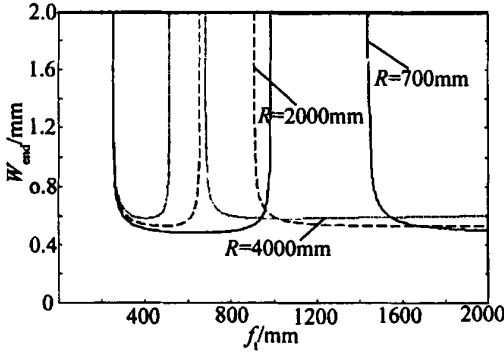


Fig. 5 W_{end} as a function of f_t for different values of R

图5~图7则给出了几个参数给定系统的 W_{end} 随 f_t 的变化关系。图5计算参数为: $l_{\text{total}} = 1020\text{mm}$, $l_4 = 450\text{mm}$ 。它说明较小的 R 更有利于系统在高泵浦功率下的稳定运行, 随着 R 增大系统稳定运行区域向低泵浦功率区移动。图6计算参数

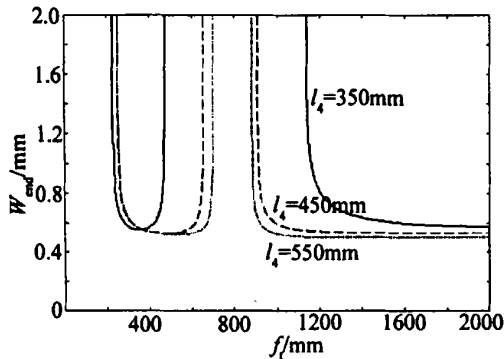


Fig. 6 W_{end} as a function of f_t for different values of l_4

为: $l_{\text{total}} = 1020\text{mm}$, $R = 2000\text{mm}$ 。它说明总腔长 l_{total} 一定, l_4 越小在低泵浦功率区对应的 W_{end} 越大, 这意味着可以获得更大的基频光输出, 从而倍频光也可以相应较大, 但可以看出这种情况对应的稳定区较小; 图7计算参数为: $l_4 = 450\text{mm}$, $R = 2000\text{mm}$ 。它说明 l_4 一定, l_{total} 越小对应的稳定区越宽。文献[5]中的实验表明, 在 l_{total} 相同时, l_4 小的腔型尽管在较低的输入功率下绿光输出比较高, 但由于其稳定区太小, 只适用于较低泵浦功率情况; l_4 相同时, l_{total} 小的腔型稳定区较宽, 这与上述理论计算结果是一致的。

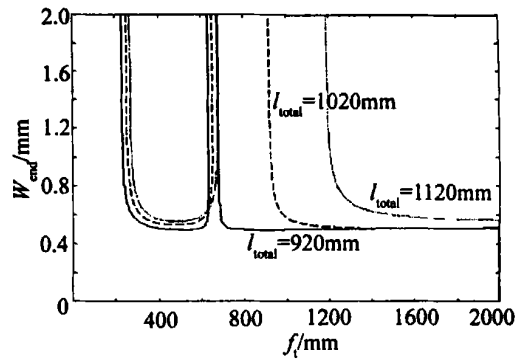


Fig. 7 W_{end} as a function of f_t for different values of l_{total} when l_4 is a constant

现在讨论 f_k 对系统稳定性的影响。图8给出不考虑 KTP 热焦距即 $f_k \rightarrow \infty$ 与 $f_k = 20f_t$ 时 W_{end} 随 f_t 的变化曲线, 计算参数为: $l_1 = 150\text{mm}$, $l_{23} = 420\text{mm}$, $l_4 = 450\text{mm}$, $R = 2000\text{mm}$ 。可以看出, 考虑到 f_k 较之不考虑其影响时系统稳定区变大了。由于 f_k, f_t 的影响, 倍频晶体上的光斑半径是变化的, 因此也导致了倍频效率的波动。

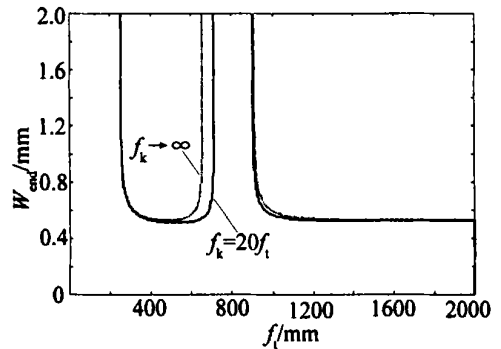


Fig. 8 W_{end} as a function of f_t for different values of f_k

对于 Z 型折叠腔等具有更多腔臂的腔型, 可以采用上述类似的方法分析其稳态运行的条件以及有关腔参数对系统稳定性的影响, 并用于在实验中选择合适的腔参数。

3 结论

使用矩阵光学方法详细分析了 V 型折叠腔内腔倍频系统反射镜曲率半径、腔臂长度、总腔长等几何参数以及倍频晶体的热焦距对系统热稳定性的影响, 这对于实验中针对不同的泵浦功率选择合适的腔参数具有参考价值。

参考文献

[1] Fujikawa S, Inoue Y, Konno S *et al.* SPIE, 2000, 3930: 115.
 [2] 吕百达. 激光光学. 2版, 成都: 四川大学出版社, 1992.
 [3] Konno S, Fujikawa S, Yasui K. Appl Opt, 1998, 37(27): 6401.
 [4] Kojima T, Fujikawa S, Yasui K. IEEE J Q E, 1999, 35(3): 377.
 [5] 徐士华, 侯学元, 孙渝民 *et al.* 激光杂志, 2000, 21(1): 17~ 18.