

控制微变形镜稳定固体激光器输出的研究

许泽帅^{1,2}, 羊毅², 兰卫华², 董涛²

(1. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471009;

2. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471009)

摘要: 介绍了无源共轴球面腔闭合条件的一般性矩阵表示。针对固体激光器光腔中热透镜效应, 利用 Matlab 符号运算功能, 得出热透镜光腔的闭合条件; 建立了自行闭合的热稳腔模型, 将光腔的闭合条件和热透镜效应模型结合, 随着泵浦功率的提高, 通过控制微变形镜来自适应改变腔镜曲率半径, 进而可以使固体激光谐振腔的输出稳定。

关键词: 固体激光器; 热透镜效应; 共轴球面腔; 闭合腔; 自行闭合

中图分类号: V271.4; TN202 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)12-0077-03

Controlling of Micro-Deformable Mirror for Stabilizing Output of Solid-State Laser

XU Zeshuai^{1,2}, YANG Yi², LAN Weihua², DONG Tao²

(1. Science and Technology on Electro-Optic Control Laboratory, Luoyang 471009, China;

2. Luoyang Institute of Electro-Optic Equipment, Luoyang 471009, China)

Abstract: Passive coaxial spherical cavity is introduced by using a general matrix. In view of the thermal-lens effect in the cavity of solid-state laser, the closure conditions of thermal lens optical cavity was obtained by using symbolic operation of Matlab. The automatic closed thermal stable cavity model was established, combining the closure condition with the thermal lens effect model of optical cavity. The mirror curvature radius was changed adaptively by controlling the deformable mirror with the increase of pumping power, thus could make the output of resonant cavity of solid-state laser stable.

Key words: solid-state laser; thermal-lens effect; coaxial spherical cavity; closed cavity; self-closing

0 引言

固体激光器具有输出能量大、峰值功率高、结构紧凑、牢固耐用等优点, 而且材料种类非常多, 可以促使固体激光器的性能进一步提高。在高功率半导体激光侧向泵浦固体激光器中, 由于热透镜效应, 激光晶体可等效为一个焦距随泵浦功率变化的薄透镜, 对谐振腔的几何参数和振荡模产生影响, 从而直接影响了激光输出的功率和光束质量。热效应严重时, 甚至可能改变原有激光腔的约束稳定性, 导致腔损耗过大^[1]。

本文通过矩阵光学^[2]的方法, 建立了自行闭合的热稳腔模型, 将光学闭合条件与热透镜模型结合, 采用微变形镜作为腔镜, 随着泵浦功率的提高, 通过控制微变形镜来自适应改变腔镜曲率半径, 进而可以使固体

激光谐振腔稳定输出, 降低腔损耗。

1 无源共轴球面腔闭合条件的仿真

用几何光学的方法^[3-4]研究空间近轴光线的变换, 一般是 4×4 的变换矩阵, 但对于轴对称光学系统, 只需要用一个 2×2 的矩阵表示。

$$M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \quad (1)$$

图1中所表示的就是共轴光学系统^[5]。

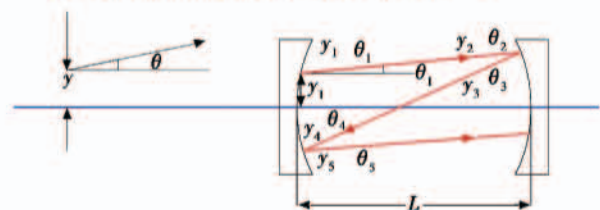


图1 光线在腔内传播几何方法分析

Fig. 1 Propagation of light in the cavity

用式(1)来描述这一变换为

$$\begin{pmatrix} y_2 \\ \theta_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y \\ \theta \end{pmatrix} \quad (2)$$

即

$$\begin{cases} y_2 = Ay + B\theta \\ \theta_2 = Cy + D\theta \end{cases} \quad (3)$$

可以简写为

$$Y' = MY \quad (4)$$

又由近轴球面波曲率半径 R , 可以得到

$$R = \frac{y}{\theta} \quad (5)$$

所以球面波的 $ABCD$ 定律可以写为

$$R' = \frac{AR + B}{CR + D} \quad (6)$$

当光线顺序通过多个光学系统时, 可以得到

$$M_1 = \begin{pmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{pmatrix}, \quad M_2 = \begin{pmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{pmatrix} \quad (7)$$

同理, 可以写出通过 N 个光学系统的矩阵表示为

$$M = \underbrace{M_1 \cdot M_2 \cdot \dots \cdot M_N}_{n \uparrow} \quad (8)$$

运用矩阵光学的办法得出光束在腔内走半周的矩

阵为 $M_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{\rho_1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ 。再在左边腔镜反射返

回去半周的矩阵为 $M_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{\rho_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ 。所以, 来

回一周的的矩阵为 $M = M_2 M_1$ 。同理, 可以得出来回的一般矩阵表示为

$$M = \begin{cases} \underbrace{M_2 \cdot M_1 \cdot \dots \cdot M_1}_{n \uparrow}, n = 2m, m = 1, 2, 3, \dots \\ \underbrace{M_1 \cdot M_2 \cdot \dots \cdot M_1}_{n \uparrow}, n = 2m + 1, m = 1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad (9)$$

所以, 根据闭合条件,

$$M = E \quad (10)$$

式中, E 为单位矩阵。

2 热透镜光腔闭合条件的仿真

加入热透镜后模型如图 2 所示。

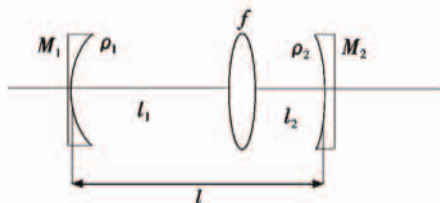


图 2 加入热透镜后简化模型

Fig. 2 A simplified model after adding a thermal lens
 M 矩阵可以表示为

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/\rho_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/\rho_2 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: l_1 为 M_1 镜到热透镜中心的距离; l_2 为 M_2 镜到热透镜中心的距离; ρ_1, ρ_2 为凹面镜 M_1 和 M_2 的曲率半径; f 为热透镜焦距。

$$M^n = E \quad (12)$$

式中: E 为单位矩阵; n 为光线传播的次数。对式 (12) 进行求解, 对于不同的 n 进行讨论, 经过 3 个半周 ($n = 3$) 闭合的条件为

$$\rho_1 = -(2 * \rho_2 * (f * l_1 + f * l_2 - l_1 * l_2)) / (\rho_2 * l_1 - 3 * \rho_2 * f + \rho_2 * l_2 + 2 * f * l_1 + 2 * f * l_2 - 2 * l_1 * l_2) \quad (13)$$

经过 4 个半周 ($n = 4$) 闭合的条件为

$$\rho_1 = -(2 * \rho_2 * (f * l_1 + f * l_2 - l_1 * l_2)) / (\rho_2 * l_1 - 2 * \rho_2 * f + \rho_2 * l_2 + 2 * f * l_1 + 2 * f * l_2 - 2 * l_1 * l_2) \quad (14)$$

在求解传播 4 个半周以上的闭合条件时, 由于这是高阶非线性方程, 没有得出具体的解析解。

热透镜效应是由激光棒内热不均匀分布与热应变光弹性引起的折射率不均匀变化形成的。激光棒的综合热透镜焦距为^[6]

$$f = \frac{K \pi r_0^2}{\eta P_{in}} \left[\frac{1}{2} \frac{dn}{dT} + n_0^3 a C_{r,e} + \frac{a r_0 (n_0 - 1)}{l_h} \right]^{-1} \quad (15)$$

式中: K 表示热导率; r_0 为激光棒的半径; P_{in} 为泵浦功率; $\frac{dn}{dT}$ 为折射率温度系数; n_0 为棒中心折射率; a 为介质热膨胀系数; $C_{r,e}$ 为介质光弹性系数的函数 (径向和切向具有不同的数值); l_h 为介质长度; η 为热负荷系数。介质材料为 Nd:YAG, $r_0 = 1.5 \text{ mm}$, $l_h = 75 \text{ mm}$, $K = 0.013 \text{ W/mmK}$, $\frac{dn}{dT} = 7.3 \times 10^{-6} / \text{K}$, $n_0 = 1.82$, $a = 7.9 \times 10^{-6} / \text{K}$, $C_{r,e} = 0.0165$, 热透镜焦距和泵浦功率关系如图 3 所示, 从图中可看出, 泵浦功率越大, 热透镜焦距越小, 热透镜效应对激光器输出特性的影响也越严重。

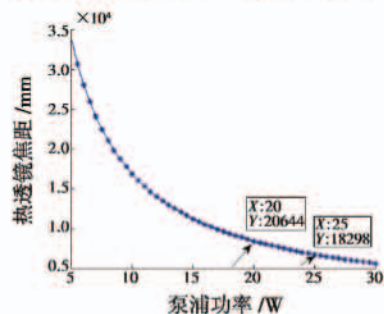


图 3 热透镜焦距和泵浦功率关系

Fig. 3 The thermal focal length versus the pump power

通过图 3 可以看出, 热透镜的焦距变化与泵浦功率有关, 结合式 (13) 和式 (14), 可以通过微变形镜来调整曲率半径 ρ_1 , 使它满足闭合条件, 进而可以使光束

稳定输出,原理如图 4 所示。

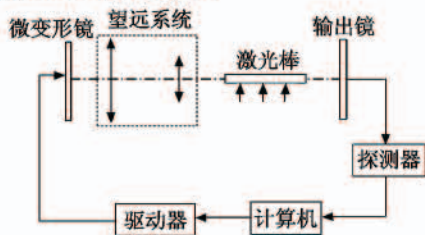


图 4 控制微变形镜改变曲率半径原理图
Fig. 4 The schematic diagram of controlling the deformable mirror to change the radius

当泵浦功率由 20 W 到 25 W 时,假设 $l_1 = 100$ mm, $l_2 = 100$ mm, 第 2 块腔镜 $\rho_2 = 50$ mm, 结合 3 个半周闭合条件式(13), 可以得到曲率半径的变化量如图 5 所示。

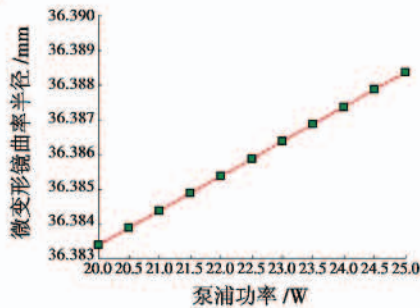


图 5 微变形镜曲率半径与泵浦功率关系图

Fig. 5 The pump power versus the radius of deformable mirror

结合 4 个半周闭合条件式(14), 可以得到曲率半径的变化量如图 6 所示。

通过图 5 和图 6 可知, 3 个半周闭合情况下, 泵浦功率从 20 W 变到 25 W 时, 微变形镜曲率半径从 38.3834 mm 到 38.3884 mm, 激光保持稳定输出; 4 个半周闭合情况下, 泵浦功率从 20 W 变到 25 W 时, 微变形镜曲率半径从 40.0478 mm 到 40.0599 mm, 激光保持稳定输出。

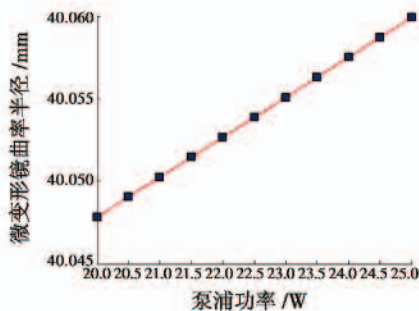


图 6 微变形镜曲率半径与泵浦功率关系图

Fig. 6 The pump power versus the radius of deformable mirror

3 结束语

通过用矩阵光学的方法, 介绍了无源共轴球面腔闭合条件的一般性矩阵表示。针对固体激光器光腔中热透镜效应, 建立了自行闭合的热稳腔模型, 利用 Matlab 符号运算功能, 得出热透镜光腔的闭合条件, 通过控制微变形镜来改变腔镜曲率半径, 进而可以使固体激光谐振腔持续保持稳定输出。

参考文献

- [1] 谢武, 余建华, 毕成, 等. 全固体激光器热透镜效应及其对激光输出和腔稳定性的影响[J]. 中国激光, 33(3):70-71.
- [2] 吕百达. 矩阵光学方法在谐振腔理论中的应用[J]. 激光杂志, 1989, 10(6):241-245.
- [3] 吕百达. 激光光学[M]. 成都: 四川大学出版社, 1992.
- [4] 周炳琨, 高以智, 陈家骅, 等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [5] 盛家铁. 关于“光学谐振腔稳定条件”的讨论[J]. 湘潭大学自然科学学报, 1985(2):94-102.
- [6] 黄峰, 汪岳峰, 牛燕, 等. 激光二极管侧面泵浦高重频固体激光器热效应研究[J]. 军械工程学院学报, 2004, 16(3):26-28.

欢迎关注新浪微博 @电光与控制