

非对称平直腔固体激光器的动力学分析

徐之光 吕福云* 王宏杰 张光寅

(南开大学物理科学院, 天津 300071)

摘要: 利用传播圆图解方法, 分析了非对称平直腔固体激光器的热透镜效应对激光器的动力学稳定区的宽度、基模光斑尺寸和发散角的影响。此方法避免了传统 ABCD 矩阵法所需的繁琐计算, 结果清晰明了, 进而给出了测量晶体热焦距的一个简单方法。在该理论的指导下, 设计了符合试验条件的谐振腔参量, 并进行了实验研究, 测量了激光二极管端面抽运的 Nd:YVO₄ 激光器的热焦距和光斑模式, 当抽运功率 23 W 时获得了稳定的 10 W 准基模连续输出, 实验结果与理论符合得很好。

关键词: 激光物理; 动力学稳定区; 传播圆; 热透镜; 平直腔

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

1 引言

大功率连续输出的固体激光器在材料加工、远距离通信、光存储等方面有着十分重要的用途。但在固体激光器的运行过程中, 随抽运光功率的增加, 腔内晶体棒的热聚焦作用将会有较大的变化, 热焦距可以从数米变化至数十厘米。显然, 这将极大地影响固体激光器的输出特性。Blows 等^[1]的研究表明固体激光器的输出功率明显的依赖热透镜在腔内的位置。至今, 人们已经对热透镜对固体激光器运行的影响此进行了一系列的研究^[2,3], 但传统的矩阵分析方法需要大量的计算, 比较繁琐。本文利用传播圆图解方法, 分析了非对称平直腔固体激光器的热透镜效应对动力学稳定区的宽度、基模光斑尺寸和发散角的影响, 给出了测量晶体热焦距的一个简单方法。当抽运功率 23 W 时获得了稳定的 10 W 准基模连续输出, 并测量了激光二极管端面抽运的 Nd:YVO₄ 固体激光器的热焦距和光斑模式, 实验结果和理论吻合得很好。

2 理论分析

2.1 两镜腔传播圆

根据传播圆图解方法^[4], 两腔镜激光器的稳定性可以很容易的确定: 以光轴上的两点为圆心, 分别以两腔镜 R_1 和 R_2 的曲率半径为直径, 作圆 σ_1 与

R_1 两腔镜内切于腔镜与光轴的交点, 作圆 σ_2 与 R_2 内切于腔镜与光轴的交点。两圆相交即为稳定腔, 相切为介稳腔, 相离或内含则为非稳腔, 图 1 所示为稳定腔情况。在这种情况下, σ_1 与 σ_2 相交于点 F 和 F' , 这两点称为侧焦点。 F 和 F' 的连线长度称为侧焦距。可以证明, 侧焦距等于腔内基模高斯光束的共焦参量 b_0 , 束腰位于 F 和 F' 所在平面上。设腔轴上任一点 P 到束腰位置的距离为 z , 过 F 和 P 作与腔轴相切于 P 点的圆, 称为 π 圆, 根据波传播理论推出的 P 点处的基模光斑尺寸 ω_p 和由图中的几何关系得到的 b' 两者之间的关系可以由下式确定:

$$\omega_p = \sqrt{b'\lambda/\pi}, \quad (1)$$

式中 b' 为 π 圆直径。

因此, 通过传播圆理论可以很好的分析两镜腔激光的输出特性。

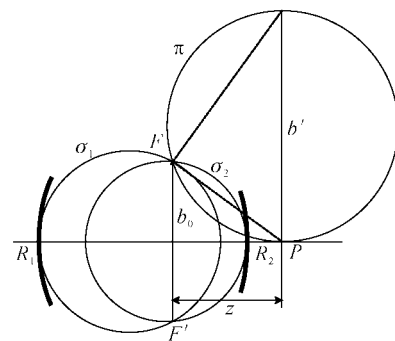


Fig. 1 Illustration of transition circles

2.2 平直腔固体激光器的动力学分析

激光晶体在被抽运光加热时, 其热聚焦效应可等效为一薄透镜^[5]。平直腔的 σ_1 与 σ_2 圆的半径为

* 通信联系人。E-mail: lufuyun@cyou.com

收稿日期: 2002-05-13; 收到修改稿日期: 2002-06-24

无穷大,退化出一条直线,两者相交在无穷远,处在介稳状态,腔镜间稍有失调就不会产生激光。正是由于存在热透镜效应,相当于在腔内插入一薄透镜 F_1 ,只要腔镜 M_1 的 σ_1 圆经过透镜所成的像 σ'_1 与 σ_2 相交,即为稳定腔,如图 2 所示。当抽运功率逐渐增加时, σ'_1 的位置随热透镜焦距的不断变小而逐渐靠近热透镜,当 σ'_1 从无穷远移到 σ''_1 位置时,第一次与 M_2 相切,激光器开始进入稳定区,当 σ'_1 移到 σ'''_1 位置时,第二次与 M_2 相切,激光器进入非稳区。整个激光器的稳定工作范围是 σ'_1 圆从 σ''_1 变化到 σ'''_1 的这段区间。

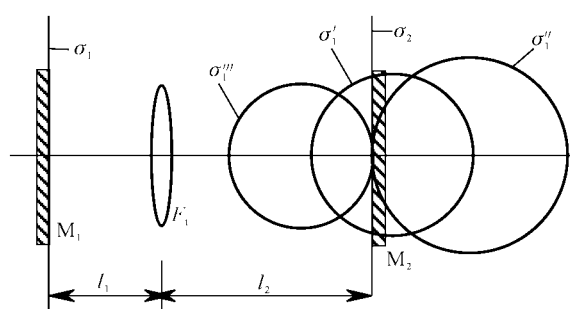


Fig. 2 Schematic map of flat-flat cavity

2.3 非对称平直腔固体激光器的动力学分析

当晶体的一个端面镀有抽运光增透和激光高反双色膜或紧贴腔镜时,腔结构等效为图 3。这时可以认为 $l_2 \approx 0$,因为退化成为直线的圆 σ_2 与光轴的交点,一个在无穷远另一个在热透镜处。无穷远点通过透镜成像在其焦点处,所以所成的像 σ'_2 与光轴的交点 A 和 B 分别在热透镜的焦点和热透镜处。点 A 和腔镜 M_2 之间的距离就是热焦距 f_1 的长度。腔长越短,激光器的稳定区越宽,越有利于激光的稳定输出。

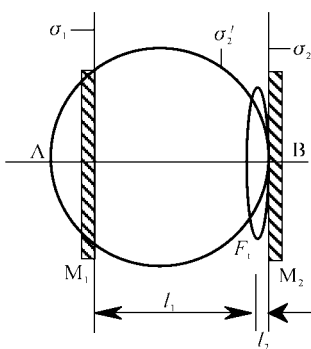


Fig. 3 Schematic map of asymmetry flat-flat cavity

利用非对称平直腔 A 点就是晶体的热焦点的这个特性,可以很方便的测量晶体的热焦距长度。把待测晶体放入非对称平直腔中,在确定的腔长下,

使激光器稳定输出。逐渐提高抽运功率,使 A 点越来越靠近腔镜 M_1 。当抽运功率到达某一数值时, σ'_2 与 M_1 相切,激光器不再输出激光,这时可以认为在此抽运功率下晶体的热焦距长度为设定的腔长。通过在不同的腔长下进行测量,可以得到晶体抽运功率和热焦距长度的关系曲线。

晶体处的基模光斑半径 w_1 与热焦距长度 f_1 的关系可由下式表示^[6]:

$$w_1 = \left\{ \frac{2\lambda}{\pi} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{1}{u_1^2} + \frac{1}{u_2^2} \right) - \left(\frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_{00}} \right)^2 - \frac{1}{16} \left(\frac{1}{u_2^2} - \frac{1}{u_1^2} \right)^2 \left(\frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_{00}} \right)^2 \right]^{-1/2} \right\}^{1/2}, \quad (2)$$

式中

$$u_1 = \frac{l_1(l_1 - R_1)}{R_1}, \quad u_2 = \frac{l_2(l_2 - R_2)}{R_2}, \quad (3)$$

R_1, R_2, l_1, l_2 分别为两腔镜的曲率半径和腔镜到热透镜 F_1 的距离。

$$\frac{1}{f_{00}} = \frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} + \frac{1}{2u_1} + \frac{1}{2u_2}, \quad (4)$$

将(2)式对 $1/f_1$ 求导,可得出最小光斑半径

$$w'_1 = \sqrt{2|u_1| \lambda / \pi}, \quad (5)$$

在 $l_1 \gg 0, l_2 \approx 0$ 情况下,(2)式可简化为

$$w_1 = \left[\frac{\lambda f_1}{\pi} \sqrt{\frac{l_1}{f_1 - l_1}} \right]^{1/2}, \quad (6)$$

在(2)式的分母等于零的情况下得到 $w_1 - f_1$ 关系曲线中的边界 $\begin{cases} f_a = 0 \\ f_b = l_1 \end{cases}$,激光器稳定工作区 f_1 的宽度等于 l_1 。

根据图 3 所示的几何关系,可得 M_1 镜处的基模光斑尺寸

$$w_1 = \left[\frac{\lambda}{\pi} \sqrt{(2f_1 - l_1)l_1} \right]^{1/2}, \quad (7)$$

一般情况下, M_1 作为输出镜,光波传播到 M_1 镜时波前变为平面。而高斯光束只有在束腰处的波前是平面,所以 w_1 的尺寸就是输出激光的束腰半径。再根据发散角和束腰半径的关系,可以得到输出激光的远场发散角。

3 实验结果及分析

实验中采用图 3 所示的结构,抽运源是 Coherent 公司的 FAP 系统,输出尾纤芯径为 $800 \mu\text{m}$,通过 1:1 的耦合系统从一端抽运激光晶体。要获得基模激光输出,根据经验公式,抽运光斑的面积最大不能超过最小激光光斑的 1.2 倍。考虑抽运

光斑半径 $400\ \mu\text{m}$, 激光的束腰半径就要大于 $188\ \mu\text{m}$, 再根据(5)式, 选择 $52\ \text{mm}$ 的腔长。选用的激光介质为 $3\ \text{mm} \times 3\ \text{mm} \times 8\ \text{mm}$ 的 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$, 掺杂原子数分数为 0.005 。靠近抽运源的一面镀 $808\ \text{nm}$ 增透和 $1.06\ \mu\text{m}$ 高反膜, 用作全反镜, 另一面镀 $1.064\ \mu\text{m}$ 增透膜。输出耦合镜对 $1.064\ \mu\text{m}$ 的透过率 $T=25\%$, 抽运光的中心波长为 $807.2\ \text{nm}$, 功率在 $1\sim 30\ \text{W}$ 之间。实验中把 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 放在铜夹具中, 为了保持较好的热接触, 晶体用铝箔包裹。通过电路对晶体施行有效的温控, 在抽运功率 $1\sim 23\ \text{W}$ 间, 温度维持在 $18.5\pm 0.2\ ^\circ\text{C}$ 。

实验测得了不同腔长下激光的输出功率, 按照前面推导出的方法得到了晶体热透镜焦距随抽运功率的变化曲线, 如图 4 所示。在腔长 $52\ \text{mm}$ 、抽运功率 $23\ \text{W}$ 时, 获得了稳定的 $10\ \text{W}$ 单模激光输出。用中国科学院物理研究所制造的 LS2000 型激光光束质量分析仪测量了输出激光的能量分布, 如图 5 所示。

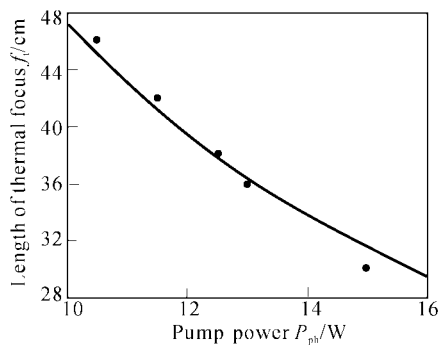


Fig. 4 The length of thermal focus under different pumped power

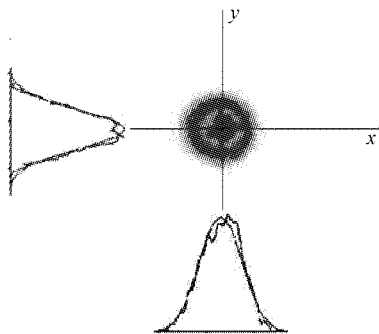


Fig. 5 The mode of output laser

图 4 中实线是根据

$$f_t = \frac{\pi K_c \omega_p^2}{P_{th} (dn/dT)} \left[\frac{1}{1 - \exp(-\alpha l)} \right], \quad (8)$$

作出的理论曲线^[5], 其中 K_c 为热传导系数, ω_p 为抽运光光斑半径, P_{th} 为引起热效应的抽运功率, dn/dT 为热光系数, α 为吸收系数。图中点为实测值。由图可以看出, 实验和理论吻合的比较。图 5 给出了输出激光的光斑、 x 和 y 方向光强的分布和高斯拟合曲线, 从图中可以看出, 激光光强分布与高斯曲线拟合的比较, 经计算, 激光的 $M^2 = 1.42$, 为准基模输出。

结论 本文利用传播圆图解方法, 分析了非对称平直腔固体激光器的热透镜效应对动力稳定区的宽度、基模光斑尺寸和发散角的影响, 给出了测量晶体热焦距的一个简单方法。在理论的指导下给出了非对称平直腔的最佳设计参量, 并测量了激光二极管端面抽运的 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 固体激光器的热焦距和光斑模式。在抽运功率 $23\ \text{W}$ 时获得了稳定的 $10\ \text{W}$ 单模连续输出。

参 考 文 献

- Blows J L, Omatsu T, Dawes J *et al.*. Heat generation in $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ with and without laser action. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(12):1727~1729
- Xia Wenjian, Li Zhengjia, Qiu Junlin. Optical characteristics and dynamic stability of gaussian resonators with thermal lensing. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1995, **15**(10):1281~1287 (in Chinese)
- Liu Junhai, Lu Junhua, Lu Jianren *et al.*. Mode matching in high-power laser-diode-array end-pumped $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ solid-state laser. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(2):186~189 (in Chinese)
- Zhang Guangyin, Zhang Baozheng. Two kinds of solid laser thermal stable resonator. *Chin. J. Laser* (中国激光), 1992, **19**(5):321~326
- Innocenzi M E, Yura H T, Fincher C L *et al.*. Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid-laser. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(19):1831~1833
- Zhang Guangyin. Dynamic analysis of solid-state laser resonators. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 1991, **40**(7):1065~1073 (in Chinese)

Dynamic Analysis of Solid-State Laser with Asymmetry Flat-Flat Cavity

Xu Zhiguang Lü Fuyun Wang Hongjie Zhang Guangyin

(*Institute of Physics, Nankai University, Tianjin 300071*)

(Received 13 May 2002; revised 24 June 2002)

Abstract: The influence of thermal lens on the width of dynamic stabilization, angle of divergence and output mode of solid-state laser with asymmetry flat-flat cavity was analyzed by using transition circles theory. Compared with the *ABCD* matrix method which need a large number of computations, this method was relatively simple and the result was easily understood. Moreover a simple method to measure the length of thermal focus is given developed from this theory. By properly designing the parameters of resonant cavity, steady 10 W quasi-TM₀₀ mode CW output was achieved when the pumped power was 21 W. The mode and length of thermal focus of laser were measured. The experimental result was in accordance with theory.

Key words: laser physics; dynamic stabilization; transition circles; thermal lens; flat-flat cavity