

文章编号: 0258-7025(2001)08-0721-04

一种间接测量全固化激光器热焦距的方法*

郭蕊香 李凤琴 谢常德 彭堃堃

(山西大学光电研究所, 山西大学量子光学教育部重点实验室 太原 030006)

摘要 以激光器中高斯光束的传播矩阵方程为基础, 结合远场发散角的测定, 设计和实现了一种间接测量激光晶体热焦距的方法, 最高测量精度达 $\pm 10\%$ 。该方法简便、易行, 实用性强, 精度高, 特别适用于激光二极管(LD)端面抽运激光器晶体热焦距的测量。

关键词 热焦距, 高斯光束, 光束发散角

中图分类号 TN 248; TN 247 **文献标识码** A

Method for Indirect Measuring Thermal Focal Length of Laser Crystal

GUO Rui-xiang LI Feng-qin XIE Chang-de PENG Kun-chi

(Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Key Laboratory for Quantum Optics,
Ministry of Education, Taiyuan 030006)

Abstract Based on the transmission matrix equations of Gaussian beams and the divergent angle measurement of beam at far field, a method for indirectly measuring the thermal focal length of laser crystal is presented. The measurement precision of thermal lens up to 10% was achieved. The achieved measurement method is flexible, simple and convenient with higher precision, especially suits to LD-pumped all-solid-state lasers.

Key words thermal focal length, Gaussian beams, divergent angle

1 引言

激光器在运转时, 激光介质因吸收抽运光而发热, 同时又因外部冷却使热扩散, 从而在介质内形成一定的温度梯度, 产生热透镜效应^[1]。热透镜的存在可能导致冷腔状态下处于稳区的谐振腔失稳, 因而在激光器设计中, 必须考虑热透镜的影响。实践证明它作为腔设计中唯一一个不确定因素, 对腔内模式分布影响很大。因此, 测定不同运转条件下激光介质的热焦距是设计好激光谐振腔的前提。近年来, 随着大功率激光二极管(LD)的出现进而商品化, 采用激光二极管作为抽运源的全固化激光器已成为激光技术领域的发展趋势, 而在端面抽运的全固化激光器系统中, 由于抽运光通常被聚焦得非常小, 约几百微米左右, 局域热效应大大高于灯抽运系统, 因而 LD 抽运激光增益介质热效应有着与灯抽

运激光器不同的特性, 有必要进行深入的理论与实验研究^[2,3]。

通常在测定灯抽运固体激光器系统的热焦距时, 采用扩束的平行 He-Ne 激光束入射于抽运状态下的激光介质, 然后测 He-Ne 激光的聚焦位置以获得热焦距。我们在长期研究全固化激光器的过程中^[4,5], 发现利用平行光法测定 LD 端面抽运的激光器热焦距时, He-Ne 激光只在中心几百微米左右有聚焦作用, 从而肉眼难于找到焦斑位置, 误差很大。因此设计一种简便、易行, 实用性强, 精度高的热焦距测量方法应用于 LD 抽运激光系统, 是全固化激光器设计的迫切要求。本文报道了一种测量 LD 端面抽运激光器热焦距的可行方案: 通过孔径光阑法测量激光输出光场的光斑参数, 再利用高斯光束的传输方程和谐振腔的传输矩阵数值拟合求出热焦距。由于该系统是通过辐射激光的光斑参数推算出晶体热焦距, 因而原则上可以应用于任何腔形的激光器并在激光器运转状态下实行实时测量, 方法简便易行, 无需复杂的仪器, 而且精度较高, 实用性非常强。

* 国家自然科学基金(69837010)和山西省青年科学基金资助项目。

收稿日期: 2000-12-05; 收到修改稿日期: 2001-03-23

2 测量方案

首先通过理论计算激光腔中高斯光束的 ABCD 传输矩阵, 计算其某一测量方向上光束发散角随热焦距的变化曲线, 然后用实际测得的光束发散角拟合理论曲线, 求出对应的热焦距。

2.1 孔径光阑法测高斯光束远场发散角

高斯光束光斑大小定义为场振幅减小到中心值 $1/e$ 处的光斑半径, 因而高斯光束光斑内的能量为总能量的 $(1 - 1/e^2) = 86\%$ 。因此可以采用孔径光阑测量高斯光束的腰斑大小。首先选定与高斯光束腰斑的距离为 L 的远场作为测量点, 在光阑完全放大的状态下用功率计测得总辐射能量值, 缩小光阑孔径, 并仔细调整光阑位置, 使光束从光阑中心通过, 调整光阑大小, 使功率计测得的辐射能量为总辐射能量的 86%, 此时的光阑孔径即为该位置处的光斑直径 $2R$, 由此计算高斯光束的远场发散角 $\theta = 2R/L$ 。

2.2 理论计算激光腔中高斯光束的远场发散角随热焦距的变化曲线

对于任何腔形的激光器, 都可以通过求解腔的传输矩阵计算其某一位置处的光斑大小及其远场发散角^[1]。分别测定了同样抽运条件下包含 Nd:YAP 晶体的环形八字和平平驻波谐振腔辐射激光的远场发散角, 并对其热焦距进行了数值拟合。

图 1 为实验采用的两种激光振荡腔形(将激光

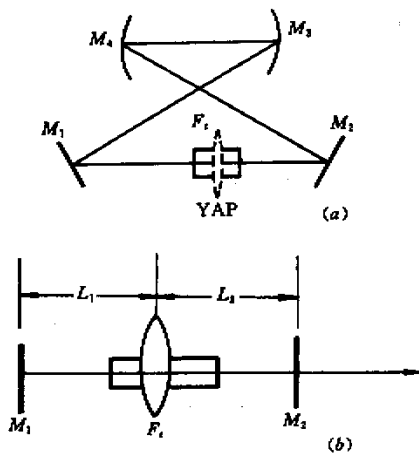


图 1 两种激光振荡腔结构
(a) 环形腔; (b) 平平腔

Fig. 1 Two different kinds of resonators
(a) ring resonator; (b) plane-parallel resonator

棒视为一热透镜)。环形腔中 M_1, M_2 为平镜, M_3, M_4 为凹面镜, 曲率半径均为 $f = 50$ mm, 两凹面镜间距离为 $l_1 = 57$ mm, 镜 M_3 与激光晶体的距离为 $l_2 = 104$ mm, 镜 M_4 与激光晶体的距离为 $l_3 = 65$ mm, F_1 为热焦距, 环形腔的传输矩阵方程为^[1]

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/F_1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix}$$

考虑到高斯光束腰斑 w_0 与发散角 θ 的关系: $\theta = \lambda/\pi w_0$ (λ 为激光波长), 以镜 M_3 为输出耦合镜, 激光发散角随热焦距 F_1 变化的方程为^[1]

$$\theta = 2\lambda/\pi \sqrt{\frac{\lambda \sqrt{\text{Abs}[4 - (a+d)^2]}}{\text{Abs}(2\pi c)}} \quad (1)$$

平平腔的传输矩阵方程为

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/F_1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2L_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/F_1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

以镜 M_2 为输出耦合镜, 激光发散角随热焦距 F_1 变化的方程为

$$\theta = 2\lambda/\pi \sqrt{\frac{\lambda B}{\pi \{1 - [(D+A)/2]^2\}^{1/4}}} \quad (2)$$

通过测量拟合出的热焦距的精度由测量的误差即系统误差决定, 而系统误差以远场光斑的测量误差为主, 我们通过多次测量确定远场光斑的平均直径 $2R$ 及其均方根误差 $\Delta 2R$, 则测得的热焦距的精度为

$$\kappa = \Delta F_1 / \bar{F}_1 = \frac{\Delta D}{Ld \frac{d\theta}{dF_1} \bigg|_{\bar{F}_1}} \quad (3)$$

\bar{F}_1 为多次测量的平均值, L 为测量位置与腰斑的距离。

图 2 为解传输矩阵方程获得的测量方向上热焦距 F_1 随光束发散角 θ 的变化曲线。图中实线为平平腔的拟合曲线, 点线为环形腔的拟合曲线, 曲线上的圆点为实测的光束发散角 θ , 水平短线表示 θ 的测量误差, 垂直短线为热焦距 F_1 的估算误差。

3 实验装置

实验采用美国 Coherence Comporation 公司 Model S-81-2700c-200-h 型激光二极管作为抽运源, 在室温(25℃)下, 输出中心波长为 806 nm 的线偏

振激光, 最大输出功率 2.5 W, 通过温度调谐, 在 14℃ 下将 LD 的中心波长调谐到晶体的吸收峰 802 nm, 经光束整形聚焦后, 腔前最大功率为 2.2 W, 聚焦点光斑大小约为 $60 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$, 光束发散角约 60 mrad。将抽运光注入激光晶体, 96% 的抽运光被晶体吸收。用上述两种腔形, 在辐射激光的远场与腰斑距离为 L 的点处测量输出激光的光斑直径 $2R$ 。测量光斑的装置由孔径可调光阑、装有螺旋测微器的二维平移挡板、聚焦透镜和精密微功率探测器构成(如图 3)。可调孔径光阑被固定在可水平、垂直二维平移的平移架上, 装有螺旋测微器的二维平移挡板放置在靠近光阑处。

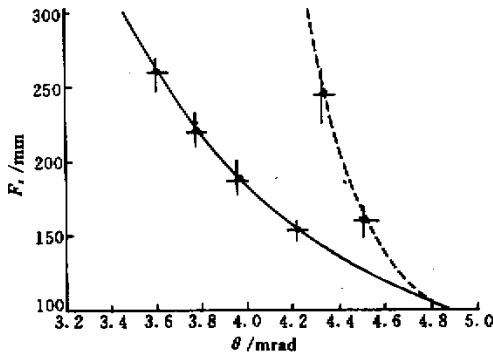


图 2 测量方向上热焦距 F_f 随光束发散角 θ 的变化曲线

Fig. 2 Focal length F_f versus divergence angle θ in detected direction
—; ring resonator; ----; plane-parallel resonator

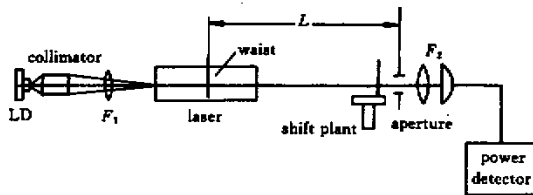


图 3 实验装置图

Fig. 3 Scheme of experimental setup

采用光阑测量高斯光束的大小时, 首先在光阑完全放大的状态下用微功率计测得总辐射能量值, 逐渐缩小光阑孔径, 并仔细调整光阑位置, 通过观察微功率计测得的辐射能量, 在同样光阑孔径下找到最大辐射能量的光阑位置, 这时光束中心与光阑中心重合。调整光阑大小, 使微功率计测得的辐射能

量为总辐射能量的 86%, 调节光阑前的挡光板, 以功率计上能量未降低时的临界点作为初始点, 功率计上能量降低为零时的临界点作为终点, 计算螺旋测微器的移动量即为该点的光斑直径 $2R$ 。分别测定光束水平方向和垂直方向的光斑直径并取平均, 则激光腔输出的高斯光束的发散角为 $\theta = 2R/L$, 与图 2 曲线拟合, 即可获得该抽运条件下激光晶体的热焦距。

4 实验结果与讨论

用上述方法, 分别采用两种腔形测定了在不同抽运功率下辐射激光的发散角 θ , 用多次测量的结果取其平均由公式(1), (2)推算了 YAP 激光晶体的热焦距。图 4 为不同抽运功率下测得的热焦距, 方形点为平平腔测得的结果, 十字形点为环形腔测得的结果。

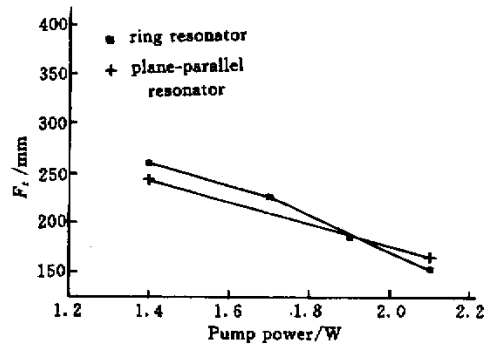


图 4 不同抽运功率下测得的热焦距 F_f

Fig. 4 Focal length F_f versus pump power

用多次测量结果的均方根差作为系统误差如图 2 所示, 由公式(3)推算了两种腔形的测量精度。平平腔为 $\pm 10\%$, 远高于通常用平行光法的测量精度 ($\pm 30\%$) 和目前采用的环形腔的测量精度 ($\pm 30\%$)。由以上测量结果看, 平平腔测量精度大大高于环形腔, 这主要是由于设计的环形腔工作在热不灵敏区, θ 相对于热焦距变化不灵敏, 从而使较小的 θ 测量误差导致大的热焦距推算误差。因此, 尽管原则上此方法适用于任何腔形的激光器中激光晶体热焦距的测量, 但对热效应依赖性较强的激光器精度较高。采用同样的抽运系统及不同的腔结构测得了在误差范围内基本相同的结果, 证明了该方法的可行性。我们将该方法测量的热焦距用于环形单频倍频激光器设计, 得到了很好的结果, 所设计的激光

器能高效率稳定运转^[4,5]。所建议的方法设计巧妙,操作简单,精度较高,是一种简便易行的实时测量方案,尤其适用于端面抽运的全固化激光器激光介质热焦距的测量。但需要说明的是由于该方案是以基模高斯光束的传播方程为出发点,以孔径光阑法测量高斯光束的远场发散角去拟合热焦距,因而它只适用于工作在基模状态下,光束质量较好的激光器中激光晶体热焦距的测量。

参 考 文 献

- 1 Lü Baida. Laser Optics. Chengdu: Sichuan University Book Concern, 1992. 276~291, 361~363 (in Chinese)
- 2 M. E. Innocenzi, H. T. Yura, C. L. Fincher *et al.*. Thermal modeling of continuous wave end pumped solid state lasers. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, 56(19):1831~1833
- 3 J. Frauchiger, Peter Albers, Heinz. P. Weber. Modeling of thermal lensing and higher order ring mode oscillation in end-pumped CW Nd:YAG lasers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, 28(4):1046~1056
- 4 Zhuang Kuanshou, Zhang Yun, Xie Changde *et al.*. All-solid-state out-of-plane Nd:YAG ring laser of single-frequency operation. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1996, 16(8):1041~1044 (in Chinese)
- 5 Guo Ruixiang, Ma Hongliang, Zhang Yun *et al.*. Experimental investigation of mini-all-solid-state system of non-classical light generation. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, 21(7):812~814 (in Chinese)