

固体激光器热透镜焦距的自适应补偿

高 颖 黄维玲 刘耀兰

(华中理工大学激光研究院 武汉 430074)

提要 针对光泵浦固体激光器的热透镜效应, 设计了热透镜焦距的自适应补偿系统, 使光泵浦固体激光器在热透镜焦距宽域变化情况下, 保持激光输出光斑大小稳定。

关键词 固体激光器, 自适应补偿, 望远镜腔, 热透镜焦距, M^2 参数

对于光泵浦的固体激光器, 其热透镜焦距随着泵浦功率的变化有较大的波动。为了保证激光器在激光棒热焦距变化情况下获得稳定的输出, 普遍采用了动态热稳腔的方法, 但这种热稳腔也只能在一定的功率范围内有效。为了使激光器获得更好的动态稳定性, 采用自适应的方法补偿热透镜效应是一种很有意义的工作。本文利用一种特殊望远镜腔的热聚焦-轴移补偿特性与宽域热稳性^[1], 对望远镜离焦量进行相应调节, 构成了热透镜焦距的闭环自适应控制系统, 使激光器运行在输出光斑稳定的状态。

1 特殊望远镜腔的特性

如图 1 所示, 束腰半径为 w_0 的高斯光束通过透镜 F (焦距为 f) 后在其焦点处的光斑半径 w_0' 满足

$$w_0'w_0 = \lambda/\pi \cdot f \quad (1)$$

即不论物方高斯光束的束腰离透镜多远, 像方高斯光束在透镜前方焦点处的光束半径与 L 无关。

对如图 2 所示的平行平面望远镜谐振腔, 利用参考文献[1]中特殊望远镜腔的热聚焦-轴移补偿特性理论, 即由透镜 f_1 和热透镜 f' 组成透镜组, 因其距离为透镜 f_1 的焦距, 可得组合焦距 f_s 为 f_1 , 第二主平面 H_2 位于热透镜 f' 的左方, 距离为 f_1 , 都与热透镜焦距 f' 无关, f' 值

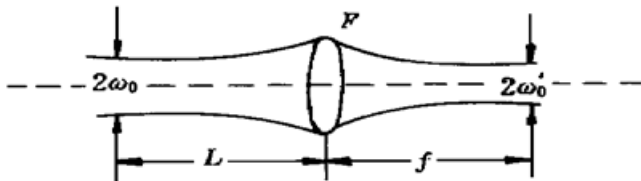


图 1 高斯光束通过薄透镜的传输特性

Fig. 1 Transmission of a Gaussian beam after a lens

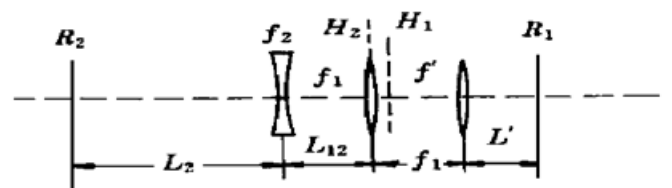


图 2 望远镜谐振腔

Fig. 2 Telescopic resonator

的改变不引起 f_1 与 H_2 位置的变化。第一主平面 H_1 位于透镜 f_1 的右方,与 f_1 的距离为 f_1^2/f' 。因此当高斯光束通过这一透镜组变换时,不论热透镜焦距 f' 如何变化,只要将物方高斯光束沿光轴右移 f_1^2/f' ,即只要按式(2)求出 L_{12} ,并据此轴向移动平面镜 R_2 与透镜 f_2 ,在平面输出镜 R_1 和棒输入端均可获得保持不变的高斯光束

$$L_{12} = f_1 + f_2 + d_2/2 + l - f_1^2/f' \quad (2)$$

其中

$$l = \frac{d_1 - \sqrt{d_1^2 - d_2^2}}{2}, \quad d_1 = \frac{f_1^2}{L'}, \quad d_2 = \frac{f_2^2}{L_2 - f_2}$$

对多模运行的激光器,由 M^2 参数,式(1)变为

$$w_0'w_0 = \lambda/\pi \cdot M^2f$$

即像方光束在透镜前方焦点处的光束参数仅与 M^2 参数有关,与 L 无关,因此只需测出 M^2 参数,亦可利用其轴移不变性的特性,对激光腔参数进行实时调节,实现自适应补偿固体激光器的热透镜效应。

2 热透镜焦距及 M^2 参数的测量

实现热透镜焦距的自适应补偿,首先必须测量出热透镜焦距,为了简化系统,采取了经验公式与实际测量相结合的手段。在连续工作的固体激光器中,由于激光棒热透镜焦距的波动主要是由输入功率的波动造成的,因此激光棒的热透镜焦距与输入功率有一定的对应关系。在不少研究工作中,都采用了经验公式的方法来求激光棒的热透镜焦距。

首先测量了激光棒在不同输入功率 P_m 下的热焦距 f' ,得出 $P_m f'$ 变化曲线的经验公式,然后在实际控制中,测量出激光棒的实际输入功率 P_m ,利用所求出的经验公式计算出相应的 f' ,则激光腔的腔参数确定,可以据此计算出基模远场光斑的理论值 w_{01} ,然后测量远场光斑的实际值 w_{01}' ,即可推出 M^2 参数的近似值

$$M^2 = [w_{01}'/w_{01}]^2$$

w_{01}' 由一台转针式光束模式仪实时测量,输出光束由与输出镜 R_1 距离为 f_3 的腔外透镜(焦距 f_3)聚焦后,束腰位置为

$$d = -f_3 \cdot [1 + f_3/R_1]$$

因为出射镜为平面镜, $R_1 = \infty$,可推出 $d = -f_3$,因此激光经过透镜 f_3 聚焦后的束腰固定于透镜 f_3 的焦点处。可以在此放置模式仪测量束腰半径 w_{01}' 。

同时,由于我们设计的谐振腔工作于深度热稳状态^[2],即等效 G 参数 $G_1 * G_2 = 0.5$,在基模时有 $\frac{dw_{out}}{df'} = 0$, f' 的波动对基模远场光斑的影响很小,则 f' 的波动对 M^2 的影响也很小,因此采用这种近似方法测得的 M^2 参数,可以满足实时控制对精度的需要。

3 自适应系统的设计

我们采用的自适应系统如图3所示。其中反射镜 R_2 为平面高反镜,出射镜 R_1 为平面镜。在腔参数的设计中,应尽量减小 f_1 ,因为

$$dL_{12}/df' = -f_1^2/f'^2$$

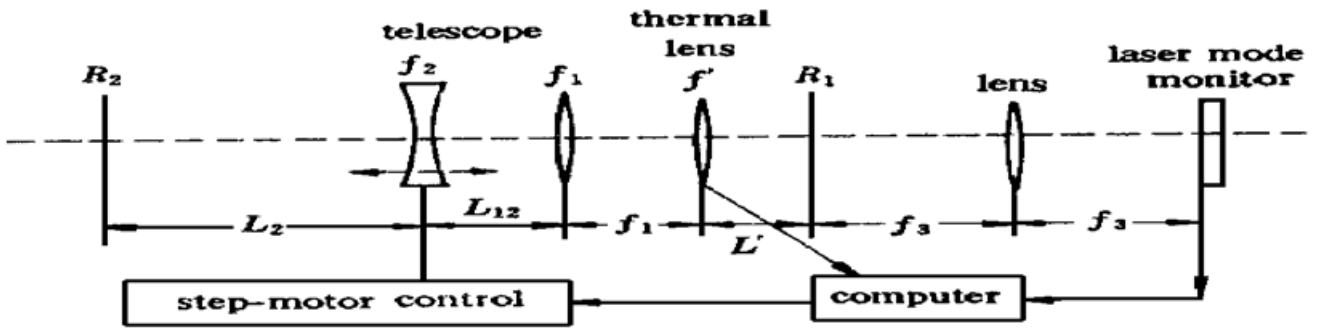


图 3 热透镜焦距的自适应补偿系统

Fig. 3 Adaptive compensation system of the thermal lens

L_{12} 随 f' 的变化只与 f_1 有关, f_1 越小, 轴向位移量越小。通过实测, 激光棒的热透镜焦距 $f' > 500$ mm, 取 $f_1 = 80$ mm, 由式 (2) 可以求出此时的 $(\Delta L_{12})_{\max} < 15$ mm。为了防止反射镜处光斑半径太小, 望远镜的放大率不能过大, 这里取放大率为 3, 则 $f_2 = -27$ mm。激光棒尽量靠近出射镜, 采用 $\phi 6$ mm \times 100 mm 的激光棒, 取 $L' = 100$ mm。由于激光棒为有限口径, 可通过激光的自孔径限模, 使激光器运行于基模。因此要求激光棒处光斑 w_{rod} 的最大值为^[1]

$$w_{rod} = \Phi/\pi$$

式中 Φ 为激光棒的有效孔径, w_{rod} 随 L_2 的增加而增加, 可以通过调节 L_2 来满足, 这里取 $L_2 = 568$ mm, 此时 $w_{rod} = 1.9$, 满足基模运行的要求。

理论上, 特殊望远镜腔的轴移不变性要求同时移动 R_2 和 f_2 , 在实际控制中, 这将带来很大的误差, 因此对其进行简化, 只移动透镜 f_2 。表 1 列出了当同时移动 R_2 和 f_2 及只移动 f_2 时的激光棒及输出镜处光束参数。其中 w_1 为同时移动 R_2 及 f_2 时激光器输出镜处束腰半径; w_1' , w_2' , $G_1^* G_2$ 为只移动 f_2 时的腔参数, 其中 w_1' 为输出镜处束腰半径, w_2' 为全反镜处束腰半径, G_1, G_2 为 G 参数等价腔之 G 参数。从表中可以看出, 只移动 f_2 时, 输出光束参数几乎不变, 完全能够满足实际的精度需要。

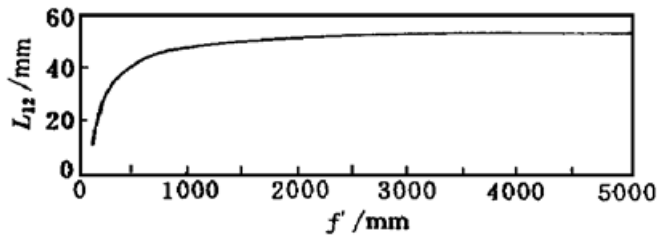
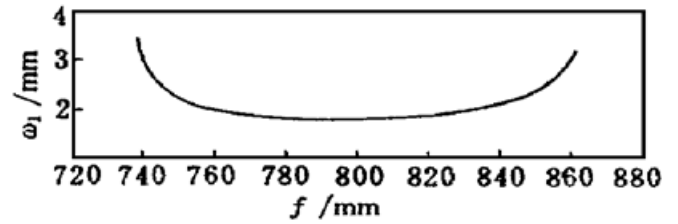
表 1 激光束输出参数随透镜移动的变化

Table 1 The output beam parameter change with the moving of lens

f'/mm	500	550	600	650	700	800	900	1000	1500	2000
L_{12}/mm	41.14	42.30	43.27	44.09	44.78	45.93	46.82	47.53	49.66	50.73
w_1/mm	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90
w_1'/mm	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89
w_2'/mm	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
$G_1^* G_2$	0.49	0.49	0.49	0.49	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50

从图 4 可以看出, 当热透镜焦距较短时, 其波动需要较大的位移量来补偿, 而当 $f' > 2000$ mm 时, 热透镜焦距的波动对 L_{12} 的影响很小, 因此, 选取热性能好的激光棒, 能大大提高激光器的输出光束质量。热透镜效应的可补偿范围理论上可从 120 mm 到 $+\infty$ 及 $-\infty$ 到 0, 但由于轴向位移的限制, 系统的可补偿范围只限定在 400~ 2000 mm, 适当地改变 f_1 , 可使可补偿范围随不同的要求而得到满足。

图 5 为取 $f' = 800$ mm 时的 $f'-w_1$ 关系图, 可看出, 在 $f' = 800 \pm 20$ mm 内, f' 对 w_1 的影响很小。因此此时求出的远场光斑与实际远场光斑的误差也较小。

图 4 L_{12} 随热透镜焦距 f' 的变化Fig. 4 The L_{12} changes with the thermal lens f' 图 5 激光输出光斑随热透镜焦距 f' 的变化Fig. 5 Output radius changes with the thermal lens f'

在系统的实际工作中,首先实时测量激光棒的输入功率 P_{in} 及远场束腰半径 w_0' ,输入计算机,计算出轴向位移量 ΔL_{12} ,然后控制步进电机使透镜 f_2 作出相应的位移,即可获得稳定的输出光斑。

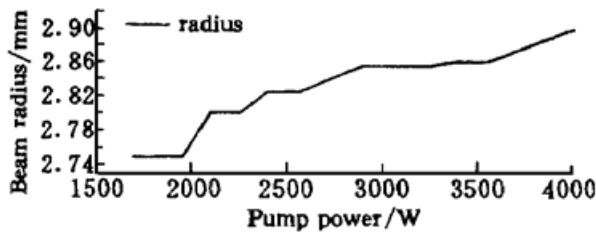


图 6 激光输出光斑随泵浦功率的变化

Fig. 6 Output radius changes with the pump power

根据上述设计方法,测出了输入功率从 1678~4000 W 变化时的输出镜处光斑 w_0 ,如图 6 所示。可以看出,光斑最大为 2.9 mm,最小为 2.75 mm,对应的 M^2 参数分别为 2.33 和 2.095。

我们设计的固体激光器热透镜焦距自适应补偿系统,是灯泵浦方式下的一种补偿新方法,在热效应存在大的波动时实现了激光器稳光斑输出,为困扰灯泵浦时激光棒热效应对光束质量的影响提供了一种新的解决途径。

参 考 文 献

- 1 Zhang Guangyin. The thermofocusing-axial shift compensation character and the thermo-stability in wide regime of the special telescopic resonator. *J. Infrared and Millimeter Waves* (红外与毫米波学报), 1991, 10(4): 285~ 292 (in Chinese)
- 2 Lü Baida. Telescopic resonators for dynamic stable TEM₀₀ mode operation. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1987, 7(2): 105~ 111 (in Chinese)

Adaptive Compensation of the Thermal Lens in Solid State Lasers

Gao Ying Huang Weiling Liu Yaolan

(Laser Institute, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract Using the transmission characteristic of the Gaussian beam after a lens and the thermal stability in a broad range of the special telescopic resonator, an adaptive compensatory system for thermal lens focus is designed to weaken the effect of the thermal lens in light pumped solid lasers. Thus, a stable output radius can be achieved while the thermal lens focus varies in a broad range.

Key words solid state laser, adaptive compensation, telescopic resonator, thermal lens, M_2 parameter