

棒状钕玻璃热容激光器热透镜自平衡补偿方法分析

吴武明 郭少锋 习锋杰 许晓军

(国防科技大学光电与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 针对热容激光器的热透镜效应,给出了棒状钕玻璃热容激光器的热透镜公式表达式。理论上分析了热透镜焦距自平衡补偿方法的基本原理。在考虑了棒状钕玻璃热容激光器的具体特性的基础上,设计了一种简单的热透镜焦距自平衡补偿方法,使光抽运钕玻璃热容激光器在热透镜焦距变化情况下,可以使激光输出光斑大小稳定。为了解棒状热容激光器热透镜焦距的影响,利用自研的光栅型曲率传感器测量了热容激光器总的热透镜等效焦距的大小,结果表明热传导在抽运光发射完 20 s 左右后才建立热平衡产生了明显的热透镜效应;随着抽运脉冲个数的增加,热透镜效应随之变大。

关键词 激光技术; 棒状玻璃; 热容激光器; 热透镜焦距; 自平衡补偿方法

中图分类号 TN256 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS200828s1.0107

Analysis of Self-Adjusting Compensation of Thermal Lens in Rod-Glasses Heat-Capacity Laser

Wu Wuming Guo Shaofeng Xi Fengjie Xu Xiaojun

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Under the study on rod Nd-glasses heat-capacity laser thermal lensing, the general expressions of the thermal focus length are derived. The self-adjusting compensation is presented in theory. Using the characteristic of Nd-glasses, self-adjusting compensation system for thermal lens focus is designed to weaken the effect of the thermal lens on light pumping glasses heat-capacity lasers. Thus, a stable output spot radius can be achieved while the thermal lens focus varies in a broad range. In order to study the effect of heat-capacity laser thermal lensing, a wavefront curvature sensor comprising a phase defocus grating is used to measure the focus length. The result indicates that the heat exchange sets up a heat balance in about 20 s after pumping. With the increases of the numbers of pumping pulses, the thermal focus length deceases.

Key words laser technology; rod-glasses; heat-capacity laser; focal length of thermal lens; self-adjusting compensation

1 引言

固体热容激光器因其特殊的工作方式(热容模式)及高能量输出和良好的光束质量,而受到业内人士的普遍关注。热容模式下在激光器工作过程中,不进行冷却,而将废热存储在介质中,激光介质的表面应力为压应力,介质的破坏阈值大大提高^[1~3]。

在实际中,用棒状钕玻璃作为热容激光器的介质是常见的。热效应导致的温度分布不均匀,是钕玻璃产生热应力、热透镜效应的根源。这些效应使激光输出光束质量变差,功率降低。一般利用可移动的光学

元件^[4],来提供不同抽运功率的一级动态补偿。但是这种方法调整难度较大,且不容易实现。本文提出一种简单的自平衡补偿方法,可以在很大功率范围内,动态消除由于温度不均匀导致的热透镜效应,使热容激光器运行在输出光斑较稳定的状态。

2 基本理论

所谓自平衡补偿方法,就是在谐振腔内加入一种材料,这种材料形成的透镜效应与激光介质形成的热透镜透镜相互抵消^[5]。磷酸盐玻璃具有远大于

基金项目: 国家 973 计划(2001CB309307)资助课题。

作者简介: 吴武明(1981—),男,硕士,助理研究员,主要从事固体激光器和自适应光学等方面的研究。

E-mail: treewwm@126.com

硅酸盐激光玻璃的受激发射截面,且有较小的非线性折射率,一般被选用作激光介质。磷酸盐玻璃的折射率温度系数有正的和负的,所以在实际中,可以选用一根是正折射率温度系数磷酸盐玻璃,另一根是负折射率温度系数磷酸盐玻璃放置在谐振腔内一起作为激光介质,这样两根材料形成的透镜效应相

互抵消。

对于棒状热容激光器,一般是以重复脉冲运转。其热透镜效应是由温度不均匀的变化和热应力、端面效应引起的。棒状介质温度不均匀引起的热透镜占大部分,其焦距可表达为^[6]

$$f(t) = \frac{-c\gamma(1+g/2)\pi r_0^4}{2Q} \left\{ \frac{dn}{dT} \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{\beta_n^2 t}{\tau}\right) \beta_n^2 \left[(1+g)\beta_n J_1(\beta_n) - 2gJ_2(\beta_n) \right] \left[\frac{1 - \exp(-M\beta_n^2 t_p/\tau)}{1 - \exp(-\beta_n^2 t_p/\tau)} \right] \right\}^{-1}, \quad (1)$$

式中 β_n 是 $\beta_n J_1(\beta_n) = A J_0(\beta_n)$ 本征函数方程的根,这里 J_0 和 J_1 分别为贝塞尔零阶函数和一阶函数。 dn/dT 为折射率温度系数; $\tau = r_0^2/k$ 为棒的热时间常量;扩散系数 $k = K/(c\gamma)$, 式中 K 为热传导系数, γ 为激光棒质量密度, c 为比热。假定激光晶体热传导是各向均匀的,并且其热性能与晶体温度无关。 $A = r_0 h/K$ 是一个无量纲参量,表示棒的冷却条件, h 为棒表面传热系数;热容模式下,由于不主动冷却, A 的值很小。 g 表示测得的抽运不均匀性, Q 为介质所吸收的并转化为废热的那部分能量, r_0 为棒的半径。 M 为脉冲个数; t_p 为脉冲宽度。

实验室现有的热容激光器重复频率为 10 Hz, 每个脉冲能量最大可超过 200 J, 脉冲宽度约为 0.5 ms。激光介质为中国科学院上海光学精密机械研究所研制的 N-31 型掺钕玻璃, 其相关性能如表 1 所示, 其折射率温度系数为负。所以可以把具有正的折射率温度系数的钕玻璃棒放置在谐振腔内作为另一根激光介质, 其长度和半径大小一样。

表 1 N-31 玻璃的相关性能参数

Table 1 Properties related parameters of Nd:phosphate

Temperature /K	300
Length /cm	2
Pumped length /cm	50
dn/dT /K ⁻¹	-4.3×10^{-6}
Thermal conductivity /[W/(cm·K)]	5.58×10^{-3}
Density /(g/cm^3)	2.83
Specific heat /[J/(g·K)]	0.75

一般来说,当抽运脉冲宽度小于 2 ms 时,这远小于钕玻璃的热时间常数 τ , 所以激光发射期间,可以忽略热的扩散。由(1)式的热透镜公式可知,在有几乎相同大小的抽运不均匀系数 g 及冷却系数 A 时,两个棒的热透镜(1)式中的无穷级数项可以认为相等。所以可以通过调节两根介质的抽运功率,即产生的废热 Q 不一样,由于两个棒的比热 c 和质量密度 γ

不一样,从而可以使两根介质形成的热透镜相互抵消。

3 自平衡补偿方法的设计

为了达到更理想的补偿,两根钕玻璃棒应当放置于热容激光谐振腔内的同一位置上。所以在谐振腔内需使用光学成像系统,两个透镜组成的放大率为 1 的望远镜系统使两棒在彼此相对的主平面上成像,这样两根钕玻璃棒就相当于处在同一位置了^[7]。当然,由于实验室现有的钕玻璃棒较长,两根钕玻璃棒不能完全等效为处在同一位置,具体的效果需要下一步更详细的分析。

本文拟采用的自平衡补偿方法如图 1 所示,两个具有相同焦距 f 的透镜间的距离为 $2f$,这样就组成了 $4f$ 系统了;两透镜与两根钕玻璃的中心间距分别为 f 。

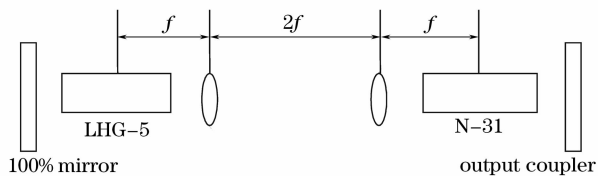


图 1 自平衡补偿方法结构

Fig. 1 Scheme of self-adjusting compensation

4 实验与测量结果

为了先初步了解棒状钕玻璃热容激光器热透镜大小情况,使用自研的光栅型曲率传感器^[9,10]测量了现有的热容激光器热透镜情况。试验中激光器是 6 根闪光灯对称环绕抽运,采用的是紧包漫反射腔。由于在抽运期间,激光及抽运光太强,曲率传感器无法测量。实际试验中,热容激光器以 10 Hz 的频率分别先发射 10、20、30、40 个脉冲,在试验中观察到热传导在发射完 20 s 左右后才建立热平衡,产生明

显的热透镜效应。所以在抽运 20 s 后,使用准直的 632.8 nm 的 He-Ne 光作为探测光源,曲率传感器采集 ±1 级光斑图象。通过计算可以得到棒状钕玻璃存在的总的热透镜等效焦距,测量结果如表 2 所示。光栅型曲率测量有一定误差,但是可以看出,在 40 个脉冲后,其总的热透镜焦距还是较大的。当然也可以从(1)式计算出由温度引起的热透镜焦距,接下来的工作我们准备详细地比较计算和试验的结果。

表 2 测量结果

Table 2 Experiment results

Numbers	10	20	30	40
Focus length /m	164	92	61	52

5 结 论

本文设计的棒状钕玻璃热容激光器热透镜焦距自平衡补偿方法,是光抽运方式下的一种新颖且简单的补偿方法,在热效应存在大的波动时可以实现了热容激光器稳光斑输出,为激光棒热效应对热容激光器光束质量的影响提供了一种新的改善途径。

参 考 文 献

- 1 M. D. Rotter, C. D. Dane. *Solid-State Heat-Capacity-Laser Review* [J]. UCRL-JC-148318, Lawrence Livermore National Laboratory, 2002
- 2 Cai Zhen, Hu Hao, Jiang Jianfeng *et al.*. Kilowatt class laser diodes-pumped solid state heat capacity laser [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(2): 153~156

- 蔡震,胡浩,蒋建锋等. 千瓦级激光二极管抽运热容固体激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2): 153~156
- 3 Li Jindong, Guo Mingxiu, Fu Wenqiang *et al.*. Thermal distortion influence on single-slab heat capacity laser output [J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(1): 43~47
- 李劲东,郭明秀,复文强等. 热畸变对单板条热容激光器输出的影响[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 43~47
- 4 W. Koechner. *Solid-State Laser Engineering* [M]. Sun Wen transl., Beijing: Science Press, 2002. 370~371
- W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文译,北京:科学出版社, 2002. 370~371
- 5 R. Weber, T. Graf, H. P. Weber. Self-adjusting compensating thermal lens to balance the thermally induced lens in solid-state lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2000, **36**: 757~764
- 6 W. Koechner. *Solid-State Laser Engineering* [M]. Sun Wen transl., Beijing: Science Press, 2002. 373~374
- W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文译,北京:科学出版社, 2002. 357~364
- 7 Yang Yi. Design of unstable resonator and thermal stability for rod type solid state heat capacity laser [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005. 34~38
- 杨轶. 棒状固体热容激光器谐振腔及其热稳设计[D]. 长沙:国防科技大学, 2005. 34~38
- 8 W. Koechner. *Solid-State Laser Engineering* [M]. Sun Wen transl., Beijing: Science Press, 2002. 373~374
- W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文译,北京:科学出版社, 2002. 372~377
- 9 Xi Fengjie, Xu Xiaojun, Wang Tiezhi *et al.*. Wave front curvature sensor with phase defocus grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 377~379
- 习锋杰,许晓军,王铁志等. 相位光栅型波前曲率传感器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 377~379
- 10 Xi Fengjie, Jiang Zongfu, Xu Xiaojun. Influence of nonuniform intensity on wavefront curvature sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(9): 1293~1296
- 习锋杰,姜宗福,许晓军. 光强非均匀分布对波前曲率传感器的影响[J]. *光学学报*, 2006, **26**(9): 1293~1296