

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0093-05

热容模式下谐振腔输出特性的理论研究

袁晓东^{1,2}, 蒋新颖², 曹丁象^{2,3}, 王明哲^{2,3}, 徐美健², 刘建国², 贺少勃²

¹清华大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084
²中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900
³国防科技大学光电科学与工程院, 湖南 长沙 400073

摘要 建立了片状激光介质的热-弹性-光三维模型, 利用 ANSYS 软件分析了片状激光介质在热容模式下, 不同工作条件下的温度场和应力场分布, 并计算出在抽运不均匀条件下应力场对光束质量的影响, 进行了相应的实验验证, 结果表明热容模式下的热致双折射效应是影响光束输出特性的主要因素。实验结果与理论模拟基本吻合。

关键词 光学器件; 激光谐振腔; 热容模式; 瞬态热畸变

中图分类号 TN243 **文献标识码** A

Theoretical Research on Output Performance of Laser Resonator at Heat Capacity Model

YUAN Xiao-dong^{1,2}, JIANG Xin-ying², CAO Ding-xiang^{2,3}, WANG Ming-zhe^{2,3},
XU Mei-jian², LIU Jian-guo², HE Shao-bo²

¹ State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China

² Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

³ College of Electro-Optical Science and Engineering, University of National Defence Science and Technology, Changsha, Hunan 400073, China

Abstract A three-dimensional thermo-elasto-optical distortion model for the laser disk has been constructed, the temperature and stress distributions under different work conditions on a laser disk of a heat capacity laser have been simulated by using ANSYS software, and the effect of the stress on the beam quality with nonuniform pump has been analyzed. An demonstration experiment is done, and the results are accordant to the simulation results. The results show that at the heat capacity mode, the thermal induced birefringence is the main reason to affect the output beam properties.

Key words optical devices; laser resonator; heat capacity model; temporal thermo-optical distortions

1 引 言

固体激光经过 45 年的发展, 取得了一系列辉煌的成就。传统的高功率固体激光, 提高平均功率的主要问题来自介质的热效应, 为了解决热效应问题, 人们发展了多种构型的激光器, 如薄片激光器, 板条激光器等, 使平均输出功率由千瓦提高到几十千瓦。1997 年美国 LLNL 的 Albrecht 等^[1] 提出了热容激光器的概念, 并于 2001 年在白沙导弹靶场完成了演示实验, 获得了 13kW 的输出功率, 持续时间 6 s。

这种热容激光器以其特殊的工作模式, 使固体激光在相对短的时间内输出兆瓦级高平均功率成为可能^[1~3]。这种热容模式的最显著特点就是将激光的发射过程与冷却过程分离, 发射时不冷却, 避免了冷却造成的热梯度, 从而有效地避免热效应。但实际情况中, 由于抽运不均匀性造成的热不均匀, 会随着介质温度的升高产生热交换, 从而破坏热平衡。而且由于热容激光器的工作时间通常为几秒, 很难建立新的平衡。因此热容模式下, 介质的热效应既不

基金项目: 中国工程物理研究院基金重大项目(z0405)和国家高技术 863-802-8 专题资助课题。

作者简介: 袁晓东(1966—), 男, 清华大学博士研究生。E-mail: yuanxd02@mails.tsinghua.edu.cn

同于单次工作也不同于重复频率工作的介质。目前对这种“瞬态”工作的激光器的有源谐振腔研究尚属空白。

热容激光器与传统高功率固体激光器的差别主要表现在:首先,热容激光器中介质工作在高温状态,介质的能量转换等特性会受到温度的影响;其次,热容激光器工作时不冷却,近似工作在绝热条件下,原则上介质的温度会升高而温度分布不变,但由于抽运的不均匀性,介质与周围环境或多或少的热交换会导致在介质的横向和纵向产生温度梯度。而且其工作周期较短,介质的热效应属瞬态行为,因此有必要研究介质热效应随时间改变的固体激光的输出特性,探索实现热不灵敏工作的可行性。

2 理论研究

谐振腔的选择是决定热容激光器输出特性的关键因素之一。由于热容激光器工作在高温条件下,并且介质温度随工作时间升高,因此热容激光器的

谐振腔必须满足低损耗和热不灵敏这两个原则。

对热容激光器而言,决定输出光束质量的主要因素是介质的温度场和应力场分布,而非绝对温度。针对这种特点,建立了“热-弹性-光学”模型^[4],研究介质在工作周期内的温度场和应力场的变化,再带入谐振腔模型^[5],获得热容模式下输出光束的特性。

由于输出光束质量只取决于谐振腔构型和介质的应力场分布,与具体的抽运方式无关,我们基于现有的闪光灯抽运固体片状激光器,计算了介质的温度场、应力场分布,在此基础上计算了波面和退偏损耗分布,获得了热容模式下片状激光的输出特性,模拟计算所用的模型如下。

2.1 激光器模型

热容激光器采用三片组激光器,如图1所示,4支灯从两面进行抽运,每支灯的最高抽运功率5kW,总体转换效率1%。介质尺寸为60mm×28mm×6mm,每两片介质组合在一起,采用“三明治”结构,以便在工作结束后散热。

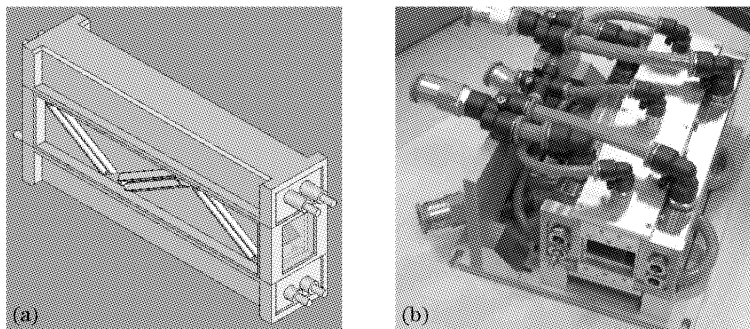


图1 闪光灯抽运的片状激光器模块结构图(a)与真实照片(b)

Fig. 1 Structure (a) and visual image (b) of flash lamp pumped disk laser module

2.2 介质热传导模型

在热容模式下,可假设激光介质与外界绝热,没有对流换热。假设初始温度为300K, YAG片内的热传输模型可由标准的有内热源三维瞬态热传输方程来描述。

$$\begin{cases} \rho c \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v, \\ T(x, y, z; 0) = 300, \\ -\kappa \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Sigma} = h_c (T - T_g), \end{cases} \quad (1)$$

式中 Σ 为晶体的通光面, κ, ρ, c 分别为晶体的热传导系数、密度和定压热容, h_c 为晶体同周围空气的自然对流换热系数, q_v 为热产生率, T 为介质表面温度, T_g 为空气温度, n 为晶面法线方向。

2.3 热弹性力学模型

由于激光介质内存在一定的温度(梯度)分布,而晶体不可能发生完全自由的三维热膨胀,因此必须根据热力学边界条件来确定晶体的变形以及热应力分布。标准的热弹性力学的边值问题可由方程控制,

$$\begin{cases} L^T \cdot \sigma + g = 0, \\ \epsilon = L \cdot u, \\ \sigma = D \cdot (\epsilon - \epsilon_0), \\ \Sigma \cdot n \Big|_s = -C(u \Big|_s - u_\infty), \end{cases} \quad (2)$$

式中

$$L = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 & 0 & 0 & \partial/\partial z & \partial/\partial y \\ 0 & \partial/\partial y & 0 & \partial/\partial z & 0 & \partial/\partial x \\ 0 & 0 & \partial/\partial z & \partial/\partial y & \partial/\partial x & 0 \end{bmatrix}^T,$$

$$\boldsymbol{\Sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{yx} & \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & \sigma_{zy} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zx} \end{bmatrix}, \text{为介质的热应力张量。}$$

$$\boldsymbol{\sigma} = [\sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z \quad \tau_{yz} \quad \tau_{zx} \quad \tau_{xy}]^T, \text{为 } \boldsymbol{\Sigma} \text{ 的简化形式。}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{zx} \quad \gamma_{xy}]^T,$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_0 = [\alpha_x \quad \alpha_y \quad \alpha_z \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \cdot \Delta T,$$

$$\boldsymbol{u} = [u_x \quad u_y \quad u_z]^T,$$

$$\boldsymbol{n} = [n_x \quad n_y \quad n_z]^T,$$

g 是 YAG 晶体的体力密度, \boldsymbol{D} 和 \boldsymbol{C} 分别是材料常数矩阵和弹性刚度系数矩阵。

2.4 光学模型

无应力、变形情况下,立方晶体材料或各项同性的介质的折射率满足折射率球方程

$$\sum_i B_{ii} x_i^2 = 1, \quad i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

式中 $B_{ii} = 1/n_i^2 = 1/\rho_i^2$; 当存在应力时折射率方程变为一个椭球方程

$$B_1 x_1^2 + B_2 x_2^2 + B_3 x_3^2 + 2B_4 x_2 x_3 + 2B_5 x_1 x_3 + 2B_6 x_1 x_2 = 1, \quad (4)$$

式中 $B_{1,2,3} = B_0 + \delta B_{1,2,3}, B_{4,5,6} = \delta B_{4,5,6}$ 。张量 \boldsymbol{B} 由方程确定

$$\begin{bmatrix} \delta B_1 \\ \delta B_2 \\ \delta B_3 \\ \delta B_4 \\ \delta B_5 \\ \delta B_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 π_{ij} 是在材料主轴坐标系下定义的压光系数,对于各项同性介质材料,虽然主轴方向任意,但是上述方程已表明,此时的主坐标系就是我们在求解应力

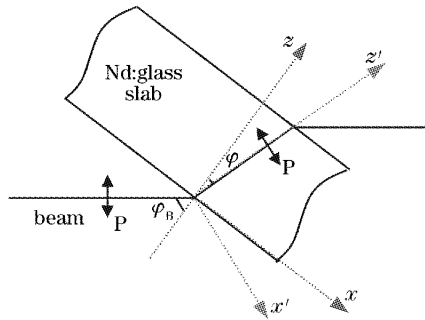


图 2 水平偏振以布儒斯特角入射至 YAG 片的激光束
Fig. 2 Horizontally polarized laser beam incident on the Nd:YAG slab with Brewster angle

时所定义的坐标系,介质片的宽度、高度、厚度方向分别为 x, y, z 轴。

考察水平方向偏振的激光束以布儒斯特角入射至 YAG 片时的情形,如图 2 所示。

显然,当光束以布儒斯特角入射时, $\varphi_B + \varphi = \pi/2$ 。 $\delta \boldsymbol{B}$ 和变形的变换关系分别为

$$\delta \boldsymbol{B}' = \boldsymbol{A}^T(\varphi) \cdot \delta \boldsymbol{B} \cdot \boldsymbol{A}(\varphi), \quad (6)$$

$$d\boldsymbol{r}' = \boldsymbol{A}(\varphi) \cdot d\boldsymbol{r}, \quad (7)$$

式中变换矩阵 \boldsymbol{A} 为:

$$\boldsymbol{A}(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix}, \quad (8)$$

因此,

$$\delta B'_1 = \delta B_1 \cos^2 \varphi + 2\delta B_5 \sin \varphi \cos \varphi + \delta B_3 \sin^2 \varphi, \quad (9)$$

$$dz' = dx \cdot \sin \varphi + dz \cdot \cos \varphi. \quad (10)$$

同时也考虑到折射率随温度的变化之后,最后我们得到 YAG 片存在温度和应力的情况下,折射率 n 变为

$$n(x', y', z') = n_0 + \beta \cdot T(x', y', z') - \frac{1}{2} n_0^3 \delta B'_1(x', y', z'), \quad (11)$$

式中 β 为钕玻璃材料的折射率温度系数, n_0 是材料在通常情况下的折射率。因此,光束在钕玻璃片中的光程 L' 为

$$L' = \int_0^{l'} n(x', y', z') dz'(x', y', z'), \quad (12)$$

式中 $l' = \sqrt{n_0^2 + 1} \cdot (l_0/n_0)$, l_0 是钕玻璃片的厚度。

2.5 激光谐振腔模型

为了考察热容激光器中介质的热效应对输出特性的影响,以法布里-珀罗腔为例,研究热容模式下的激光输出特性。腔参量选取为:腔长 50 cm,后腔镜和输出耦合镜均采用 50 mm×50 mm 的方镜,输出耦合镜的反射率为 70%。

3 模拟计算结果

3.1 介质在不同工作条件下温度场和应力场的计算结果

利用 ANSYS 软件,计算了 Nd:YAG 介质在热容模式下,10 Hz 重复频率工作 1 s 至 10 s 的应力场和温度场分布。初始温度场分布采用热像仪测量的数据,带入抽运功率、介质吸收系数等,不考虑介质与空气的对流换热,只考虑与片夹持件的对流换

热,典型的数据如图 3 所示。

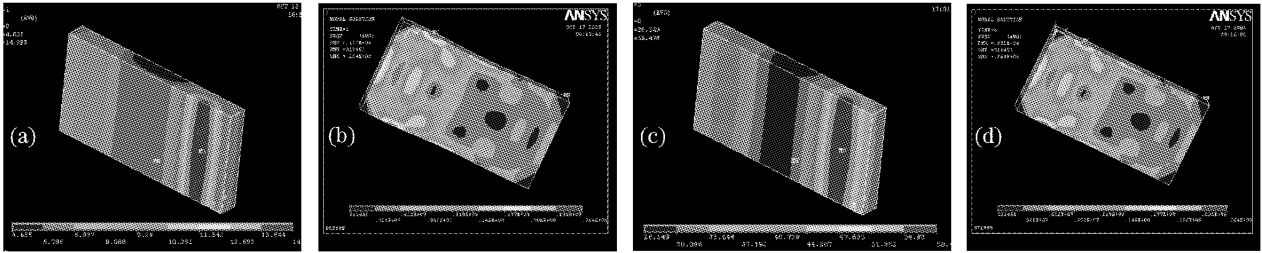


图 3 利用 ANSYS 计算的 Nd:YAG 片状介质的温度分布和应力分布。工作 1 s 时的温度分布(a)和应力分布(b)及工作 5 s 时的温度分布(c)和应力分布(d)

Fig. 3 Simulated temperature and stress distribution on Nd:YAG by ANSYS. The temperature (a) and stress (b) distribution on Nd:YAG after 1 s work and the temperature (c) and stress (d) distribution on Nd:YAG after 5 s work

3.2 输出光斑计算结果

带入温度场和应力场的计算数据,计算出介质内折射率的变化情况,将这种变化作为附加的波面

畸变带入 SG99 模型模拟法布里-珀罗腔的输出光束质量,结果如图 4 所示。

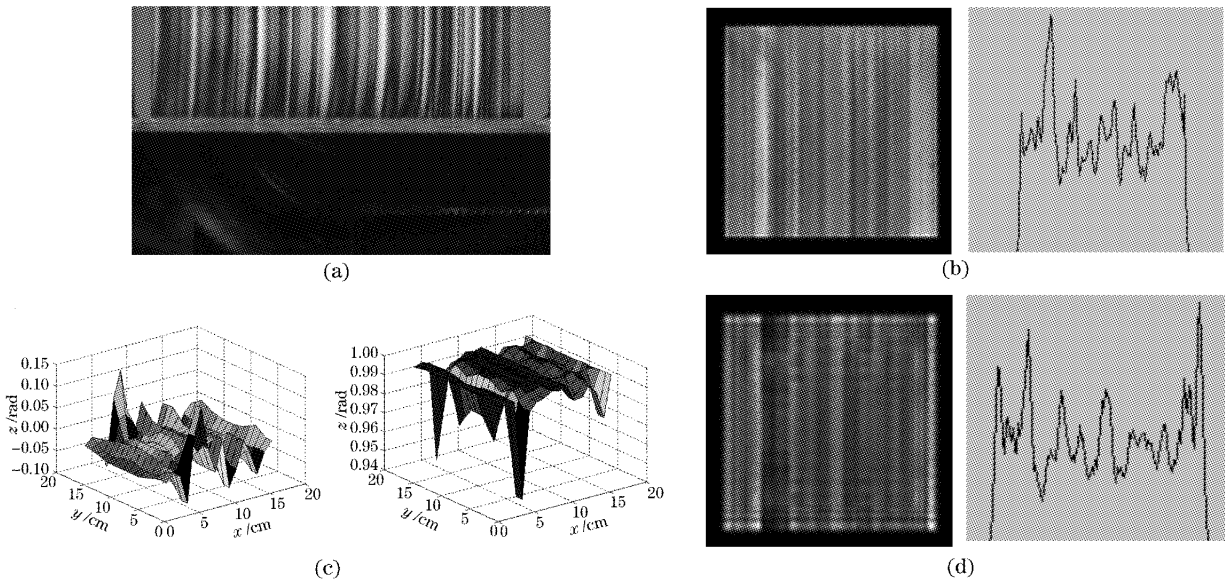


图 4 传统非稳腔在无源和介质工作 5 s 时的模拟计算结果。(a)正交偏振条件下介质片的透射情况;(b)静态输出特性;(c)工作 50 个脉冲后的附加波前畸变和 P 分量损耗;(d)工作 50 个脉冲后输出光斑特性

Fig. 4 Simulation results of the traditional unstable resonator without source and media after 5 s work. (a) Transmittance of the YAG disk at orthogonal polarization; (b) output beam property without shot; (c) wave front distortion and loss of P polarization after 50 shots; (d) output beam properties after 50 shots

结果表明,当介质以 10Hz 的频率工作 5s 后,由于初始温度不均匀造成的温度梯度将导致介质折射率分布改变,同时导致热致双折射效应,产生附加应力。这种附加应力将改变相位分布,造成 p 偏振分量损耗,最终将导致输出光斑的近场出现畸变,使光束质量下降,输出功率降低。因此热容激光器要获得高光束质量输出,首要的问题是补偿热致双折射的影响。

4 实验验证

利用上述闪光灯抽运的激光头进行了热容模式下输出特性的实验研究,闪光灯的单脉冲抽运能量 500 J,脉宽 450 μs,重复频率 10 Hz。总平均抽运功率 20 kW,激光平均输出功率 200 W。实验获得的激光输出光斑如图 5(a)所示,用热像仪测量的 YAG 介质表面温度分布如图 5(b)所示,实验结果

与模拟结果基本吻合。

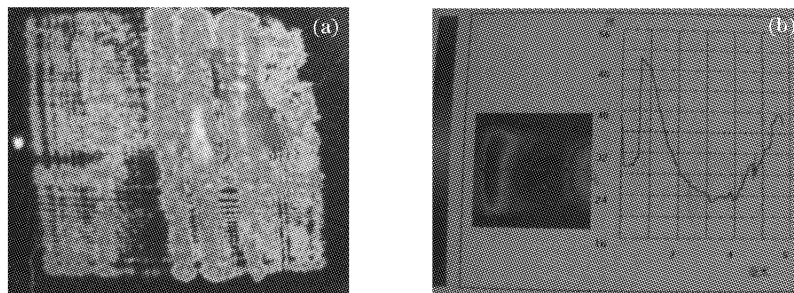


图 5 工作 50 个脉冲后的 (a) 输出光斑分布和 (b) YAG 片表面温度分布

Fig. 5 Experiment results of the output beam distribution (a) and the surface temperature distribution (b) after 50 shots

5 结 论

建立了热-弹性-光学模型,研究了热容模式下 Nd:YAG 中应力双折射效应对谐振腔输出特性的影响。利用 ANSYS 软件计算了 Nd:YAG 介质在热容模式下输出光斑随工作时间变化的情况。结果表明,热容模式下,由于介质工作在高温状态,抽运不均匀和周围环境的改变都将导致介质内产生新的温度梯度,导致介质折射率分布的改变,最终导致输出光束质量下降。由于热容激光器工作在高重复频率,时间短,因此要获得热不灵敏输出,需设计带自补偿功能的谐振腔。但要较好地补偿这种热效应,获得具有较高光束质量的稳定输出,还需考虑新的实时补偿技术,或者改进抽运和激光器结构,减小介

质由于不均匀性导致的温度梯度和应力分布。

参 考 文 献

- 1 Albrecht G F, Sutton S B, George E V *et al.*. Solid state heat capacity disk laser [J]. *Laser and Particle Beams*, 1998, **16**(4): 605~625
- 2 Rotter M D, Brent D C. Solid state heat capacity laser review [R]. SSDLTR, Technical Digest, 2002
- 3 Dane B C. World's most powerful solid state laser [BD]. www.llnl.gov. 2002
- 4 Yu Haiwu, Zheng Wanguo, Wang Chengcheng *et al.*. Investigation of thermal reconery of wavefront distortion of the single-segment amplifier [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(11): 961~965
於海武, 郑万国, 王成程 等. 单口径片状放大器波前畸变热恢复研究 [J]. *中国激光*, 2001, **A28**(11): 961~965
- 5 Norman Hodgson, Horst Weber. *Optical Resonator* [M]. London: Springer-Verlag, 1997