

文章编号: 1001-4322(2007)01-0053-05

激光辐照下非稳腔镜变形对激光模式的影响*

杜少军, 陆启生, 舒柏宏, 王默戈

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 长沙 410073)

摘要: 分析了正支虚共焦非稳腔中腔镜变形对激光模式的影响, 采用时间离散化、快速傅里叶变换 (FFT) 和有限元分析 (FEA) 方法解决腔镜变形和激光模式两者之间的耦合问题。计算结果表明, 随着激光器工作时间的增加, 腔镜温升和变形相应增大, 谐振腔模式变差, 输出光场相位均匀性变差, 呈现散焦现象, 输出光束质量下降。实验验证了激光器输出光束质量随出光时间的延长而逐渐变坏。

关键词: 非稳腔; 激光模式; 腔镜变形; 时间离散; 快速傅里叶变换; 有限元分析

中图分类号: TN24 **文献标识码:** A

高功率连续波激光器一般采用非稳腔, 尤其是正支虚共焦非稳腔, 以大的横模体积、良好的选模能力和输出准直平行光束等优点受到人们的重视。理论分析和实验表明^[1-3], 腔镜热变形是影响激光器输出光束质量的一个重要因素, 有关这方面的研究报道大都局限于定性方面的分析, 如文献[2]假定反射镜表面的平均热流密度, 文献[3]认为腔镜表面变形可以用四次幂函数拟合, 没有讨论腔镜变形和激光模式两者之间的耦合问题。

非稳腔镜的变形影响激光模式, 而激光模式的变化又使腔镜上加载的热源发生变化, 从而影响腔镜的变形, 两者相互关联。本文采用时间离散化的方法解决两者的耦合问题, 计算腔镜的变形和激光模式, 用有限元分析 (FEA) 方法分析和计算腔镜表面变形, 用快速傅里叶变换 (FFT) 方法计算不同变形下的激光模式。

1 计算模型

1.1 热和结构的数学模型

设腔镜材料为各向同性, 腔镜温度场的物理方程为

$$k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中: k 为热导率; c_p 为定压质量热容; ρ 为材料密度; T 为温升分布; t 为时间。

温度场为瞬态, 其初始条件

$$T(x, y, z, t) |_{t=0} = 0 \quad (2)$$

边界条件: 设激光沿 z 方向入射光学材料, 对于反射腔镜, 由于其表面一般镀有高反膜, 而膜层很薄, 忽略膜层的散射和膜层温升所需的能量, 腔镜反射表面的热流密度为

$$q(x, y, t) = (1 - R)I(x, y, t) \quad (3)$$

式中: R 为反射镜的反射率; $I(x, y, t)$ 为光强的时空分布。其它边界为绝热边界。

$I(x, y, t)$ 的计算过程为: 设侧向耦合镜 (中空环形) 输出的激光功率在出光过程中不变, 通过计算侧向耦合镜所在平面 (即凸面腔镜所在平面) 的相对强度分布和出光功率, 求得凸面腔镜上的绝对光强分布, 根据腔内增益分布, 得到凹面腔镜上的绝对强度分布。

热-应力 (变形) 耦合分析采用序贯耦合解法, 先进行非线性瞬态热分析, 将热分析的结果作为结构分析的载荷来实现两种场的耦合, 再进行线性静态应力分析。这样, 材料的状态由准静态的热弹性方程组决定 (包括几何方程、物理方程和力的平衡方程, 其边界条件取固支边界)。

$$\begin{cases} \epsilon_{ij} = (u_{i,j} + u_{j,i})/2 \\ \sigma_{ij} = \zeta e \delta_{ij} + 2G \epsilon_{ij} - (3\zeta + 2G)\alpha T \delta_{ij} \\ \sigma_{ij,j} = 0 \quad (i, j = x, y, z) \end{cases} \begin{cases} \zeta = E\mu / [(1 + \mu)(1 - 2\mu)] \\ G = E / [2(1 + \mu)] \\ e = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z \end{cases} \quad (4)$$

* 收稿日期: 2005-09-06; 修订日期: 2006-09-13

基金项目: 国防科技基础研究基金资助课题

作者简介: 杜少军 (1972—), 男, 副教授, 从事激光传输变换及激光与物质的相互作用等方面的研究; d_sj@tom.com。

式中: ϵ 为应变; u 为位移; σ 为应力; ζ 和 G 为 Lamé 常数; α 为热膨胀系数; E 为拉弹性模量; μ 为泊松比; δ_{ij} 为 Kronecker 符号。式中逗号表示偏导数, 平衡方程中用了求和约定。

1.2 谐振腔模式计算

激光器运行过程中, 只有腔镜反射表面相对其初始位置的变化(表面位移)才会对激光模式产生影响。由于两反射镜在垂直于光轴平面(xy 平面)上的尺寸远小于腔长和腔镜的曲率半径, 热变形产生的相移可认为是反射表面沿 z 方向的位移变形引起, 变形带来的附加相移为表面位移形变的 2 倍, 该相移在 xy 平面上的离散分布为

$$\phi(x, y) = k[2u_z(x, y)] \quad (5)$$

式中: k 为波矢; $u_z(x, y)$ 为腔镜表面位移。

谐振腔模式的计算有多种方法, 文献[3]采用 Fox-Li 迭代的方法, 文献[4]报道了直接求解亥姆霍兹方程的方法。为兼顾将来分析增益介质对输出光束的影响, 提高计算速度, 如文献[5-6]所示, 采用 FFT 方法和增益介质多层分布法计算变形前、后非稳腔的模式。沿光轴方向将谐振腔等分成若干模块, 相邻模块之间的光束传输用 FFT 方法计算, 到达任一反射镜面时, 乘以镜面反射函数。镜面反射函数为

$$f(x, y) = \begin{cases} \exp\{-i[k(x^2 + y^2)/r + \phi(x, y)]\}, & x^2 + y^2 \leq a^2 \\ 0, & x^2 + y^2 > a^2 \end{cases} \quad (6)$$

式中: a 为反射镜几何半径。

往返循环迭代, 直到光波振幅收敛于一稳态解。

1.3 激光模式和腔镜变形的耦合计算

将激光器工作时间分成若干个时间间隔, 在这段时间间隔内腔镜上光强(模式)分布不变, 具体过程为: 设时间间隔为 Δt , 首先计算无变形的激光模式, 根据该模式腔镜上的光强分布计算腔镜表面位移, 将此位移作为附加相移, 计算 Δt 时刻两反射镜上的光强分布, 得到 $\Delta t \sim 2\Delta t$ 时间内反射镜上加载的面热源分布, 再求解 $2\Delta t$ 时刻的腔镜表面位移, 如此往复, 得到激光器最后时刻的输出光场分布。

2 计算结果和分析

计算参数为: 谐振腔为正支虚共焦非稳腔, 放大倍数 $M=2.2$, 等效菲涅耳数 $N_{eq}=2.6$, 凹、凸面反射镜的几何半径分别为 2 cm 和 1 cm, 表面曲率半径分别为 22 m 和 -10 m。反射镜材料为 Si, 热导率 $k=0.201$ W/(cm·K), 定压质量热容 $c_p=0.68$ J/(g·K), 密度 $\rho=2.325$ g/cm³, 热膨胀系数 $\alpha=2.4 \times 10^{-6}$ K⁻¹, 拉弹性模量 $E=3.87 \times 10^9$ g/cm², 泊松比 $\mu=0.28$ 。反射镜的反射率为 99.9%, 镜面绝对光强分布与归一化分布相同, 侧向耦合镜输出激光功率在出光过程中保持不变, 腔内增益均匀分布, 增益系数 0.5 m⁻¹, 波长 3.8 μ m, 出光时间为 1.0 s, 时间间隔 Δt 取 0.1 s。

首先计算腔镜无变形时的理想模式, 以验证谐振腔计算程序的正确性。图 1 是空腔条件下腔镜无变形时输出光的归一化光强和相位分布, 从图可以看出, 输出光束的近场强度分布有一个主峰, 沿径向方向存在一定的起伏, 这是腔镜的往返衍射造成的, 相位分布也存在起伏, 与文献[6]的结果进行比较, 二者较为相符, 说明谐

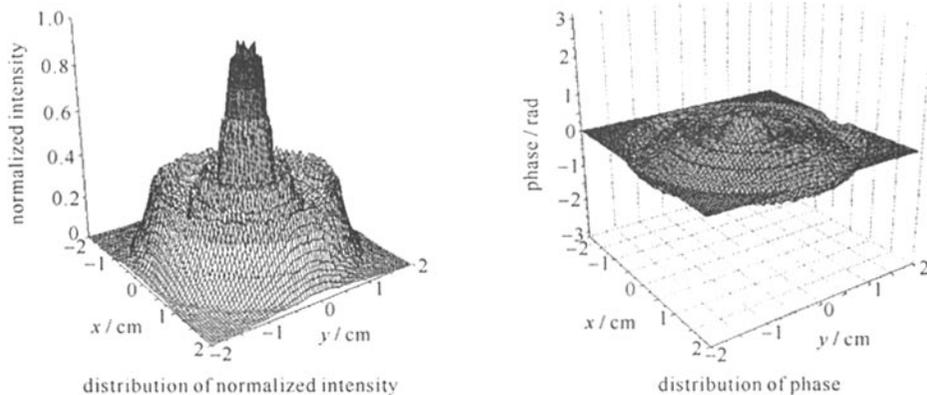


Fig. 1 Distributions of normalized intensity and phase in the output-plane with no deformation of resonator mirrors

图 1 腔镜无变形时输出平面上的归一化强度分布和相位分布

振腔模式计算程序是正确的。

根据激光输出功率、腔内增益分布和计算得到的腔镜上归一化强度分布,求得两反射腔镜上的绝对光强分布,图 2 是理想模式下反射镜上的绝对光强分布,由于正支虚共焦非稳腔固有的特点,凸面腔镜上的功率密度(b)大于凹面腔镜上的功率密度(a),导致两反射腔镜表面热流密度的分布和大小也不一致。

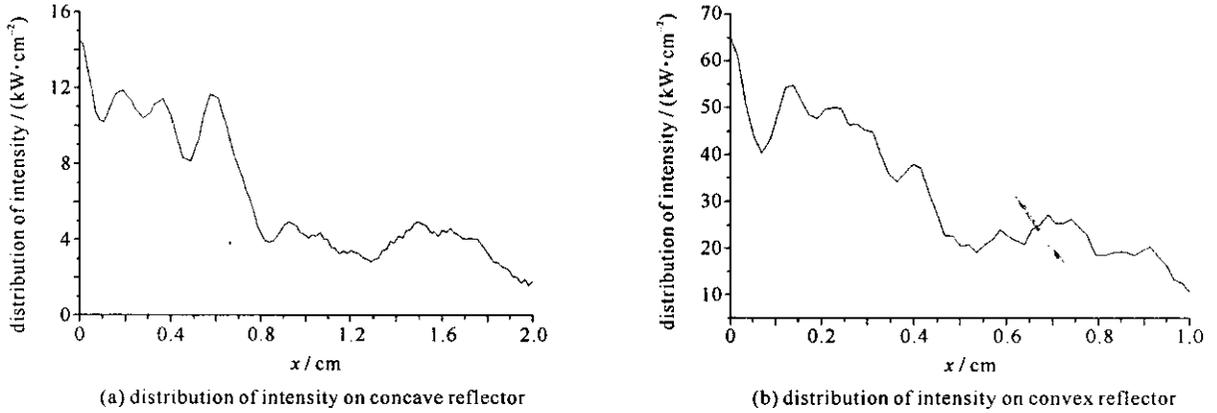


Fig. 2 Distributions of intensity on resonator mirrors with no deformation

图 2 腔镜无变形时两反射镜上的绝对光强分布

对不同时刻凹、凸面反射镜表面温升和位移的径向分布的计算结果进行比较,如图 3 和图 4 所示。从图上可以看出,反射镜瞬时受热,强光区域的变形较大,变形分布与温升分布类似,随着激光器工作时间增长,温升和变形也相应增大。由于腔镜上光强分布的差异,凸面反射镜的表面温升和径向位移大于凹面反射镜。反射镜材料 Si 的热导率较高,温升和变形的分布与加载的面热源(光强)分布相比,热传导效应抹平了热源的起伏,使温升和变形分布较为平滑。

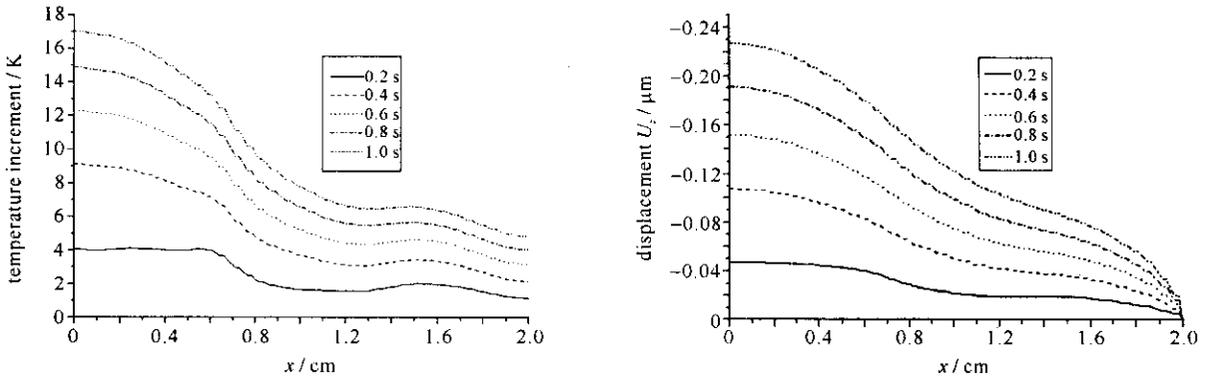


Fig. 3 Radial temperature increment and surface displacement on concave reflector for different time

图 3 不同时刻凹面反射镜上的温升和表面位移的径向分布

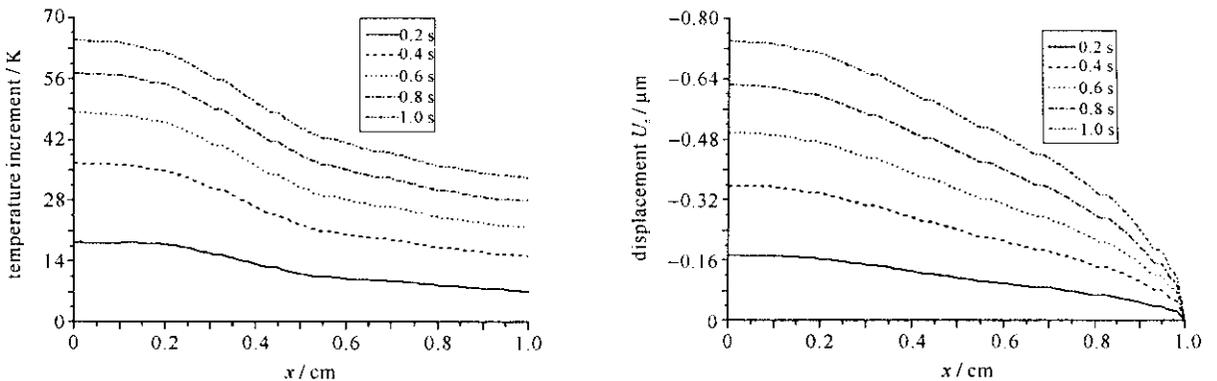


Fig. 4 Radial temperature increment and surface displacement on convex reflector for different time

图 4 不同时刻凸面反射镜上的温升和表面位移的径向分布

图 5 是 0, 0.4 和 0.8 s (即腔镜不同变形) 输出光场的振幅和相位的径向分布, 随着腔镜变形的增加, 输出光场的振幅和相位分布有所改变。出光时间增加, 相位分布的均匀性逐渐变差, 输出镜中心的相位超前 (为负) 于边缘相位, 腔镜热变形使得输出光场呈现散焦的现象。振幅分布也有所变化, 存在一定程度的起伏, 峰值逐渐向镜边缘方向移动, 振幅 (光强) 分布的变化影响腔镜表面位移 (变形) 的分布。由于 Si 有较高的热导率, 这种变化在反射镜表面温升和变形上表现不明显, 即激光器工作时间是腔镜温升和变形的主要因素, 振幅随时间的变化对温升和变形起一定的作用。

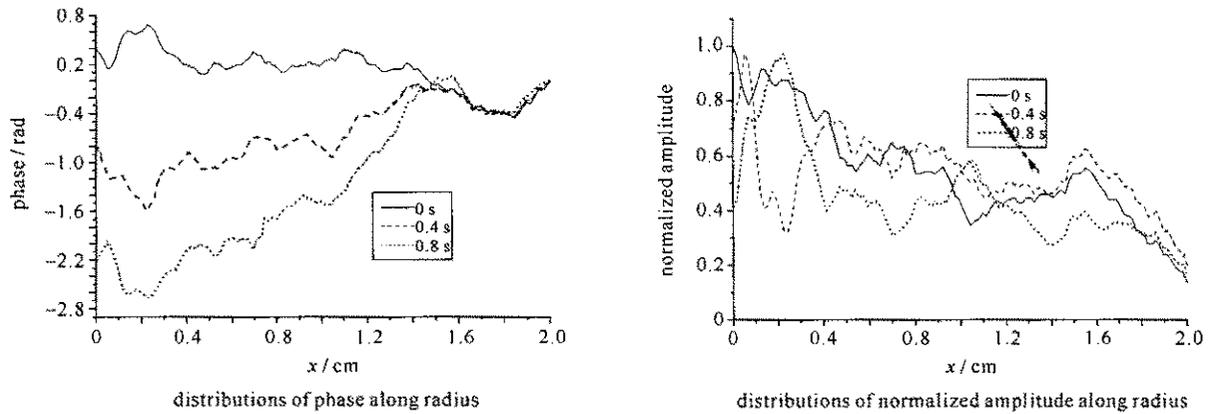


Fig. 5 Distributions of normalized amplitude and phase along radius of the output beam-field for different time

图 5 不同时刻输出光场振幅和相位的径向分布

相位分布是决定光束质量的主要因素, 微小的相位扰动就可能使光束质量受到较大的影响, 图 6 是输出光场远场 Strehl 比随时间的变化, 可以看出, 随着出光时间的增长, 光束质量逐渐变差, 这主要是由于腔镜表面位移的均匀性随时间逐渐变差引起的。

实验中, 我们多次观察到激光器输出光束质量随时间的变化。由于出光过程中, 激光器输出功率存在一定的起伏, 无法以远场 Strehl 比来衡量光束质量的好坏, 一般以光斑半径 (光束质量因子) 作为光束质量的评判标准, 以初始时刻的光斑半径为基准。图 7 是实验测得的光斑半径相对值随出光时间的变化曲线, 结果表明, 输出光束质量随出光时间的增加而逐渐变差。

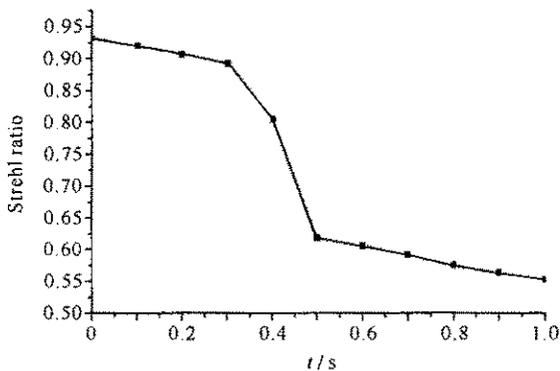


Fig. 6 Far-field Strehl ratio of output beam-field vs working time of laser

图 6 输出光场的远场 strehl 比随出光时间的变化

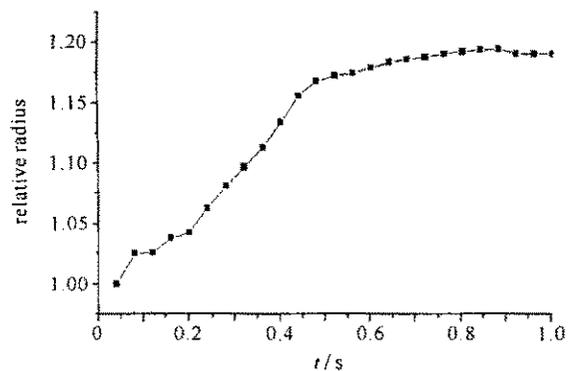


Fig. 7 Relative radius of output beam-field vs working time of laser

图 7 输出光场的远场相对光斑半径随出光时间的变化

实际情况与计算条件存在诸多差异, 如输出功率、谐振腔尺寸、腔内增益分布等。另外, 增益介质的扰动等对光束质量也有一定的影响, 实际激光器输出光束质量的计算需要加以考虑。

3 结 论

时间离散化、FFT 和有限元分析方法是分析腔镜变形和激光模式两者耦合问题的有效方法。激光器工作时间增长, 腔镜温升和变形相应增大, 表面位移的均匀性逐渐变坏, 输出光场的相位起伏增加, 呈现散焦现象, 输出的光束质量变差, 远场 Strehl 比下降。腔镜上光强分布也发生变化, 对于腔内增益均匀分布的激光器而言, 振幅峰值逐渐向外移动, 当反射镜材料的热导率较大时, 光强随时间的变化对腔镜温升和变形分布的影响起有限的作用。

为得到比较精确的温升、变形和输出光场分布,可减小时间间隔 Δt , 增加时间离散的个数,但这样会增加计算量。

参考文献:

- [1] 黄涛,林明辉,程祖海. 强激光全反腔镜热变形模型及计算[J]. 强激光与粒子束, 1995, **7**(3):366-371. (Huang T, Lin M H, Cheng Z H. Thermal deformation model and calculation of the metal resonator mirror of high power laser. *High Power Laser and Particle Beams*, 1995, **7**(3):366-371)
- [2] 于德利,桑凤亭,金玉奇,等. 高能量密度激光器腔镜有限元分析[J]. 强激光与粒子束, 2001, **13**(2):129-131. (Yu D L, Sang F T, Jin Y Q, et al. Finite element analysis of the mirror in high-energy density laser resonator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, **13**(2):129-131)
- [3] 库耕,程祖海,朱松林,等. 腔镜变形对平凹稳腔激光振荡模式影响的数值研究[J]. 强激光与粒子束, 1997, **9**(3):448-450. (Ku G, Cheng Z H, Zu S L, et al. Numerical study of effect of the mirror distortion on the oscillatory mode variation of stable resonator. *High Power Laser and Particle Beams*, 1997, **9**(3):448-450)
- [4] Rensch D B. Three-dimensional unstable resonator calculations with laser medium[J]. *Appl Opt*, 1974, **13**(11):2548-2551.
- [5] 杜燕胎. 用增益介质多层分布法模拟非稳腔光束特性[J]. 强激光与粒子束, 2000, **12**(4):433-436. (Du Y Y. Simulation of beam using more gain segments method in confocal unstable resonator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(4):433-436)
- [6] 张虎,彭玉峰,朱遵略,等. 有正支共焦非稳腔二氧化碳激光器的模场计算[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2002, **30**(2):33-35. (Zhang H, Peng Y F, Zhu Z L, et al. Mode calculations of CO₂ lasers with positive-branch confocal unstable resonator. *Journal of Henan Normal University (Natural Science)*, 2002, **30**(2):33-35)

Laser mode changing with deformation of resonator mirrors under irradiation

DU Shao-jun, LU Qi-sheng, SHU Bo-hong, WANG Mo-ge

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

Abstract: Influences on the mode of positive-branch confocal unstable resonator are analyzed, which is caused by deformation of resonator mirrors. The coupling relations between deformation of resonator mirrors and laser modes are solved by using methods of time discrete, fast Fourier transform(FFT) and finite element analysis(FEA). With the increasing working time of laser discreteness, the results of calculation show that temperature increment and deformation of resonator mirrors become serious, which causes decline of laser modes and beam quality. The uniformity of phase and dispersing appearance are discussed. The correlative experiments show that laser output beam quality becomes worse when the laser works longer.

Key words: Unstable resonator; Laser mode; Deformation of resonator mirror; Time discreteness; Fast Fourier transform(FFT); Finite element analysis(FEA)