

文章编号: 1001-3806(2007)01-0106-03

FFT 模拟腔镜畸变情况下高能 CO₂ 激光器输出模场

彭玉峰, 陈 靖, 吕珍龙, 李阔湖, 彭爱莲, 张永涛
(河南师范大学 物理与信息工程学院, 新乡 453007)

摘要: 为了研究横流气体激光器因谐振腔镜倾斜、中心热变形以及增益介质的横向流动而产生的非均匀增益对激光模场分布的影响, 采用快速傅里叶变换算法模拟了高能 CO₂ 激光器的输出模场。结果表明, 这些因素都会导致模场分布畸变。通过腔镜冷却、改善腔镜材料、增大反射率以及适当调节腔镜倾斜方向可改善非均匀增益对模场的影响。

关键词: 激光光学; 非均匀增益; 热变形; 快速傅里叶变换; 模场分布

中图分类号: TN248.2⁺2 文献标识码: A

Output mode simulation for high-energy CO₂ laser with mirror deformation by means of FFT

PENG Yufeng, CHEN Jing, LÜ Zhen-long, LI Kuo-hu, PENG Ailian, ZHANG Yong-tao
(College of Physics and Information Engineering Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract The fast Fourier transform method is used to study the mode field distribution for high-energy CO₂ laser induced by the resonator mirror tilt, centre thermal distortion at the mirror and inhomogeneous gain resulting from transverse flow of gain medium. The simulation results indicate that all the above factors influence affect the mode field distribution. However the effect can be reduced by cooling resonator mirrors, adopting new mirror substrate materials, improving the reflective rate of mirror and arranging mirror tilt.

Key words laser optics; inhomogeneous gain; thermal deformation; fast Fourier transform; mode field distribution

引 言

高能 CO₂ 激光器在实际应用中, 因腔镜失调而产生的倾斜及气体横向流动造成的增益非均匀, 不可避免地要对激光模场产生影响, 使得光场分布不均。而光学元件吸收激光能量引起非均匀温升形成的温度梯度, 将导致光学元件热畸变和内部压力的产生, 最终引起模式耦合。激光器远场输出光斑发生漂移, 光斑本身大小及强度也发生变化, 制约了高能激光器性能的提高^[1]。

作者在有限元法得出的腔镜热变形分布的基础上^[2], 采用快速傅里叶变换法, 计算了高能 CO₂ 气体激光器的模场, 并绘出了存在非均匀增益、腔镜倾斜及中心热变形情况下腔中的模场及远场分布, 同时对此进行了探讨, 为更好地发挥该激光器的性能提供理论依据。

基金项目: 国家重点基础“研究计划”(“九七三”计划)子课题资助项目

作者简介: 彭玉峰(1963-), 男, 教授, 博士, 主要从事高功率激光器件、激光与物质相互作用等方面的研究工作。

Email: physicsc@sina.com

收稿日期: 2005-10-19; 收到修改稿日期: 2006-01-31

1 理论基础及计算模型

1.1 快速傅里叶变换计算近场及远场光场分布

空间波函数通过一系列傅里叶变换及逆变换, 实现在实空间和 K 空间的转换, 可以更快捷得出实空间的光场分布:

$$u_1(x, y) = \iint p_1(\nu_x, \nu_y) \exp(i2\pi\nu_x x + i2\pi\nu_y y) d\nu_x d\nu_y \quad (1)$$

式中, ν_x, ν_y 为平面波空间频率 ν 的分量, $p_1(\nu_x, \nu_y)$ 为逆变换前的空间频率谱。具体处理过程与文献[3]中类似。

根据菲涅耳-夫琅和费近似可以求出非稳腔的远场光强分布:

$$r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y + y_0)^2 + R^2} \quad (2)$$

导出远场图形的详细结构, 如图 1 所示。

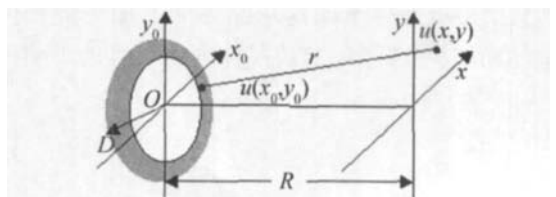


Fig 1 Far field calculation model

在傍轴近似条件下:

$$r = R + \frac{(x - x_0)^2 + (y + y_0)^2}{2R} + \frac{[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]^2}{8R^3} + \dots \quad (3)$$

当满足 $\frac{k(x_0^2 + y_0^2)_{\max}}{2R} \ll \pi$ 时, 为夫琅和费衍射, 此时光场:

$$u(x, y) = \frac{\exp(-ikR)}{-i\lambda R} \times \exp[-ik(x^2 + y^2)/2R] \times \iint u_0(x_0, y_0) \exp\left[i2\pi\left(\frac{x_0x}{\lambda R} + \frac{y_0y}{\lambda R}\right)\right] dx_0 dy_0 \quad (4)$$

而
$$P_0(v_x, v_y) = \iint u_0(x_0, y_0) \times \exp[i2\pi(v_x x_0 + v_y y_0)] dx_0 dy_0 \quad (5)$$

比较 (9) 式、(10) 式得: $v_x = x/\lambda R$, $v_y = y/\lambda R$ 。

$$u(x, y) = \frac{\exp(-ikR)}{-i\lambda R} \times \exp[-ik(x^2 + y^2)/2R] P_0(v_x, v_y) \quad (6)$$

所以, 夫琅和费衍射可以直接用函数 $u_0(x_0, y_0)$ 的傅里叶变换乘上相位因子 $\frac{\exp(-ikR)}{-i\lambda R} \exp[-ik(x^2 + y^2)/2R]$ 。

1.2 计算模型

本文中采用的是虚共焦非稳腔, 其计算模型如图 2 所示。其中 Oz 为光轴方向, y 轴垂直纸面向外。假

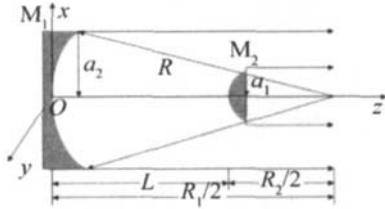


Fig 2 Geometry model of a virtual confocal unstable resonator

设增益介质沿 x 方向流动, 而在 y, z 方向增益分布均匀。由于一般气体增益系数 g 较小, 可把整个腔内的增益介质视为一个紧贴在腔镜 M_2 表面的增益薄片。若 $u(x, y)$, $u'(x, y)$ 分别是光场通过增益介质前后的振幅分布, 那么 $u'(x, y) = u(x, y) \exp[g(x)L/2]$, 式中, $g(x) = \frac{g_0(x)}{1 + I(x)/I_{\text{sat}}}$, $g_0(x)$ 是考虑介质流动后的非均匀小信号增益系数, $I(x)$ 是坐标点 x 处的光强, I_{sat} 表示饱和光强, 为一常数, 具体数值可参见文献 [4]。

2 计算结果与分析

用下列数值: $N_{\text{eq}} = 1.5$, $m = 3$, $L = 500\text{cm}$, $\lambda = 10.6\mu\text{m}$, 首先对未考虑热变形情况下的加载腔进行计算。

2.1 加载腔结果及分析

图 3 是加载后未考虑腔镜热变形算得的分布图。由图 3a 可以看出, 加载后由于饱和增益效应, 中心主峰被抑制, 外围光强变大, 同时光强沿 x 轴方向倾斜减

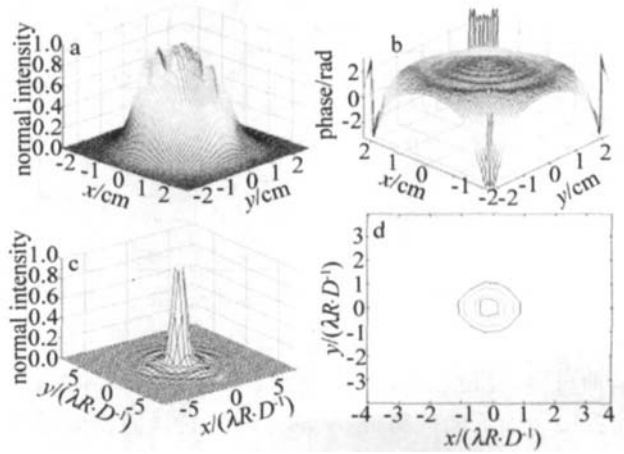


Fig 3 Loaded unstable resonator

a—near field normalized intensity b—near field phase c—far field intensity distribution d—iso-intensity contours

弱, 这是由增益介质流动所产生的非均匀增益造成的, 此时近场相位分布仍较均匀。可见增益介质的存在使得光束在加载腔中展宽, 且使光强在腔内的分布发生小角度倾斜的同时更趋近几何光学结果, 与文献 [5] 中实验结果一致。从图 3c~图 3d 可见, 加载后因近场模式的变化致使远场分布略微偏离理想分布。

2.2 腔镜倾斜和中心形变情况下的计算结果及分析

腔镜失调和增益分布不均匀所导致的模场非轴对称畸变, 将引起腔镜的热变形。光学元件的热变形可以分为两部分: 腔镜倾斜和中心对称形变 [6]。

当考虑腔镜倾斜时, 腔内激光束偏离腔主轴方向振荡, 中央基模的振荡能量被轴外模部分或更多的取代 [7]。腔镜倾斜角是 β 时, 引起的附加距离为 $(x - x_0) \sin\beta$ (规定顺时针倾斜时 β 取负值, 反之取正值), x_0 为后镜中心坐标, 则计算中倾斜效应可等价于在后镜振幅上乘上因子 $\exp[k(x - x_0) \sin\beta]$, 然后按前述迭代思想进行求解。

为简单起见, 对空腔情况下腔镜绕后镜 M_1 中心

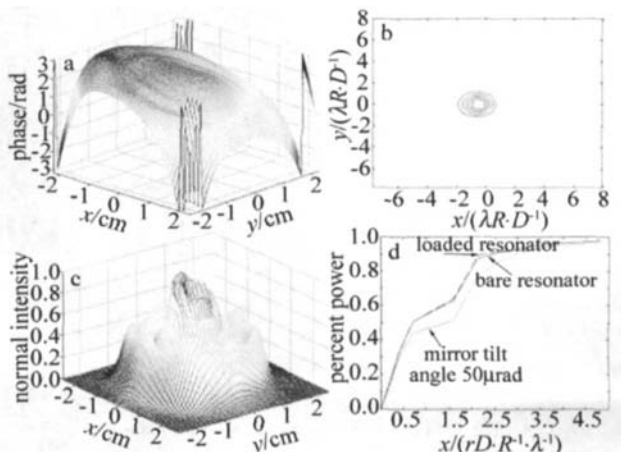


Fig 4 Unstable resonator with 50 μ rad tilt of the mirror

a—near field phase b—iso-intensity contours c—near field intensity of loaded resonator d—integrated percent power within a far field radius r

Table 1 The result of normalized near field intensity for the bare resonator and the tilt of mirror

x/cm	-2.23	-1.44	-0.72	0	0.28	0.72	1.44	2.23	$\beta/\mu\text{rad}$
I_1	0.004	0.246	0.483	1	0.906	0.475	0.290	0.004	0
I_2	0.002	0.110	0.261	0.851	1	0.694	0.520	0.015	50
y/cm	-2.23	-1.44	-0.72	0	0.28	0.72	1.44	2.23	$\beta/\mu\text{rad}$
I_1	0.004	0.246	0.483	1	0.906	0.475	0.290	0.004	0
I_2	0.004	0.216	0.405	0.850	0.780	0.401	0.252	0.005	50

逆时针倾斜 $50\mu\text{rad}$ 时的场分布进行计算, 结果如图 4 及表 1 所示。由表 1 可以看出: 空腔情况下光场分布呈轴对称, 腔镜在 $x-z$ 平面逆时针旋转 $50\mu\text{rad}$ 时, 近场光强沿 x 轴负向倾斜, 沿 y 轴方向的光强仍近似对称, 远场偏移可由等高线明显看出。而偏移角 $\beta = 13\mu\text{rad}$ 时, 计算表明非均匀增益及腔镜倾斜造成的光束偏移效应基本抵消, 近场光强分布较为均匀, 如图 4c 所示。通过附加的计算发现, 当 $\beta < 0$ 时, 由于非均匀增益及倾斜的共同影响, 远场光束偏移较同 β 值逆向倾斜的结果大, 但总体上说远场光束中心偏移角 (即两镜曲率中心连线的光轴偏移角) 与腔镜倾斜角 β 之间呈线性变化, 这与文献 [8] 中实验结果一致。在图 4d 中比较了空腔、加载、腔镜倾斜 3 种情况下的 PB 曲线。可见, 腔镜倾斜使得光束质量有所下降, 但是可用适当的倾斜改善近场光束的均匀度。表 1 中, I_1 、 I_2 分别是空腔和腔镜倾斜情况下的近场归一化光强。

在 高能 激 光 器 中, 尽 管 腔 镜 采 用 单 晶 硅 等 导 热 性 好 的 材 料, 而 且 反 射 率 也 越 来 越 高, 但 热 变 形 始 终 存 在。由于反射镜曲率半径很大, 可作为平面镜进行有限元分析。基于文献 [2] 中的分析可以得出镜面热变形分布, 热变形与温度分布一致, 呈中心对称。用快速傅里叶变换对存在前镜表面中心热变形的加载腔模场分布进行了计算, 其中腔镜中心最大形变量是 $\lambda/4$ 边缘是 Q 见图 5 给出了近场归一化光强、相位和远场

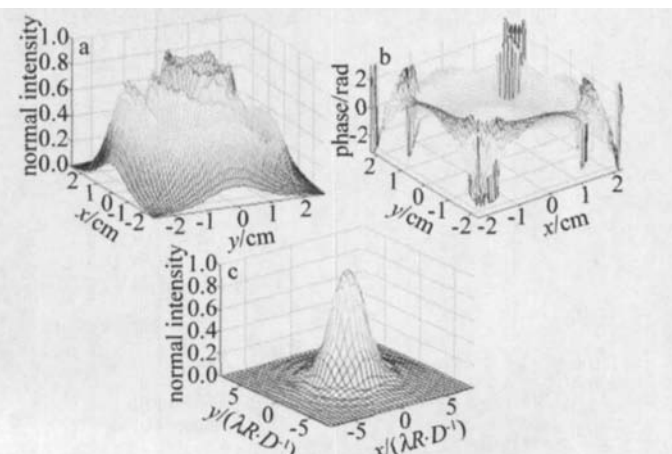


Fig 5 Loaded resonator with a centre bulge

a—near field intensity b—near field phase c—far field intensity

光强分布。与图 3a 图 3b 比较可以看出: 光强分布因镜面变形而展宽, 中心归一化强度变小, 反射镜本身不

再构成一个等相面, 中心的相位超前于边缘相位。与图 3c 比较可以得出: 腔镜受到强激光照射时, 吸收的热量影响到镜面形状, 输出激光束远场汇聚点位置发生改变, 使输出光束汇聚焦点向前移动, 可以推测此时的正支非稳腔已不再完全共焦, 远场光斑本身大小和强度分布发生变化, 激光束的发散角大大增加, 且中心形变量越大, 模式畸变越严重。

3 结 论

研究了横流激光器由于增益介质的流动造成光强分布不均, 而使腔镜发生热变形对激光模式的影响。得出腔镜的热变形是导致远场分布畸变的主要因素, 使其分布发生偏移, 并且发散角变大偏离了理想分布。同时通过图 3 及图 4 中相位分布与远场分布验证了: 远场分布主要受光场相位的影响, 当近场光场相位均匀时, 无论近场光场分布是否均匀, 远场光场的空间分布都不受太大影响。在一定条件下, 适当调节腔镜倾斜角度可均匀近场光强分布。利用相变材料的相变吸热过程也可以冷却腔镜, 减小形变量, 从而提高输出光束质量。

参 考 文 献

- [1] PENG Y F, CHENG Z H, ZHANG Y N *et al*. Thermal distortion in a super thin multilayer metal mirror with silicon substrate subjected to irradiation of high power lasers [J]. Chinese Journal of Laser 2002, A29(1): 21~24 (in Chinese).
- [2] PENG Y F, CHENG Z H. Finite element analyses of thermal distortions of mirror substrates for high power lasers [J]. High Power Laser and Particle Beams 2005, 17(1): 5~8 (in Chinese).
- [3] LÜ B D, FENG G Y, CAI B W. Mode calculation of resonators for slab lasers—fast Fourier transform method [J]. Laser Technology, 1993, 17(6): 335~339 (in Chinese).
- [4] SZKLA S E A, SIEGMAN A E. Mode calculation in unstable resonators with flowing saturable gain 2: fast Fourier transform method [J]. Appl Opt 1975, 14(8): 1874~1889.
- [5] ARMAND LLO E, KAYE A S. Modelling of transverse flow CW CO₂ laser theory and experiment [J]. J Phys 1980, D13(1): 321~338.
- [6] YU D L, SANG F T, JIN Y Q. Output drift and deformation in high-power CO₂ [J]. Opt & Laser Technol 2003, 35(4): 245~249.
- [7] YU D L, SANG F T, JIN Y Q *et al*. Study of drift and deformation for CO₂ output beam spot [J]. High Power Laser and Particle Beams 2001, 13(2): 151~154 (in Chinese).
- [8] HU Y H, DENG N M, HE J H. A mean on laser resonator auto-stability adjustment [J]. Acta Photonica Sinica 2001, 30(7): 871~874 (in Chinese).