

文章编号: 1001-3806(2005)03-0308-03

虚共焦非稳腔腔镜倾斜对光束影响的三维重构

彭玉峰, 吕珍龙, 张虎, 魏要丽

(河南师范大学 物理与信息工程学院, 新乡 453007)

摘要: 为了直观再现腔镜倾斜对光束分布的影响, 用 Fox-Li 数值迭代法及图像重构法, 绘得方形镜虚共焦腔在不同倾角下近场及远场光强的三维分布图, 并对倾斜后光束特点进行了讨论。结果表明, 腔镜倾斜使光束近场分布变差, 致使远场光束发生畸变, 质量下降。

关键词: 虚共焦非稳腔; 腔镜倾斜; 菲涅耳衍射积分; Fox-Li 数值迭代

中图分类号: TN242 文献标识码: A

Three-dimension simulation of the effect of mirror misalignment on beam distributions

PENG Yufeng, LU Zhen-long, ZHANG Hu, WEI Yao- li

(College of Physics and Electronics Engineering Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract To display the effect of mirror misalignment on beam distributions more intuitively, Fox-Li iterative diffraction calculation method was used to solve the Fresnel integral equation and three dimension figures of effected beam were presented. The results indicate the beam in both near and far field will be aberrated and simultaneously the beam quality will be deteriorated when misalignment appears.

Key words positive confocal resonator, mirror misalignment, Fresnel integral equation, Fox-Li iterative method

引言

在诸如激光空间通信、激光加工等激光应用领域, 要求激光束在远程传输后仍能将能量聚焦于目标上, 这就对激光光场近、远场分布提出了很高的要求, 而激光谐振腔腔镜倾斜对激光光束性质影响很大, 是实际应用中必须考虑的重要因素之一。已有一些作者对此进行了研究, 如 ENDO 等^[1]发现带有稳定核的非稳腔输出功率对腔镜失调很敏感, 并提出了改进办法; 吕百达等^[2]用矩阵光学法分析了失调非稳腔输出光束通过光学系统后的焦移; 蒋金波等^[3]讨论了腔镜失调使输出光束成为部分相干光; 同时也有人提出用棱镜腔、实时监控等方法来减小不同腔型腔镜失调对光场的影响^[4,5]。

本文中主要对激光加工中常用的正支虚共焦非稳腔进行探讨, 采用 Fox-Li 迭代法对选取的激光器参数进行数值计算, 并用图像重构法, 绘出了不同倾角下菲涅耳数 $N_0 = 5$ 放大率 $m = 5$ 时该非稳腔近场(与前镜凸面相切的平面)及远场光强分布的三维图, 直观地

再现出现腔镜倾斜时的光场分布, 并对倾斜后光束特点进行了讨论, 为激光器调节提供参考。

1 理论基础

图 1 为本文中所采用的计算模型: 其中, r, R 分别为前镜和后镜的曲率半径(凹镜取正, 凸镜取负), b, a 分别为前镜和后镜的半宽, L 为腔长, 外菲涅耳数 $N_0 = a^2/\lambda L$, 放大率 $m = a/b$ 。当前镜倾角为 β_1 时, 由分析知此时可等价为后镜倾斜角为: $\beta_2 = \beta_1/m$, 为了方便, 本文中只限于讨论后镜沿 x 轴方向倾斜。图中 d 为近场到远场的距离, c 为远场半宽。

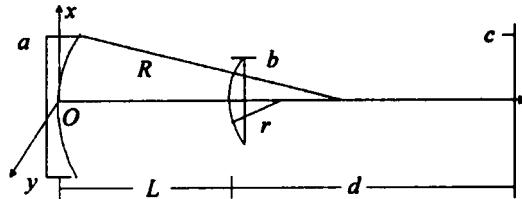


Fig 1 Schematics of used positive confocal unstable resonator. By the Fresnel diffraction integral formula, we can get^[6]:
$$U(x_2, y_2) = \gamma \int_{-\infty}^b \int_{-\infty}^b U(x_1, y_1) K(x_2, y_2; x_1, y_1) dx_1 dy_1 \quad (1)$$

式中, 因子 $\exp(-ikL)$ 已并入单程耗损 γ 中。

腔镜未倾斜时:

$$K(x_2, y_2; x_1, y_1) = -\frac{i}{\lambda L} \exp\left(\frac{ik}{2L}\right) g_2(x_2 + y_2) +$$

作者简介: 彭玉峰(1963-), 男, 教授, 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。

E-mail yufengp@sina.com

收稿日期: 2004-04-16 收到修改稿日期: 2004-07-16

$$g_1(x_1 + y_1) - 2(x_2 x_1 + y_2 y_1)\} \quad (2)$$

当后镜倾斜 β 时, 引起的附加距离为 $x_2 \sin \beta$ 为(规定顺时针倾斜时 β 取负, 逆时针倾斜时取正值), 则:

$$K(x_2, y_2; x_1, y_1) = -\frac{i}{\lambda L} \exp\left(\frac{k}{2L}[g_2(x_2 + y_2) + g_1(x_1 + y_1) - 2(x_2 x_1 + y_2 y_1) + x_2 \sin \beta]\right) \quad (3)$$

式中, $g_1 = 1 - L/r$; $g_2 = 1 - L/R$; $U(x_1, y_1)$, $U(x_2, y_2)$ 分别是前镜和后镜上一点的振幅, $k = 2\pi/\lambda$ 即波数。

(1) 式可采用分离变量法求解, 设 $U(x_2, y_2) = F(x_2)G(y_2)$; $V = V_x V_y$, 则经计算可得:

$$F(x_2) = V_x \sqrt{\frac{i}{\lambda L}} \int_{-\infty}^b F(x_1) \times \exp\left[\frac{k}{2L}(g_2 x_2 + g_1 x_1 - 2x_2 x_1 + x_2 \sin \beta)\right] \quad (4)$$

$$G(y_2) = V_y \sqrt{\frac{i}{\lambda L}} \int_{-\infty}^b G(y_1) \times \exp\left[\frac{k}{2L}(g_2 y_2 + g_1 y_1 - 2y_2 y_1)\right] \quad (5)$$

当光束由后镜传播至前镜及由近场传播至远场时所用公式与此类似, 不再列出。在计算远场时, 近场用一个内边长为 $2a$ 的方孔形光阑滤去边波并且远场满足夫琅和费条件, 即: $d \gg \pi a^2/\lambda$ 。而远场光强积分角分布定义为: $I(x_m, d) = \int_0^{|\alpha_m|} |F(x)|^2 dx$, 其中 $|x_m|$ 为远场沿 x 轴某一确定点 x_m 的坐标绝对值。

2 计算结果

2.1 所选参数下算得的倾斜时沿 x 轴光束特性图

首先对积分公式(4)式编程, 为计算方便而又不失一般性, 以 $N_0 = 5$, $m = 5$ 为基础, 理论上设计了一个激光器进行计算, 并绘出腔镜沿 x 轴倾斜时远场光束沿 x 轴的特性图(本文中近场横坐标以后镜半宽 a 为单位, 远场横坐标以衍射极限角 $\lambda/2a$ 为单位), 所选具体参数如下: $a = 1.0296\text{cm}$, $b = 0.2095\text{cm}$, $L = 200\text{cm}$, $R = 500\text{cm}$, $r = 100\text{cm}$ 。

图 2 为在 $\beta = 0, 80\mu\text{rad}, 200\mu\text{rad}$ 时远场积分光强

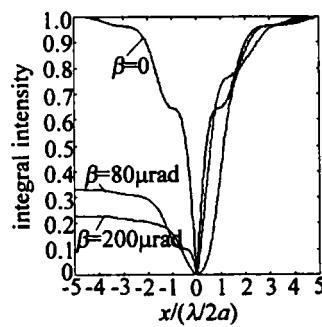


Fig. 2 Integral intensity distribution in far field

(能量角分布), 由此可知, 随着腔镜倾斜角变大, 能量角分布变化很大, 并且此时远场光强峰值随之很快下

降^[7], 故远场光束质量下降; 图 3 为远场光强中心偏移角随腔镜倾斜角变化的拟合曲线。可以看出, 它们之间呈现出线性变化关系, 变化规律与文献[5]中的实验结果一致。

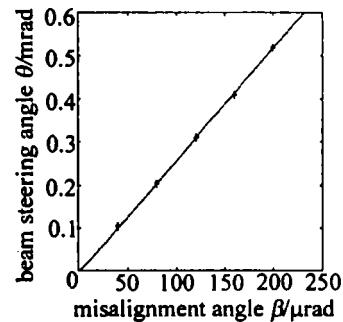


Fig. 3 Beam steering angle vs misalignment angle

2.2 沿 x 轴倾斜时光场的三维重构图

(1) 图 4 图 5 为采用上述参数, 在未倾斜情况下进行数值计算后, 用重构方法所作的近远场光束分布图。图 4 为未倾斜情况下近场归一化光强分布, 图 5 为此时远场归一化光强分布。

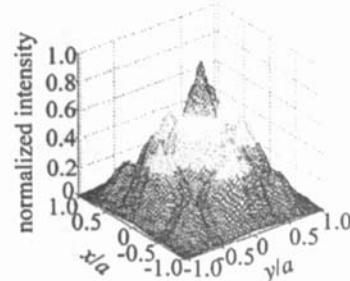


Fig. 4 Intensity distribution in near field for $\beta = 0$

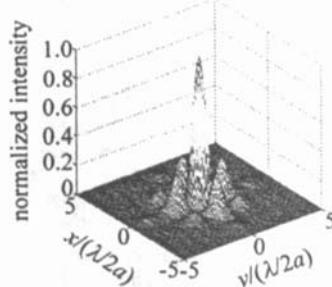
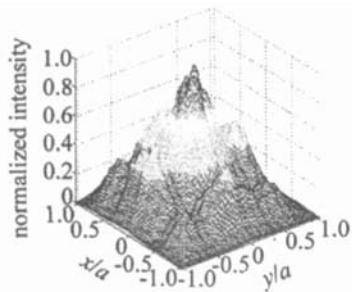
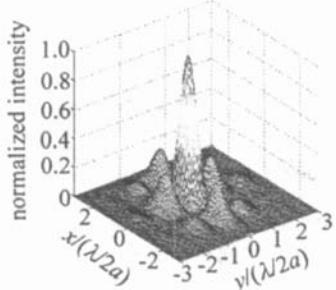
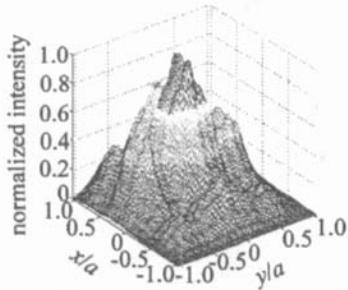
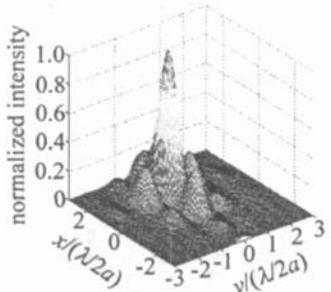


Fig. 5 Intensity distribution in far field for $\beta = 0$

可见, 未倾斜时近场及远场光强分布只具有 $90^\circ, 180^\circ$ 旋转对称性及中心对称性, 与圆镜的旋转对称性不同, 这与方镜这一构形有关。这时远场光强分布表现出除 x, y 轴方向有弱的次峰外, 在两条对角线上也有更弱的次峰出现, 这与平行光通过矩形孔的衍射相一致, 参见文献[8]。

(2) 分别对倾斜角 $\beta = 80\mu\text{rad}, 200\mu\text{rad}$ 进行计算重构后, 作出的三维图如图 6~图 9 所示。

图 6 图 8 分别为倾斜角 $\beta = 80\mu\text{rad}, 200\mu\text{rad}$ 时近场光强分布, 由图可见, 当镜沿 x 轴倾斜角变大时, 近场光强强度中心向 x 轴正向偏移, 次峰越来越不对称, x 正半轴的次峰强度逐渐变大, 负半轴次峰逐渐减小,

Fig. 6 Intensity distribution in near field for $\beta = 80\mu\text{rad}$ Fig. 7 Intensity distribution in far field for $\beta = 80\mu\text{rad}$ Fig. 8 Intensity distribution in near field for $\beta = 200\mu\text{rad}$ Fig. 9 Intensity distribution in far field for $\beta = 200\mu\text{rad}$

极大值处也出现分裂趋势;由 $\beta = 80\mu\text{rad}$ $200\mu\text{rad}$ 时

的远场光强分布图(图9)知,远场光强也逐渐向 x 轴正半轴偏移,其轴心偏移量分别为 $\theta = 0.204\text{m rad}$, 0.519m rad 。同时光束发生畸变并逐渐与旁瓣相连,如前述讨论可知,此时光束质量下降,但由于 y 轴未发生倾斜,所以仍具有对称性。可以预见,当腔镜不沿特定方向倾斜时,光强分布将失去对称性,但远场光束倾斜方向与镜的倾斜方向仍将一致,这为对激光器进行准直、从而获得较理想的远场光束提供了操作依据。

3 结 论

用 Fox-Li迭代法对方镜虚共焦非稳腔进行了数值计算,重构出未倾斜时及倾角 $\beta = 80\mu\text{rad}$, $200\mu\text{rad}$ 时近场及远场光强分布图,使得腔镜倾斜对光束影响效果变得更加直观。结果表明,腔镜倾斜将导致光束偏离理想光轴且光束畸变,光束质量下降,从而限制了激光器的实际应用。另外,激光腔镜热变形、激活介质增益分布不均匀等,也是导致光束质量下降的一个重要原因,研究工作将另文发表。

参 考 文 献

- [1] ENDO M, KAWAKAMI M, NARIK I et al. Two dimensional simulation of an unstable resonator with a stable core [J]. Appl Opt 1999, 38 (15): 3298~ 3307.
- [2] 吕百达, 马虹, 罗时荣. 光学系统的失调对激光束发射性能的影响 [J]. 激光技术, 1999, 23(6): 356~ 359.
- [3] 蒋金波, 程兆谷, 李现勤 et al. 激光模式的远场特性和空间相干度的影响 [J]. 中国激光, 2001, A28(3): 220~ 224.
- [4] 程勇, 王晓兵, 孙斌 et al. 定向棱镜谐振腔的特性研究 [J]. 中国激光, 2000, A27(6): 537~ 541.
- [5] 胡亚红, 邓年茂, 何俊华 et al. 激光谐振腔自动稳定调节的一种方法 [J]. 光子学报, 2001, 30(7): 871~ 874.
- [6] 周炳琨, 高以智, 陈倜嵘 et al. 激光原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1984. 54.
- [7] 杜燕贻. 无源虚共焦腔光束特性模拟 [J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(2): 164~ 168.
- [8] 赵达尊, 张怀玉 et al. 波动光学 [M]. 北京: 宇航出版社, 1988. 119~ 120.

(上接第 294 页)

- [34] YANAGISAWA T, ASAKA K, HAMAZU K et al. 11mJ 15Hz single-frequency diode pumped Q-switched Er-Yb: phosphate glass laser [J]. Opt Lett 2001, 26(16): 1262~ 1264.
- [35] BOUTCHENKOW V, KUCHMA I, LEVOSHKA N et al. High efficiency diode pumped Q-switched Yb:Er:glass laser [J]. Opt Commun 2002, 177: 383~ 388.

- [36] LEVOSHKA N, PETROW A, MONTAGNE J E. High efficiency diode pumped Q-switched Yb:Er:glass laser [J]. Opt Commun 2000, 185: 399~ 405.