

离轴非稳腔导引光多光束干涉与远场图样研究

李卿^{1,2*}, 刘现魁^{1,2}, 任晓明^{1,2}, 郭俊杰^{1,2}, 李洪春^{1,2}, 刘常春^{1,2}, 郭建增^{1,2}¹中国船舶集团有限公司第七一八研究所, 河北 邯郸 056027;²河北省化学与气体激光重点实验室, 河北 邯郸 056027

摘要 研究光腔内导引光的往返振荡物理过程与传播特性有助于理解、判断光腔的准直失调状态。离轴非稳腔作为一种兼具高提取效率与高光束质量的混合非稳腔, 调控导引光在离轴非稳腔中的振荡物理过程研究鲜有报道。通过理论计算与实验研究了导引光在离轴非稳腔内的多光束干涉过程及其远场传播特征, 在实验中搭建了离轴非稳腔(X 方向为平凹稳定腔, Y 方向为共焦非稳腔)导引光研究装置, 通过凹球面镜小孔注入波长为 632.8 nm 的基模高斯光束, 开展了光腔准直与导引光远场图样研究, 实验结果与计算结果吻合较好。计算与实验结果表明: 离轴非稳腔的干涉图样与传统共焦非稳腔/稳定腔不同, 调控导引光在腔镜小孔注入处出现椭圆“水滴”状干涉图样, 该图样亮度较高, 可以用于判断光腔的准直状态。输出导引光的远场光斑在 Y 方向上是不同振荡阶次的亮核光斑, 其中高阶亮核光斑可用于指示红外激光的远场光斑位置。

关键词 激光光学; 离轴非稳腔; 多光束干涉; 调控方法; 远场光斑

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL231212

1 引言

离轴非稳腔是一种兼具高提取效率与高光束质量的混合非稳腔^[1-5], 一般在某个方向(比如 X 方向)上为稳定腔, 在另外一个正交方向(比如 Y 方向)上为非稳腔。 Z 轴方向是光束传播方向, X 与 Y 就是另外两个正交方向, 在这里 X 与 Y 与无特定指向, 彼此也可以替换。当非稳腔放大率为 M 时, 输出耦合率为 $1-1/M$, 相较于传统共焦非稳腔拥有更低的输出耦合率。在调控过程中, 通常是将一束位于可见光波段、具有较长相干长度的基模高斯光束作为调控导引光注入到光腔内, 光束发生往返振荡, 从而实现光腔准直调节。光腔准直或者腔失调的评价准则理论模型主要是基于模式耦合理论与多光束叠加理论^[6-7]。在多光束叠加理论中, 通过腔镜上形成的多光束干涉圆环或者输出耦合镜(如刮刀镜)输出的干涉条纹, 可以判断光腔准直状态或者失调状态。基于电荷耦合器件(CCD)记录与算法识别分析干涉条纹形态的方法已被用于自动化实现正支/负支共焦非稳腔的准直调节与失调分析^[8-9]。此外, 基于调控导引光在光腔内的往返振荡物理过程, 利用光腔衰荡法, 通过方波调制器对调控导引光进行脉冲调制, 可以测量腔镜的反射率或者透过率, 调控导引光的注入过程及其模式与腔模的匹配程度是影响反射率测定精确度的关键因素^[10-12]。

目前, 调控导引光在离轴非稳腔内的振荡物理过程

鲜有报道。导引光在离轴非稳腔内的多光束干涉过程和远场光斑分布与传统的正支/负支共焦非稳腔或稳定腔均有不同。在离轴非稳腔调控过程中, 调控导引光的离轴输出伴随着光束半径的迅速增大和腔内多次反射导致的能量损耗, 输出调控光的亮度大幅降低, 这不利于判断光腔的准直状态, 因此需要借助腔镜上尤其是小孔注入处的导引光干涉图样来实现光腔的准直调节。

本文对导引光在离轴非稳腔内的往返振荡过程进行了仿真计算与实验研究, 对于 X 方向为平凹稳定腔的离轴非稳腔, 腔镜上小孔注入处会出现椭圆“水滴”状的多光束干涉环, 该干涉图样的亮度较高, 可以用于判断离轴非稳腔的准直状态。在焦面处 Y 方向上, 调控导引光的远场光斑是不同振荡阶次的亮核光斑, 阶次较高的亮核光斑位置可以指示输出红外激光的远场光斑位置。同时, 搭建 Z 型折叠离轴非稳腔(X 方向为平凹稳定腔, Y 方向为正支共焦非稳腔)调控导引光研究装置, 通过凹球面镜小孔注入波长为 632.8 nm 的基模高斯光束, 实现光腔准直与远场光斑测试, 实验结果与计算结果吻合较好。

2 实验与仿真的基本原理

2.1 离轴混合非稳腔的调控导引光路

离轴非稳腔的调控导引光路示意图如图 1 所示, 由四个腔镜组成, 所有腔镜的基底材料都为单晶硅, 且镀有高反射率介质膜, 其在红外波段的反射率大于

收稿日期: 2023-09-15; 修回日期: 2023-11-13; 录用日期: 2023-12-11; 网络首发日期: 2023-12-22

通信作者: *moyi6969@163.com

99.9%，在 632.8 nm 附近的反射率大于 90.0%。所述 Z 型折叠离轴非稳腔在 Y 方向上是共焦非稳腔，可以实现大口径的基横模，有利于 Y 方向上高光束质量的激光输出；在 X 方向上是平凹稳定腔，有助于增益能量的高效提取以及输出耦合率的降低。该装置在前期已经成功实现中红外氟化氘 (DF) 连续激光的输出^[13]。图 1 中 Y 方向上的凸柱面镜 1 (X 方向上为平面，Y 方向上为凸面) 与凹球面镜 4 (X 与 Y 方向上均为凹面) 分别组成 X 方向上的平凹稳定腔和 Y 方向上的正支共焦非稳腔，X 方向上的 Z 型折叠可以通过转折平面镜 2 和转折平面镜 3 来实现，如图 1(a)、(b) 所示。凹球面镜 4

的曲率半径为 16 m，其在 Y 方向上的高度尺寸 (H) 为 80.00 mm，凸柱面镜 1 的曲率半径为 14 m，Z 型折叠后腔长为 2 m，其中非稳定腔方向的放大率即 M 值为 1.14，凸柱面镜 1 在 Y 方向上的高度尺寸为 70.17 mm，四个腔镜在 X 方向上的尺寸也限定为 9.00 mm。通过凹球面镜 4 的底部小孔 (注入位置为距离凹球面镜 4 底部 5.00 mm 处)，将调控导引光 632.8 nm 氦氖激光注入到光腔内部，激光来回振荡并通过凸柱面镜 1 沿 Y 方向离轴输出。如图 1(b) 所示，输出调控导引光通过焦距为 300.00 mm 的凸透镜被聚焦至 CCD 靶面上，以观察其远场特征。

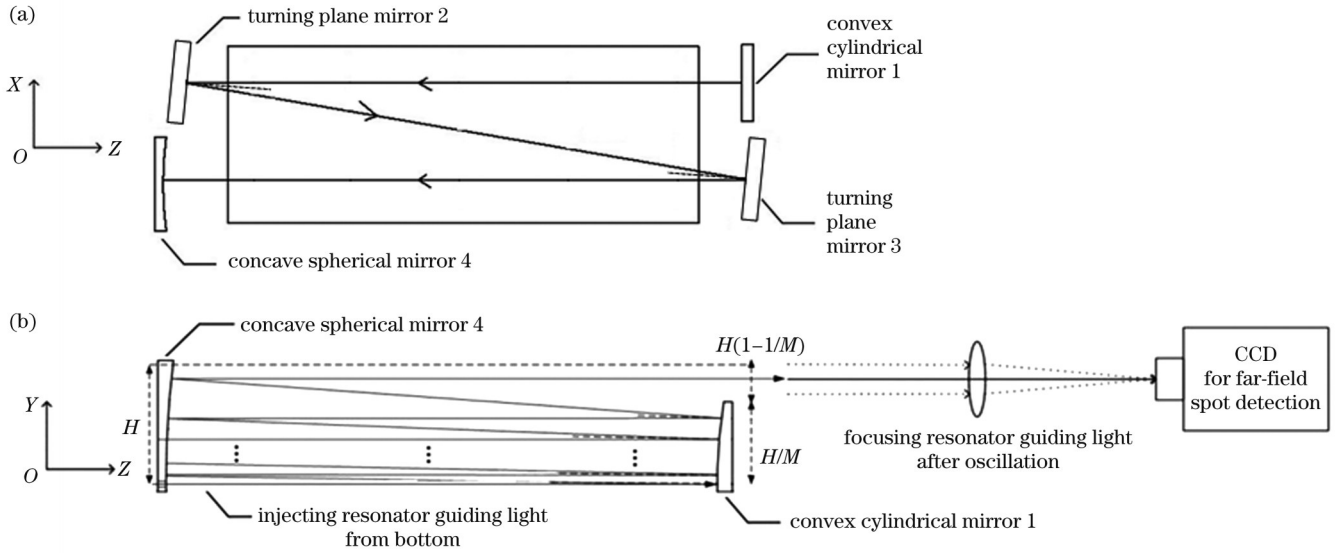


图 1 Z 型折叠离轴非稳腔导引光的光路示意图。(a) X 方向；(b) Y 方向

Fig. 1 Optical path diagrams of guiding light in Z-folded off-axis unstable resonator. (a) X direction; (b) Y direction

2.2 光腔仿真计算方法

本文基于平面波角谱的衍射理论^[6,13-14]，利用快速傅里叶变换对调控导引光在 Z 型折叠离轴混合非稳腔内的振荡过程进行计算：

$$U_1(X, Y, 0) = U_0(X, Y, 0) = \exp\left[\frac{-(X^2 + Y^2)}{\omega^2}\right], \quad (1)$$

$$A(u, v, 0) =$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} U_1(X, Y, 0) \cdot \exp[-i2\pi(uX + vY)] dXdY, \quad (2)$$

$$A(u, v, L) = A(u, v, 0) \cdot \exp\left[ikL\sqrt{1 - (\lambda u)^2 - (\lambda v)^2}\right], \quad (3)$$

$$U_2(X, Y, L) =$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} A(u, v, L) \cdot \exp[i2\pi(uX + vY)] dudv, \quad (4)$$

$$U_3(X, Y, L) = U_2(X, Y, L) \cdot r_1 \cdot \exp\left(ik\frac{Y^2}{2f_1}\right), \quad (5)$$

$$A(u, v, L) =$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} U_3(X, Y, L) \cdot \exp[-i2\pi(uX + vY)] dXdY, \quad (6)$$

$$A(u, v, 2L) = A(u, v, L) \cdot \exp\left[ikL\sqrt{1 - (\lambda u)^2 - (\lambda v)^2}\right], \quad (7)$$

$$U_4(X, Y, 2L) =$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} A(u, v, 2L) \cdot \exp[i2\pi(uX + vY)] dudv, \quad (8)$$

$$U_5(X, Y, 2L) = U_4(X, Y, 2L) \cdot r_2 \cdot \exp\left(-ik\frac{X^2 + Y^2}{2f_2}\right), \quad (9)$$

$$U_1(X, Y, 0) = U_5(X, Y, 2L) + U_0(X, Y, 0), \quad (10)$$

式中： ω 为导引光的束腰半径； u, v 为激光光束的空间频率坐标； $U(\cdot)$ 为光场复振幅； $A(\cdot)$ 为对应光场复振幅的频谱； i 为虚数因子； L 为腔长； k 为波矢的大小， $k = 2\pi/\lambda$ ； λ 为激光光束的中心波长； r_1, r_2 分别为凸柱面镜 1 与凹面球镜 4 的反射率； f_1 为凸柱面镜 1 的焦距； f_2 为凹球面镜 4 的焦距。在计算中，光腔内振荡的入射光束是基模高斯光束，其中心波长设置为 632.8 nm，采样数目为 16384×16384 ，入瞳尺寸为 140 mm，空间域分辨率为 $8.5 \mu\text{m}$ ，频率域分辨率为 0.07 cm^{-1} ，腔镜参数、腔长均与实验所用参数保持一致。光场振荡的计算流程图如图 2 所示。入射光束

$U_1(X, Y, 0)$ 为基模高斯光束, 利用基于角谱衍射理论的式(2)~(4)计算得到光束经腔长 L 后的复振幅光场 $U_2(X, Y, L)$ 。该光束到达 Y 方向上的凸柱面镜 1 后, 一部分光经过相位变换[式(5)]返回到腔内继续循环振荡, 另外一部分光直接输出, 凸柱面镜 1 上的反射率分布由 r_1 决定。凸柱面镜 1 反射回来的导引光 $U_3(X, Y, L)$ 再次经腔长 L 后变为 $U_4(X, Y, 2L)$, 到达凹球面镜 4 后再次经过相位变换变为 $U_5(X, Y, 2L)$, 凹球面镜 4 上的反射率分布由 r_2 决定, 如式(9)所示。

经过凹球面镜 4 反射后 $U_5(X, Y, 2L)$ 与小孔注入的初始入射光束 $U_0(X, Y, 0)$ 相互叠加, 并在腔内来回振荡, 如式(10)所示, 振荡光每次经过凹球面镜 4 均会叠加初始入射光束 $U_0(X, Y, 0)$ 。在实际过程中, 腔镜在 632.8 nm 处的反射率约为 90%, 导引光振荡过程中的腔内输出损耗、反射损耗与注入导引光能量在有限的振荡次数内会达成平衡。

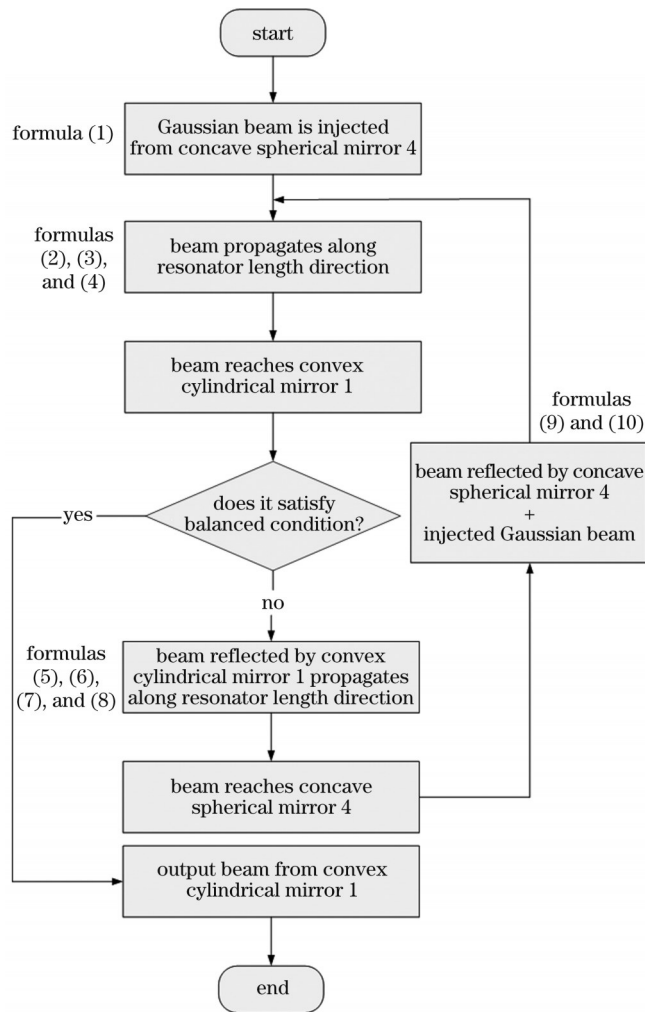


图 2 离轴非稳腔内光场振荡计算流程图

Fig. 2 Flow chart for calculating optical field oscillation in off-axis unstable resonator

3 分析与讨论

在离轴非稳腔中振荡的导引光在凹球面镜 4 上的近场光斑与导引光输出后的远场光斑的计算结果分别如图 3(a)、(b)所示。凹球面镜 4 在 Y 方向上的高度尺寸为 80 mm, 在底部以上 5 mm 处(即图 3 中的一 35 mm 处)注入基模高斯导引光。离轴非稳腔在 X 方向上为平凹稳定腔, 高斯光束在腔内振荡, 凹球面镜 4 相当于凸透镜, 在 X 方向上起到反复聚焦与发散的作用。离轴非稳腔在 Y 方向上为正支共焦非稳腔, 在高斯光束振荡过程中, Y 方向上的波面曲率半径不断变大, 光束在腔内每往返振荡一次, Y 方向上的束腰半径 ω 就增大 M 倍, 发散角(θ)变为原来的 $1/M$ 。因此高斯光束在多次振荡过程中趋于平面波, 最终到达凸柱面镜 1 的上方(即高度方向 70.17 mm 处)并输出。如图 3(a)所示, 凹球面镜 4 上小孔注入处的干涉图样呈现出椭圆“水滴”状, 不同于传统正/负支共焦非稳腔和稳定腔中经常出现的圆形干涉图样。导引光从离轴非稳腔输出后, 经过焦距为 300.00 mm 的聚焦透镜, 得到的远场光斑图样如图 3(b)所示。可以看出, 沿 Y 方向(高度方向)分布着不同阶次的光斑图样, 随着振荡次数(N)的增加, 腔内 N 阶次高斯光束在 Y 方向上的发散角变为原始的 $1/M^N$, 阶次越高, 光束越接近平面波。当光束为平面波时, 远场光斑对应的 (X, Y) 坐标即为 $(0, 0)$ 。最高阶次导引光的远场光斑可以用于指示红外激光的远场光斑位置, 需要注意的是, 由于腔内存在输出损耗与腔镜反射率损耗, 导引光在腔内的振荡次数与阶次受限, 计算与实验中最高阶次导引光的远场光斑位置只是逼近红外激光的远场光斑位置。

实验得到的腔内导引光在凹球面镜 4 上的近场干涉图样与输出导引光的远场光斑分别如图 4(a)、(b)所示。图 4(a)中的框图对小孔注入处的多光束干涉图样, 与计算结果一致, 呈现椭圆“水滴”状。小孔注入处的干涉图样亮度远高于离轴输出处的干涉图样亮度, 可以用于判断和校正光腔的准直状态。腔内导引光往返振荡后的输出光束通过聚焦透镜被注入到 CCD 中, 用于远场光斑检测。CCD 像素尺寸为 $5.86 \mu\text{m}$, 靶面尺寸为 $11.3 \text{ mm} \times 7.1 \text{ mm}$, 图 4(b)为输出导引光不同阶次的远场光斑图样。在实验结果中, 不同阶次的远场光斑在 Y 方向上均呈现强度调制特征, 与计算结果图 3(b)保持一致, 这主要是由光束衍射过程引起的^[15-16]。

远场光斑中不同阶次的亮核在 Y 方向上的质心位置如图 3(b)和图 4(b)所示。在 Y 方向上, 2 阶次亮核质心位置的计算与实验结果分别是 4.70 mm 与 4.78 mm, 3 阶次亮核质心位置的计算与实验结果分别是 3.30 mm 与 3.25 mm, 4 阶次亮核质心位置的计

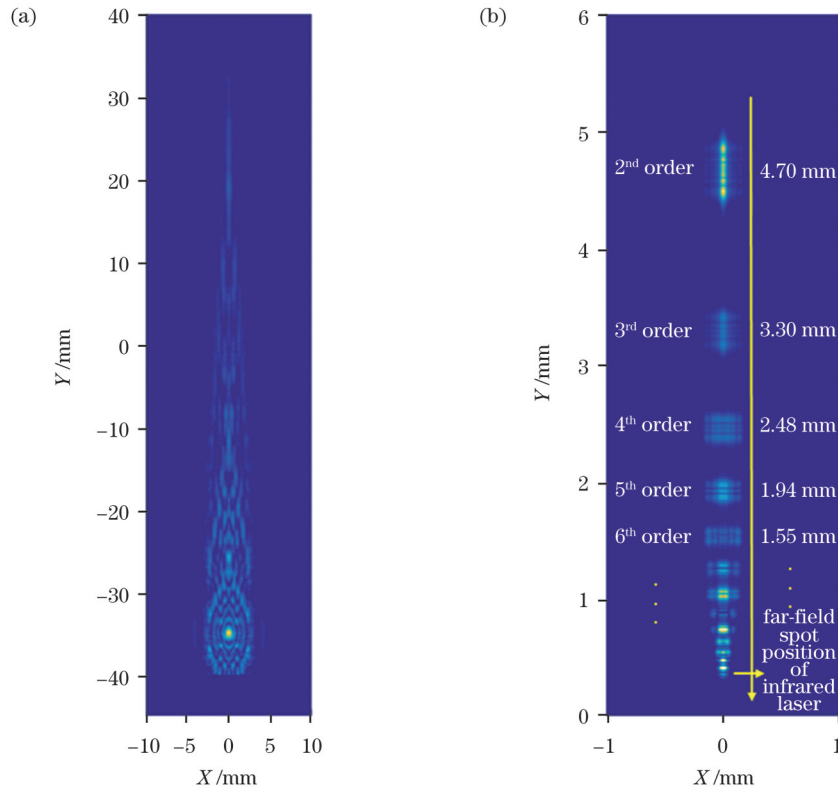


图 3 计算得到的离轴非稳腔导引光的干涉图样。(a)凹球面镜 4 上的导引光的近场干涉图样；(b)腔内输出的导引光的远场光斑
Fig. 3 Calculated interference patterns of guiding light in off-axis unstable resonator. (a) Near-field interference pattern of guiding light on concave spherical mirror 4; (b) far-field spots of guiding light output from resonator

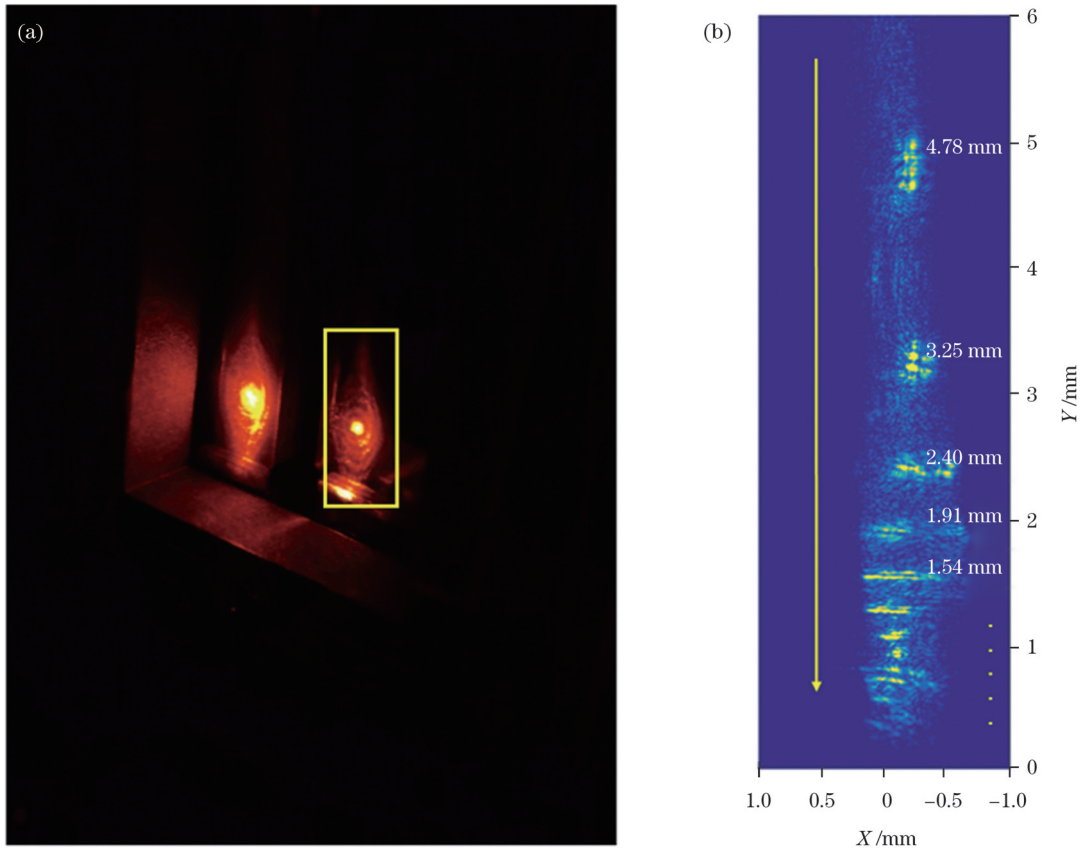


图 4 离轴非稳腔导引光的干涉图样实验结果。(a)凹球面镜 4 上的导引光的近场干涉图样；(b)腔内输出的导引光的远场光斑
Fig. 4 Experimental interference patterns of guiding light in off-axis unstable resonator. (a) Near-field interference pattern of guiding light on concave spherical mirror 4; (b) far-field spots of guiding light output from resonator

算与实验结果分别是 2.48 mm 与 2.40 mm, 5 阶次亮核质心位置的计算与实验结果分别是 1.94 mm 与 1.91 mm。上述数值计算结果与实验结果吻合较好。因为 1 阶次亮核质心位置超出目前计算与实验靶面, 所以在图中没有呈现。

对于 Y 方向上的正支共焦非稳腔, 随着高斯光束来回振荡次数(阶次)的增加, 高斯光束的束腰尺寸增大 M 倍, 高斯光束发散角变为原来的 $1/M$, 高斯光束的曲率半径增大 M^2 倍。若取该正支共焦非稳腔的公共焦平面作为参考面, 高斯光束振荡 N 次后在输出镜(即凸柱面镜 1)处的曲率半径(R_N)为 $M^{2N}f_2 - f_1$ ($f_2 = Mf_1$), 邻近阶次即 $N+1$ 阶与 N 阶的曲率半径的比值可简化为 $(M^{2N+3} - 1)/(M^{2N+1} - 1)$ 。考虑输出镜处 N 阶高斯光束的输出光斑高度为 H_N , 输出光束指向角为 θ_N , 则 $\theta_N \approx H_N/R_N$, 指向角 θ_N 与聚焦圆透镜的焦距(f)的乘积 $\theta_N f$ 即表征远场光斑 N 阶亮核的质心位置。此外, 随着阶次的增大, 高阶次光场之间的相互干涉与衍射过程会影响远场光斑中高阶次亮核质心位置的判断结果, 本文对此不作深入讨论。对比实验结果与数值计算结果可知, 调控导引光来回振荡圈数(阶数) N 的最大值约为 10。

如图 4(b) 所示, 随着阶次的增加, 输出导引光的远场光斑中心位置在 X 方向上不断偏移, 这主要是由于腔内凸柱面镜 1 在抛光制作过程中存在母线旋转问题^[17]。当凸柱面镜 1 绕母线旋转 4° 时, 对应的输出导引光的远场光斑图样的计算结果如图 5 所示。考虑凸柱面镜母线旋转对腔内振荡光场相位变换的影响, 计算过程中对应凸柱面镜的相位项被修正为 $\exp\left[ik(Y \cos \alpha + X \sin \alpha)^2 / (2f_1)\right]$, 其中 α 为母线旋转角度。

凸柱面镜 1 与凹球面镜 4 在 X 方向(稳定腔方向)与 Y 方向(非稳腔方向)上的倾斜失调对导引光

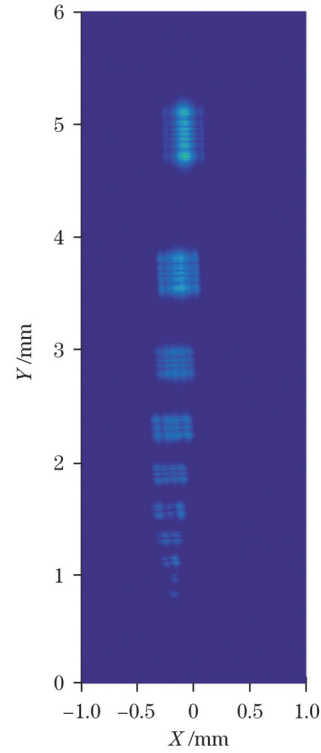


图 5 离轴非稳腔内凸柱面镜 1 绕母线旋转 4° 后对应的输出导引光的远场光斑图样

Fig. 5 Far-field spot pattern of corresponding output guiding light after convex cylindrical mirror 1 is rotated 4° around generatrix in off-axis unstable resonator

注入孔处的干涉图样的影响是相似的, 失调后的干涉条纹不仅会沿着 X 或 Y 方向平移, 还会出现亮度不均匀的情况^[9]。凸柱面镜 1 倾斜失调 0.01° 后, 导引光在小孔处的干涉条纹的计算结果如图 6(a)、(b) 所示, 注入孔处的干涉条纹分别产生了向左与向下的失调位移, 同时 X 方向(稳定腔方向)上的倾斜使得干涉条纹产生了左右亮度不均匀的情况。

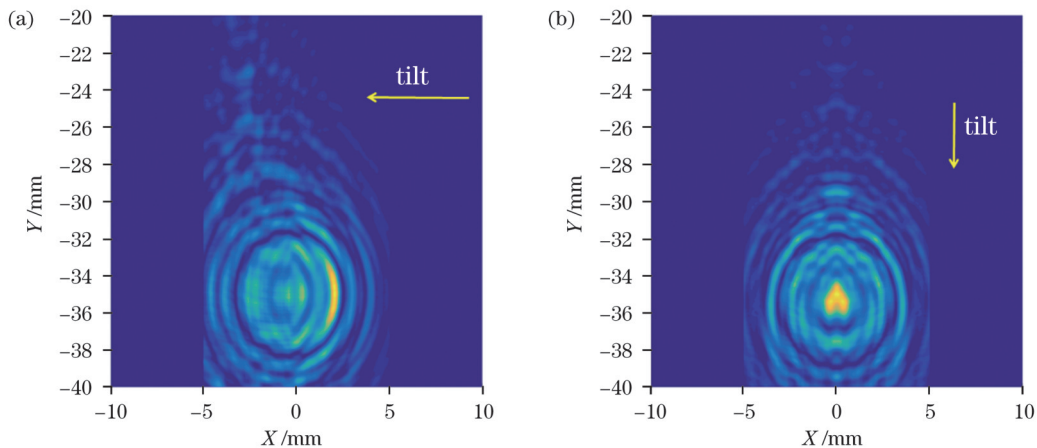


图 6 离轴非稳腔内导引光注入孔处的失调干涉图样。(a) 当凸柱面镜在 X 方向上倾斜 0.01° 时; (b) 当凸柱面镜在 Y 方向上倾斜 0.01° 时
Fig. 6 Misalignment interference patterns at guiding light injection hole in off-axis unstable resonator. (a) When convex cylindrical mirror is tilted 0.01° in X direction; (b) when convex cylindrical mirror is tilted 0.01° in Y direction

4 结 论

理论计算与实验研究了调腔导引光在离轴非稳腔内的多光束干涉过程与输出导引光的远场光斑图样,实验结果与仿真计算结果吻合较好。基模高斯可见导引光通过凹球面镜底部的小孔被注入到腔内,其中 X 方向为平凹稳定腔的离轴非稳腔,在小孔注入处会出现椭圆“水滴”状的干涉图样,该干涉图样亮度较强,可用于光腔的准直调节。输出导引光包含了不同振荡次数(阶次)的腔内振荡光束,随着振荡次数的增加,高斯光束在 Y 方向上快速趋近于平面波,其远场光斑在 Y 方向上为不同阶次的亮核光斑,阶次较高的亮核光斑位置可用于指示红外激光的远场光斑位置。研究结果为理解光腔内高斯光束的振荡物理过程以及判断离轴非稳腔的准直状态提供了参考。

参 考 文 献

- [1] Kuba K, Yamamoto T, Yagi S. Improvement of slab-laser beam divergence by using an off-axis unstable-stable resonator[J]. Optics Letters, 1990, 15(2): 121-123.
- [2] Handke J, Schall W O, Hall T, et al. Chemical oxygen-iodine laser power generation with an off-axis hybrid resonator[J]. Applied Optics, 2006, 45(16): 3831-3838.
- [3] 苑佳华, 张恒利, 毛叶飞, 等. 160 W 端面抽运正支混合腔板条激光器的研究[J]. 物理学报, 2016, 65(19): 194206.
Yuan J H, Zhang H L, Mao Y F, et al. 160 W laser-diode end-pumped Nd:YVO₄ slab laser with positive branch hybrid resonator[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(19): 194206.
- [4] Guo Y D, Peng Q J, Bo Y, et al. 24.6 kW near diffraction limit quasi-continuous-wave Nd:YAG slab laser based on a stable-unstable hybrid cavity[J]. Optics Letters, 2020, 45(5): 1136-1139.
- [5] Li W J, Guo Y D, Zhang L Y, et al. Compact integrated aberration-compensating module for a 9 kW Nd:YAG slab laser based on an off-axis stable-unstable resonator[J]. Applied Optics, 2022, 61(30): 8917-8925.
- [6] 何星, 田中州, 王帅, 等. 基于角谱传播理论的衰荡腔光场传输模型及调腔评价准则研究[J]. 物理学报, 2023, 72(1): 014205.
He X, Tian Z Z, Wang S, et al. Optical field propagation model of ring-down cavity light field based on angular spectrum propagation theory and evaluation criterion of cavity tuning[J]. Acta Physica Sinica, 2023, 72(1): 014205.
- [7] 连天虹, 杨磊, 朱家华, 等. 薄片 Nd:YAG 涡旋光激光器研究[J]. 光学学报, 2022, 42(21): 2114002.
Lian T H, Yang L, Zhu J H, et al. Thin-disk Nd:YAG vortex laser[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(21): 2114002.
- [8] Fu S H, Long X J, Mao H J, et al. Unstable resonator alignment based on the fringe analysis[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2011, 49(12): 1436-1439.
- [9] 张文静, 刘文广, 刘泽金. 一种非稳腔计算机辅助装调方法的数值模拟[J]. 光学学报, 2008, 28(3): 516-521.
Zhang W J, Liu W G, Liu Z J. Numerical simulation for computer-aided precise alignment of unstable resonator[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(3): 516-521.
- [10] 田中州, 何星, 王帅, 等. 基于腔损耗扫描寻优的光腔衰荡高反射率测量[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(7): 0712002.
Tian Z Z, He X, Wang S, et al. High reflectivity measurement based on the intracavity loss scanning of ring-down cavity[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(7): 0712002.
- [11] 杜星湖, 薛颖, 何星, 等. 基于耦合光腔衰荡技术的高反射率测量[J]. 中国激光, 2020, 47(6): 0604006.
Du X H, Xue Y, He X, et al. High reflectivity measurement based on coupled cavity ring-down technique[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(6): 0604006.
- [12] 薛颖, 杜星湖, 何星, 等. 基于透射光斑形态监测的光腔衰荡调腔方法[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0504001.
Xue Y, Du X H, He X, et al. Ring-down cavity adjustment method based on transmission spot shape monitoring[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0504001.
- [13] 李卿, 刘现魁, 任晓明, 等. 气流方向 Z 型折叠离轴混合非稳腔研究[J]. 中国激光, 2022, 49(23): 2301007.
Li Q, Liu X K, Ren X M, et al. Off-axis hybrid unstable resonator with Z-fold in gas flow direction[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(23): 2301007.
- [14] Sziklas E A, Siegman A E. Mode calculations in unstable resonators with flowing saturable gain 2: fast Fourier transform method[J]. Applied Optics, 1975, 14(8): 1874-1889.
- [15] Goodman J W. Introduction to Fourier optics[M]. San Francisco: McGraw-Hill, 1968.
- [16] 刘盾, 石恒, 汪利华, 等. 基于响应函数的大口径衍射元件光场调制分析[J]. 光学学报, 2023, 43(7): 0705001.
Liu D, Shi H, Wang L H, et al. Analysis of light field modulation by large-aperture diffractive element based on response function[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(7): 0705001.
- [17] 李卿, 刘现魁, 任晓明, 等. 柱面镜旋转对整形光束远场焦斑的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(11): 1105001.
Li Q, Liu X K, Ren X M, et al. Effect of cylindrical mirror rotation on the far-field spot of a shaping beam[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(11): 1105001.

Multi-Beam Interference and Far-Field Pattern of Guiding Light in Off-Axis Unstable Resonator

Li Qing^{1,2*}, Liu Xiankui^{1,2}, Ren Xiaoming^{1,2}, Guo Junjie^{1,2}, Li Hongchun^{1,2}, Liu Changchun^{1,2},
Guo Jianzeng^{1,2}

¹The 718th Research Institute of China State Shipbuilding Corporation Limited, Handan 056027, Hebei, China;

²Hebei Province Key Laboratory of Chemical and Gas Laser, Handan 056027, Hebei, China

Abstract

Objective The collimation adjustment of an unstable resonator requires guiding light. Examination of the oscillation process and propagation characteristics of guiding light assists in the understanding and judgment of the resonator misalignment state. Off-axis unstable resonators are hybrid unstable resonators with high extraction efficiencies and beam quality values. The physical process of

guiding light oscillation in an off-axis unstable resonator has rarely been investigated. Therefore, this study investigates the multi-beam interference process and far-field propagation characteristics of guiding light in an off-axis unstable resonator using theoretical calculations and experiments.

Methods A guiding light research device in an off-axis unstable resonator is constructed. The schematic of optical path of guiding light in the off-axis unstable resonator composed of four resonator mirrors is shown in Fig. 1. The convex cylindrical mirror in the Y -direction and concave spherical mirror form a stable resonator in the X -direction and a positive-branch confocal unstable resonator in the Y -direction, respectively. Z -shaped folding in the X -direction is achieved by turning plane mirrors. The curvature radii of the concave spherical and convex cylindrical mirrors are 16 m and 14 m, respectively. The magnification in the direction of the unstable resonator is 1.14. The 632.8 nm He-Ne laser (guiding light) is injected through a small hole at the bottom of the concave spherical mirror, oscillates back and forth inside the resonator, and outputs off-axis in the Y -direction of the convex cylindrical mirror. The output guiding light is focused on the charge coupled device (CCD) target through a convex lens with 300 mm focal length to observe its far-field characteristics. In terms of numerical calculations, this study utilizes the diffraction theory of the plane wave angle spectrum to calculate the oscillation process of guiding light in a Z -shaped folded off-axis unstable resonator. In the calculations, the incident beam is a fundamental-mode Gaussian beam with a central wavelength of 632.8 nm. The number of samples in the calculation is 16384×16384 . The flowchart of the optical field oscillation calculation is shown in Fig. 2. The intracavity output loss, reflection loss and injected guiding light energy during the guiding light oscillation process reach a balanced condition within a limited number of oscillations. Throughout this process, the maximum number of guiding light oscillations is approximately 10.

Results and Discussions The calculated and experimental results for the near-field spot and far-field spot of the oscillating guiding light in the concave spherical mirror are shown in Figs. 3 and 4, respectively. The concave spherical mirror acts as a convex lens in the X -direction to repeatedly focus and diverge the Gaussian guiding beam. In the Y -direction of a positive-branch confocal unstable resonator, for each round-trip oscillation in the resonator, the waist radius of the Gaussian guiding beam in the Y -direction increases M times (M refers to the confocal unstable resonator magnification), its divergence angle is reduced to $1/M$, and its curvature radius increases M^2 times. Therefore, during multiple oscillations, the Gaussian guiding beam tends to be a plane wave, eventually reaches above the convex cylindrical mirror and outputs. As shown in the calculation results in Fig. 3(a), the interference pattern at the injection point of the small hole in the concave spherical mirror presents an elliptical water droplet shape, which differs from the circular interference patterns commonly observed in traditional positive/negative confocal unstable and stable resonators. The guiding light is output from an off-axis unstable resonator and passes through a focusing lens with 300 mm length to obtain a far-field spot pattern, as shown in Fig. 3(b). Different order spot patterns are distributed along the Y -direction. As the number of oscillations increases, the divergence angle of the N -order Gaussian beam in the Y -direction in the resonator is reduced to $1/M^N$ (N refers to the number of oscillations). The higher the order of the Gaussian beam, the closer the beam is to a plane wave. When the beam is a plane wave, the (X, Y) coordinate corresponding to the far-field focal spot is $(0, 0)$. The highest-order guiding light far-field spot can be used to indicate the far-field spot of an infrared laser. It should be noted that the number of guiding light oscillations in the resonator is limited because of the output loss and resonator mirror reflectivity loss. The highest-order guiding light far-field spot positions as shown in the calculations and experiments can only approximate infrared laser far-field spot positions.

Conclusions The calculation and experimental results indicate that the interference pattern of an off-axis unstable resonator (with a flat concave stable resonator in the X -direction) differs from that of traditional confocal unstable or stable resonators. The guiding light in the resonator exhibits the interference pattern with an elliptical water droplet shape at the injection point of the small hole in the resonator mirror, which has strong brightness and can be used to determine the optical resonator collimation state. The far-field spot pattern of the output guiding light exhibits a series of bright spots along the Y -direction, and the higher-order bright spot can be used to indicate the far-field spot position of the infrared laser. Thus, the results of this study provide a reference for understanding the physical process of Gaussian beam oscillation in an optical resonator and for determining the collimation state of an off-axis unstable resonator.

Key words laser optics; off-axis unstable resonator; multi-beam interference; resonator alignment method; far-field spot