

文章编号: 1001—4322(2000)02—0164—05

# 无源虚共焦非稳腔光束特性模拟\*

杜燕贻

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 8009 信箱, 100088)

**摘 要:** 采用 FFT 方法, 详细研究了无源圆形球面虚共焦非稳腔的光束特性, 给出了三维稳态模型。考虑腔镜倾斜效应和变反射率输出耦合镜导致的光束质量和输出功率变化等问题, 讨论了在中等放大率和大 Fresnel 数模式下的近场光束特性和远场光束质量。

**关键词:** 虚共焦非稳腔; 光束质量; 光强

**中图分类号:** TN 248, O 437

**文献标识码:** A

非稳腔是高功率气体激光技术研究中获得良好光束质量的首选腔型之一。谐振腔理论分析表明, 具有大 Fresnel 数的不稳定共振腔可以使最初在共振腔中心附近发生的辐射充满整个激光介质, 而其相位控制发生在共振腔中心部分, 故能保持低阶模(单模)运转和高质量的输出光束。COL 的特征 Fresnel 数较大, 增益和折射率具有空间和时间变化性, 短波长上光束的平均功率密度高。解决非稳腔模式方法很多<sup>[1-3]</sup>, 快速傅里叶变换法(FFT)对二维离散点处理要比常规迭代法快, 从而使计算效率明显高于其它方法, 可对较大的等效 Fresnel 数的模式进行计算。

本文采用 FFT 方法, 给出了计算球面虚共焦非稳腔的光束特性的三维计算程序和稳态模型, 考虑腔镜失调及变反射率输出耦合镜等问题, 给出了在中等放大率和大 Fresnel 数模式下虚共焦非稳谐振腔激光器(放大率 1.25~3.0, 等效 Fresnel 数大于 10)的近场光束特性和远场光束质量, 计算了有效 Fresnel 数、放大率等参数对光束质量的影响, 研究了远场光束质量和近场输出功率的最佳匹配关系, 分析了腔镜倾斜效应和变反射率输出耦合镜对光束质量的改善。

## 1 理论方案

将激光谐振腔等分成一系列模块, 相邻两个模块之间以自由空间传输处理, 即可用 FFT 方法描述。当波函数传输到任一镜面时, 乘以复镜反射率(包括激光器的镜倾斜和可变反射率), 再反向仍以自由空间传输到达另一镜面, 如此完成整个传输。通过迭代, 直到波振幅和相位分布收敛于一稳态解。

设自由空间传输满足近轴波传输方程

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + 2jk \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Fourier 变换为上述方程提供快速解, 即用空间频谱的积分来表示该波函数。u(x, y)的正变换、传输、逆变换方程如下

$$\tilde{u}(p, q) = \iint u(x, y) \exp[j(px + qy)] dx dy \quad (2)$$

$$\tilde{u}(p, q, z_1) = \tilde{u}(p, q, z_0) \exp[j \frac{p^2 + q^2}{2k} (z_1 - z_0)] \quad (3)$$

$$u(x, y) = \iint \tilde{u}(p, q) \exp[j(xp + yq)] dp dq \quad (4)$$

正逆傅里叶变换可用 N. M. Brenner<sup>[7]</sup>给出的快速 Fourier 变换(FFT)算法进行计算。

\* 国家 863 激光技术领域资助课题(863-410-4-4)

1999 年 11 月 7 日收到原稿, 2000 年 3 月 18 日收到修改稿。

杜燕贻, 女, 1965 年 3 月出生, 硕士, 副研, 从事激光物理研究

FFT 算法要求入射和出射波函数  $u(x_1, y_1), u(x_2, y_2)$  在相等间距的横向空间网格上取样。对非稳腔中球面波传输(如一发散的球面波)而言,其光束扩散性造成入射和出射面网格点划分不均匀。在小镜面处网格点间隔必须很密,以便波函数可在足够大的频率范围内取样,同时总网格点数必须足够大以致于取样点宽度能够覆盖住大镜面。以上两种原因使得所需取样点数目大大增加。本文用基于非稳腔球面波理论的展宽坐标系来解决<sup>[4]</sup>。

为处理锐边引起的高频锐峰效应,采用高斯型函数截断镜边界使镜边界逐渐缩减<sup>[5]</sup>。设  $r$  为镜的功率反射率,  $(x_0, y_0)$  是从镜中心测量的均匀反射率为  $r_0$  的半径值位置,  $\tau$  是截断函数,  $a$  是实际镜半径, 则

$$r = r_0 \exp \left[ -(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 / \tau^2 \right] \quad (5)$$

$$2a = a [x_0 + (0.7)^{1/2} \tau] \quad (6)$$

其中,  $|x| < x_0, -a < x < a, |y| < y_0, -a < y < a, \tau$  的取值一般为  $0.2 \sim 0.4$ 。

常规非稳腔输出为环型空心光束,其聚焦性能差(见图 1)。放大率  $m_1 = a_2/a_0$ 。Koji Yasui<sup>[6]</sup>改进腔可输出实心光束,聚焦性能提高。现探讨一个新的腔型,使放大率增大且聚焦稳定性提高。设计输出耦合镜中心为全反而周围环面为半反,这时放大率  $m_2 = a_2/a_0$ , 显然  $m_2 > m_1$ 。

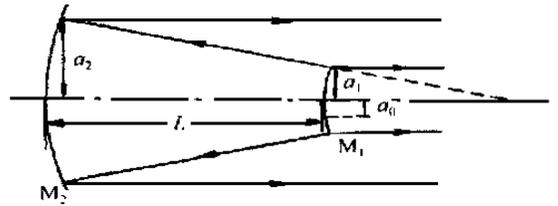


Fig 1 Geometry model of confocal unstable resonator

图 1 虚共焦非稳腔的几何模型

腔镜倾斜使光束偏转导致远场光束漂移,但峰值强度不变。镜倾斜可通过迭加一线性相位因子  $Qe^{-2ik(x - x_0) \sin \theta}$  来实现。给定非稳腔,倾角  $\theta$ (与光轴)可由两个镜曲率中心的连线来定义。设腔镜倾角分别为  $\theta$  (凸),  $\theta$  (凹), 放大率  $m = a_2/a_0$ 。表 1 给出四种情况下的倾角。尽管无源腔下镜倾斜总是使光束质量变差,但在实际有源气体激光器中,非均匀增益的存在产生倾斜的输出光强分布,介质流动造成的倾斜可用仅使某一镜适当倾斜的方式(如凹镜倾斜)进行补偿,故其研究有实用意义。

表 1 不同镜倾斜情况下的倾角

Table 1 The tilt angles with different mirror tilt angles

	only $M_2$ tilt	only $M_1$ tilt	both mirrors are tilt alone the same diric	both mirrors are tilt alone the different diric
tilt angles	$\theta = 2m\theta_2/(m-1)$	$\theta = 2\theta_1/(m-1)$	$\theta = 2(m\theta_2 - \theta_1)/(m-1)$	$\theta = 2(m\theta_2 + \theta_1)/(m-1)$

常规的共焦非稳腔的近场图样为环形光斑,内外环半径可以求得。根据菲涅耳-夫琅和费近似可求出远场光强分布,可以导出远场图形的详细结构,通过远场峰值强度对无扰动时均匀无遮挡情况下的峰值强度归一化后的值来描述光束质量。该比值即为 Strehl 比。亦可根据在一给定发散角内的局部功率大小定义最后光束质量。

## 2 计算程序

根据上述理论,基于 Fortran 语言,编制了计算非稳腔下气体激光中光腔模式的三维计算程序(URFV 3D-1)。该程序对一般常规非稳腔均适用,等效菲涅耳数  $N_{eq} = 0.5 \sim 36.0$ 。

FFT 子程序用来计算正向和反向 Fourier 变换。计算可以是实数或虚数。传输值总是复数形式,并可返回到用于载入初始数据的阵列中。与其它直接求和的程序相比其运行时间非常短。具有均匀取样的离散 FT 方法解决周期性无限阵列函数,故每一孔径周期必须由一适当的边界使其与相邻的孔径周期分离。以避免剩余衍射能量从一个组元扩充到下一个组元。设  $c$  为从一个组元容许扩充到下一个组元的功率容限,故所有组元宽度应宽于反射孔径乘以一个边带宽度比  $G^{[4]}$ ,  $G = 1 + (2\pi^2 N c \theta)^{-1}$ ,  $N c = a^2/(L \lambda)$ 。而实际计算所需离散点数  $N_p = 4G(G+1)N$ 。根据不同 Fresnel 数计算出的  $G$  和  $N_p$  值见表 2。

表 2 不同 Fresnel 数所需的计算点数目

Table 2 The numbers of calculation point with different Fresnel number

$m$	2.5	2.5	2.5	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85
$N_{eq}$	0.5	1.5	5.5	16.5	20.0	22.5	26.0	32.0	36.0
$G >$	3.2	2.0	1.2	1.1	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
$N_p >$	62	67	138	404	438	540	619	755	845
Cal point	64	128	512	512	512	1024	1024	1024	1024

### 3 数值结果和分析

#### 3.1 程序检验

为测试计算结果的实用性,先用波长为  $10.6\mu\text{m}$  的  $\text{CO}_2$  增益介质激光器验证。采用正支共焦非稳腔,用圆形镜跨越流动增益介质。腔长  $L = 4\text{m}$ ,沿  $z$  方向; $y$  方向垂直于气流; $x$  方向,放大率  $m = 2.5$ ,几何耦合输出率  $\eta = 84\%$ 。 $\epsilon = 0.02, G = 2$ 。三组有效菲涅耳数及腔镜参数取自文献[3]。

图 2(a, c) 显示了  $N_{eq} = 1.5$  ( $a_1 = 0.92\text{cm}, a_2 = 2.3\text{cm}$ ) 紧挨着输出镜内侧的输出平面上的稳态光强和相位分布。网格点选取为  $128 \times 128$ 。空腔耦合效率为  $69.2\%$  (文献值  $69\%$ )。图 2(b, d) 显示了  $N_{eq} = 5.5$  ( $a_1 = 0.92\text{cm}, a_2 = 2.3\text{cm}$ ) 的稳态光强和相位分布。网格点选取为  $256 \times 256$ 。 $N_{eq} = 0.5$  ( $a_1 = 0.53\text{cm}, a_2 = 1.35\text{cm}$ ) 的空腔耦合效率为  $57\%$  (文献值  $59\%$ )。以上三组参数计算结果与文献[3]完全吻合。其强度分布给出了共焦非稳腔的特性:当  $N_{eq} = s/2$  ( $s$  为奇数时),其强度分布具有一个中心峰值加  $(s-1)/2$  个环。

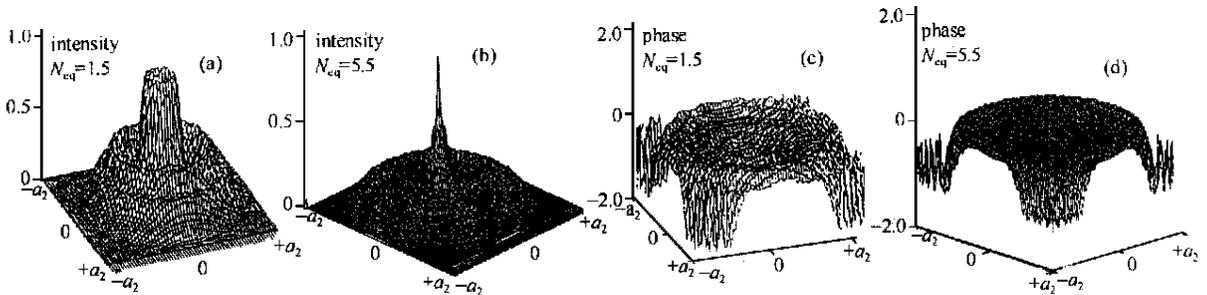


Fig. 2 Plots of wave intensity (a, b) and phase (c, d) just inside the output mirror of a bare unstable resonator with  $N_{eq} = 1.5, 5.5$  and  $m = 2.5$

图 2 无源非稳腔在  $N_{eq} = 1.5, 5.5$  和  $m = 2.5$  下,光束达到输出镜前的强度(a, b)和相位(c, d)分布

#### 3.2 COL 模型计算

化学氧碘激光器的特性决定了其 Fresnel 数很大,该方法对大 Fresnel 数计算精度提高且计算速度大大快于其他方法。根据 COL 常规非稳腔模型的模拟参数值。取边带宽度比  $G = 1.05$ 。计算其近场强度、相位分布、近场最大峰值强度、近场输出功率、输出耦合率及远场 Strehl 比。

当谐振腔放大率不变 ( $m = 1.85$ ) 时,两镜直径分别取  $5.8\text{cm}$  和  $3.135\text{cm}$ ,我们计算了不同等效 Fresnel 数 ( $N_{eq} = 10.0 \sim 36.0$ ) 下的近场特性(图 3)。结果表明:(1)近场输出总功率随着  $N_{eq}$  的不同,其不规则波动变化明显,在  $N_{eq} = 11.0, 12.0, 19.5, 30.0, 36.0$  四处有较大的输出总功率。(2)近场输出耦合率和远场 Strehl 比的波动变化相对近场输出总功率要缓得多。故以近场输出总功率定标腔尺寸。(3)计算中出现了收敛缓慢甚至很难收敛的现象(迭代 100 次以上),如  $N_{eq} = 27.5$  处,说明在此处易发生多模振荡。选取腔型时应尽量避免。

改变放大率,  $m = 1.5, 1.85, 2.0, 2.5, 3.0$ ,保持大镜径向尺寸  $a_2$  不变,取图 3 中近场输出总功率较大的腔型计算。从计算结果可以看出:(1)随着  $m$  增大,近场输出耦合率和远场 Strehl 比明显增大,后者从  $38\%$  增至  $80\%$ 。故从远场光束质量出发  $m$  越大越好。(2)近场输出总功率  $P_{tot}$  的变化则受到  $m$  和  $N_{eq}$

的同时控制。在  $m = 3$  时  $P_{tot}$  均较低, 综合考虑,  $m = 2.5, N_{eq} = 14.5$  时为最佳, 此时腔长  $L = 5.3\text{m}$ , 两镜直径分别取  $5.8\text{cm}$  和  $2.32\text{cm}$ 。(3) 对于腔长在 3 米左右的腔型优选, 为  $m = 1.85, N_{eq} = 26, L = 3.05\text{米}$ 。此腔型与我们现在实验中所选的腔型吻合。(4) 在  $N_{eq} = 12, 30, 36$  时, 当  $m > 2.0$  易发生多模振荡。

改变输出耦合镜的结构, 特点是减少中心光束遮挡。我们计算以下四种腔型  $m = 2.5, N_{eq} = 14.5$ ;  $m = 2.0, N_{eq} = 31.5$ ;  $m = 1.85, N_{eq} = 19.5, 26.0$  的光束特性。取  $M_2$  反射率为  $0.5, 0.75$ 。由计算结果可看出 (1) 远场 Strehl 比明显提高, 最大提高了 33%。但代价是近场输出总功率下降 ( $N_{eq} < 30$ ), 特别当反射率取  $0.5$  时可下降 60% 以上。这对需要大功率输出不利。综合考虑, 可选腔型为  $M = 1.85, N_{eq} = 19.5, L = 407.2\text{m}, r = 0.75$ 。该腔型的近场输出总功率只下降了 20%, 而远场 Strehl 比提高了 31%。为使输出总功率提高, 须用刮刀侧向输出。

腔镜倾斜对光束输出有影响。计算上述四种腔型 (1) 仅沿  $x$  方向倾斜, (2) 沿  $x$  和  $y$  方向均倾斜。对空腔模式, 远场光束形状与镜倾斜几乎无关, 仅是位置发生偏移, 最大峰值强度几乎不变。但近场变化很大。在没有流动增益介质条件下, 强度分布获得独特的非对称形式, 相位分布发生倾斜。计算的  $\text{CO}_2$  激光器当大镜倾斜即  $\theta = 50\mu\text{rad}$  下的结果与文献 [3] 一致。图 4 给出了  $\text{CO}_2$  当大镜倾斜沿  $x$  方向倾斜时近场输出总功率、近场峰值强度和远场 Strehl 比。图 5 给出了  $\text{CO}_2$  当  $\theta = 5, 20\mu\text{rad}$  时的近场强度及相位分布对比。由于波长的差异,  $\text{CO}_2$  较  $\text{CO}$  对倾斜的敏感度要高。

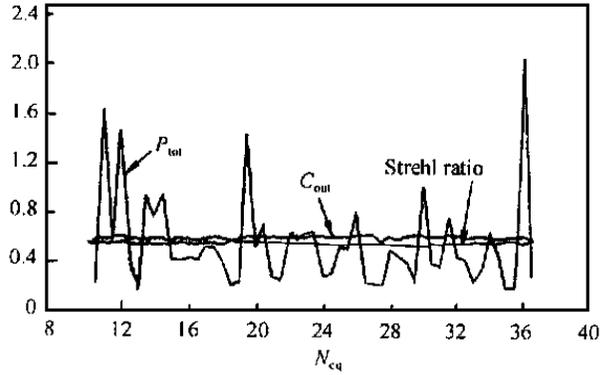


Fig 3 Near-field output power, output coupling, far-field Strehl ratio in different Fresnel number  
图 3 不同非涅耳数  $N_{eq}$  时近场输出总功率  $P_{tot}$ 、输出耦合率  $C_{out}$  及远场 Strehl 比

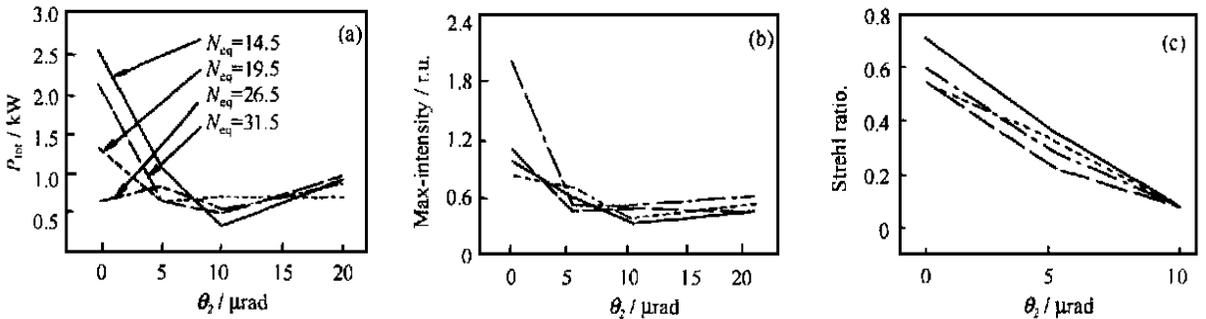


Fig 4 The effect of output beam when output mirror tilt— $\text{CO}_2$

图 4  $\text{CO}_2$  (1.315 $\mu\text{m}$ ) 输出耦合镜 (凹镜) 倾斜对近场输出总功率  $P_{tot}$ 、近场最大峰值强度和远场 Strehl 比的影响

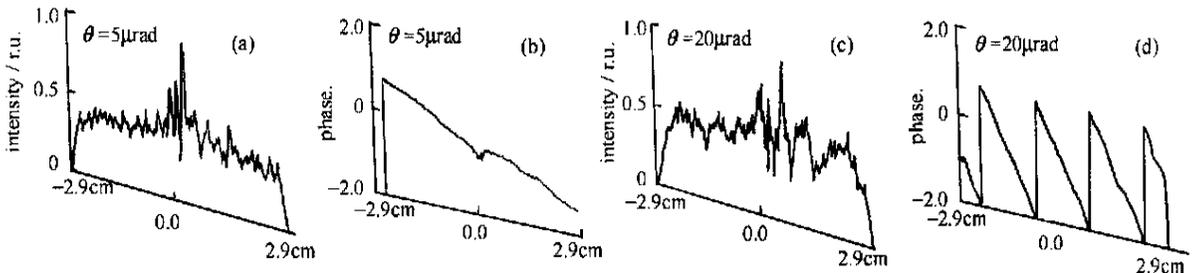


Fig 5 Plots of wave intensity and phase just inside the output mirror when output mirror tilt— $\text{CO}_2$  ( $N_{eq} = 26.0$ )

图 5  $\text{CO}_2$  (1.315 $\mu\text{m}$ ), 输出耦合镜 (凹镜) 倾斜时近场强度和相位分布的改变 ( $N_{eq} = 26.0$ )

## 4 结 语

用 FFT 方法详细研究了圆形球面虚共焦非稳谐振腔气体激光器的三维光束特性。以 COIL 为重点计算模型,得到了有用的计算结果。(1)本程序特别适用于大 Fresnel 数光腔(如 COIL)的计算且计算速度比其他方法快得多。平均计算一个模型需要 30~40 分钟。(2)腔型选择计算,综合考虑近场输出总功率和远场比,在所计算的 Fresnel 数中当  $N_{eq} = 14.5, m = 2.5, L = 5.25$  时为最佳。(3)多模效应应尽量避免。表现在达到稳定模式的迭代收敛很慢或不收敛。(4)变输出耦合镜反射率可以改善光束质量,但伴随近场输出总功率下降。(5)空腔模式下腔镜倾斜仅使远场光束的位置发生变化而不改变形状和大小,但近场变化很大。

致 谢 本工作得到了王元璋研究员的悉心指导,同时感谢雷广玉、陈雅深、张本爱、束小建研究员,李有宽、李守先副研究员和本组全体同志的帮助和支持。

## 参考文献:

- [1] Siegman A E. New developments in laser resonators[J]. *SPIE Opt Res*, 1990, 1224
- [2] Rigrod W W. Saturation effects in high-gain lasers[J]. *J Appl Phys*, 1965, **36**(8): 2487.
- [3] Sziklas E A, Siegman A E. Mode calculations in unstable resonators with flowing saturable gain. 2: Fast Fourier transform method [J]. *Appl Opt*, 1975, **14**(8): 1874
- [4] Perkins J F, Shatas R A. Propagation in unstable and plane mirror optical resonators[J]. *Appl Phys*, 1976, **9**: 343
- [5] Chester A N. Three-dimensional diffraction calculations of laser resonator modes[J]. *Appl Phys*, 1976, **9**: 343
- [6] Yasui K, Tanaka M, Yagi S. An unstable resonator with a phase-unifying output coupler to extract a large uniphase beam of a filled-in circular pattern[J]. *J Appl Phys*, 1989, **65**(1): 17.
- [7] Brenner N M. Technical note[R]. AD657019, 1967, 7. 28

# STIMULATION OF CONFOCAL UNSTABLE RESONATORS ON BEAM QUALITY

DU Yan-yi

*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, P. O. Box 8009, Beijing 100088 China*

**ABSTRACT:** The three-dimensional mode are calculated pattern using the fast Fourier transform (FFT) algorithm in confocal unstable resonators, especially discussed the near-field and far-field results for large equivalent Fresnel number ( $N_{eq} > 10$ ) and middle magnification ( $m \approx 3.0$ ), taking into account the mirror tilt and change reflection of output mirrors

**KEY WORDS:** confocal unstable resonators; output beam quality; intensity