

# 环状耦合输出的 $90^\circ$ 束转非稳腔的 模场计算\*

魏 青 魏在福 王润文

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

**提要** 利用 FFT 方法对环状耦合输出的  $90^\circ$  束转非稳腔在小放大倍率 ( $M = 1.2$ ) 情况下的模场畸变进行了数值模拟, 分析了镜面倾斜和像散对输出光束质量的影响程度, 并与常规环形非稳腔进行了比较, 结果表明, 环状输出  $90^\circ$  束转非稳腔比常规环形非稳腔具有更优良的特性。

**关键词**  $90^\circ$  束转非稳腔, 快速傅里叶变换, 化学氧碘激光器, 光束质量

## 1 引 言

对于高功率化学激光器来说, 环形非稳腔是一种经常采用的腔型, 利用场转动技术对环形非稳腔加以改进, 不但保持了它原有的优点, 而且通过使光束在腔内旋转达到平均波前的目的, 从而减小了增益分布不均匀性对光束质量的影响<sup>[1]</sup>。在实际应用中, 由于谐振腔的失调和光学元件的像差对光腔模场的影响也是不可忽视的, 利用场转动环形非稳腔可以改善由于失调和像差对光腔模场的影响, 从而提高输出光束的质量。

本文采用快速傅里叶变换 (FFT) 方法模拟计算了镜面倾斜和像散对环状耦合输出的  $90^\circ$  束转非稳腔和常规环形非稳腔的近场光强、相位分布以及远场强度分布的影响, 将二者结果进行了比较, 结果证明, 采用环状耦合输出的  $90^\circ$  束转非稳腔对失调灵敏度和光学件像差的要求较低。

## 2 计算模型及方法

环状输出  $90^\circ$  束转非稳腔 (AOUR90) 与文献中<sup>[2]</sup>提到的 UR90 腔有所不同, 其区别在于后者输出耦合镜为刀口, 输出光束为实心矩形, 在强红外激光传输中, 只能采用斜轴形反射望远镜发射, 而斜轴反射望远镜的设计难度大, 造价昂贵。为此, 本文发展的腔型可以输出环形光斑, 符合同轴反射式发射天线对激光器输出光斑形状的要求。它的平面示意结构如图 1 所示, 其中屋脊镜  $M_1$  相对于水平放置的由平面镜  $M_2, M_3$  组成的 U 形镜旋转  $45^\circ$ ,  $f_1$  和  $f_2$  虚共焦组成扩束望远镜,  $M_4$  为正向模输出耦合镜。由此可见, 沿顺时针方向转动的正向模经屋脊镜  $M_1$  作用后将旋转  $90^\circ$ , 使光束离开平面  $M_2M_3M_4$  向上平移, 光束平行传输至  $f_1$  后, 通过望远系统使光

\* 国家 863 高技术 410-4 项目资助课题。

收稿日期: 1998-02-20; 收到修改稿日期: 1998-04-21

束平移回到原平面并扩束,这样正向模光束经系统旋转、平移扩束、介质放大后才能完成一周环行而达到输出耦合镜  $M_4$ , 其中一部分光束被耦合出腔外, 剩余光束被反馈到腔内。

把光束在腔内环行一周实现模式再现的环状 UR90 束转非稳腔展开成等价透镜序列, 假设旋

转在一平面内发生, 且不考虑增益介质对模场的影响, 得到如图 2 的简化计算模型, 其中  $oz$  为环形腔的光轴, 光场沿  $z$  轴传播,  $y$  轴垂直于纸面向外。  $L_1$  为当光束沿顺时针传播时, 输出耦合镜  $M_4$  与  $f_1$  的距离,  $L_2$  为扩束望远镜  $f_1$  和  $f_2$  之间的距离,  $L_3$  为  $f_2$  与输出耦合镜  $M_4$  的间距。

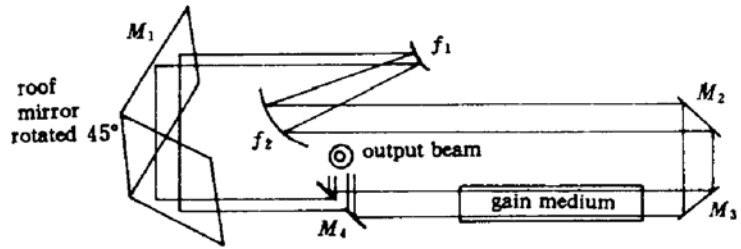


图 1 环状输出 90°束转非稳腔的平面示意结构图

Fig. 1 Layout of an annular output UR90 resonator

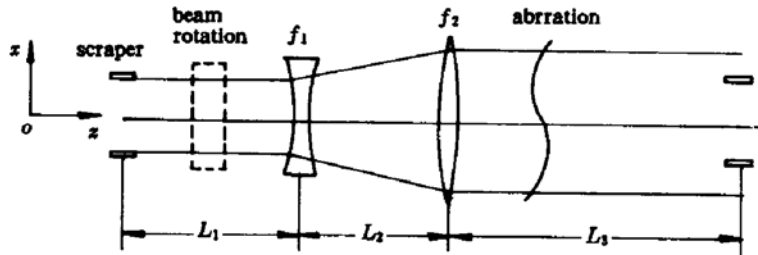


图 2 环状输出 90°束转非稳腔的简化计算模型

Fig. 2 A simplified model of the annular output UR90 (AOUR90) resonator

采用快速傅里叶变换及迭代算法<sup>[3,4]</sup>, 以输出耦合镜  $M_4$  所在位置作为参考平面, 将一平面波场引入腔中, 经过旋转、扩束、相位畸变和耦合输出的一周环行后, 剩余部分被反馈到腔内, 如此迭代 12 次直到模场分布达到稳定时, 就可以得到环状输出 90°束转非稳腔在参考平面上的场分布。

因为化学氧碘激光器的低增益特性, 可选定系统的放大倍率  $M = 1.2$ , 激光波长  $\lambda$  为  $1.315 \mu\text{m}$ , 耦合镜内环半径  $a = 1\text{cm}$ , 输出耦合镜与  $f_1$  的距离  $L_1 = 420 \text{ cm}$ ,  $f_1$  和  $f_2$  之间的距离  $L_2 = 70 \text{ cm}$ ,  $f_2$  与输出耦合镜的间距  $L_3 = 232 \text{ cm}$ , 对应腔的等价菲涅耳数  $N_{eq} = 1.82$ 。

### 3 计算结果及分析

图 3 (a), (b) 分别为在空腔情况下, 环状输出 90°束转非稳腔在耦合镜处的光场强度和相位分布的三维曲线。可以看到, 光强分布由一个主峰和一个环状次极大组成, 而相位分布则在光束几何边界内 ( $r < 1.2 \text{ cm}$ ) 保持相对平坦。

远场强度分布三维曲线和等高线图如图 4 (a), (b),  $x, y$  方向坐标的定义与文献[4] 相同, 为  $R\lambda/D$ ,  $R$  代表离开耦合面的距离,  $\lambda$  为激光波长,  $D = 3.0 \text{ cm}$ , 略大于光束的几何直径。等高线图的分度值为相对最高强度的 80%, 60%, 40% 和 20%。从图中可以看出, 远场光斑的主要能量包含在小的中心区域内, 因此具有理想的光束质量。在空腔条件下, 由于系统相对光轴

对称,光束的旋转对模场并无影响,所以,常规环形非稳腔和环状输出  $90^\circ$  束转非稳腔的模场分布并无不同。当然,空腔时两者计算结果的不同并不能说明两种腔型就没有区别,因为在实际应用中,不得不考虑非轴对称畸变对模场的影响,有非轴对称畸变存在的情况下,两种腔型的计算结果就有很大的差异。

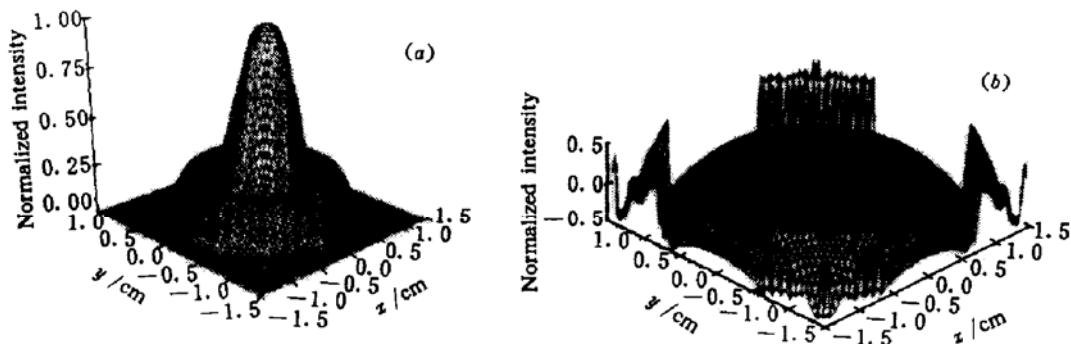


图 3  $N_{eq} = 1.82, M = 1.2$  的环状输出  $90^\circ$  束转非稳腔在耦合镜处的光场强度(a)和相位分布(b)的三维曲线

Fig. 3 Plots of (a) wave intensity and (b) phase just inside the output mirror of a bare AOUR90 resonator with  $N_{eq} = 1.82$  and  $M = 1.2$

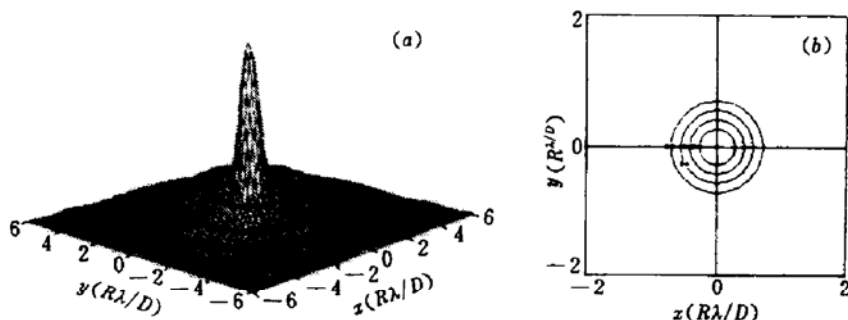


图 4  $N_{eq} = 1.82, M = 1.2$  的环状输出  $90^\circ$  束转非稳腔远场强度分布三维曲线(a)和等高线图(b)

Fig. 4 Far-field intensity distributions for an AOUR90 resonator with  $N_{eq} = 1.82$  and  $M = 1.2$

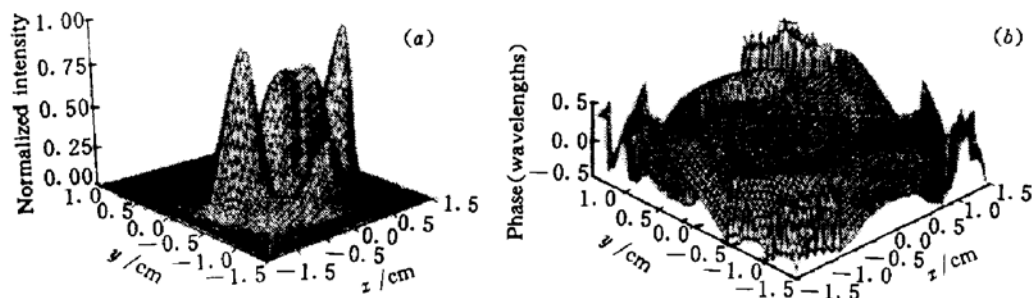


图 5  $N_{eq} = 1.82, M = 1.2$ , 并存在  $20 \mu\text{rad}$  倾斜的常规环形非稳腔在耦合镜处光强(a)和相位(b)分布的三维曲线

Fig. 5 Plots of (a) wave intensity and (b) phase just inside the output mirror of a ring unstable resonator with  $N_{eq} = 1.82$  and  $M = 1.2$  and tilt of  $20 \mu\text{rad}$

图 5 (a), (b) 是在  $y$  方向相对光轴有  $20 \mu\text{rad}$  倾斜的情况下(为说明问题起见, 所取的倾斜角较大), 常规环形非稳腔近场光强和相位分布的三维曲线。计算过程与前者类似, 只是不再需要引入光束旋转或认为光束旋转的角度为  $0^\circ$ 。计算中选用激光腔的参数与图 3 及图 4 相同。由于倾斜的影响, 光强近场分布图上出现了 3 个尖峰, 相位分布则有很大起伏, 当相位差超过一波长时, 在相位面上会发生突变, 从图中可以看出, 在光束几何边界内, 共发生了两次相变。光束的远场分布(图 6)也发生了很大变化, 主要表现为光斑发生偏移, 发散角增大, 并且出现了不对称旁瓣。可以说, 腔镜的倾斜会使常规环形非稳腔输出光束质量明显下降。

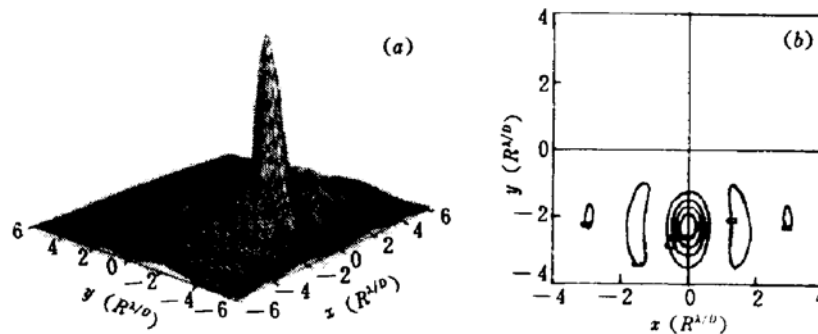


图 6  $N_{\text{eq}} = 1.82, M = 1.2$  并存在  $20 \mu\text{rad}$  倾斜的常规环形非稳腔远场强度分布三维曲线 (a) 和等高线图 (b)

Fig. 6 Far-field intensity distributions for a ring unstable resonator with  $N_{\text{eq}} = 1.82$  and  $M = 1.2$  and a tilt of  $20 \mu\text{rad}$

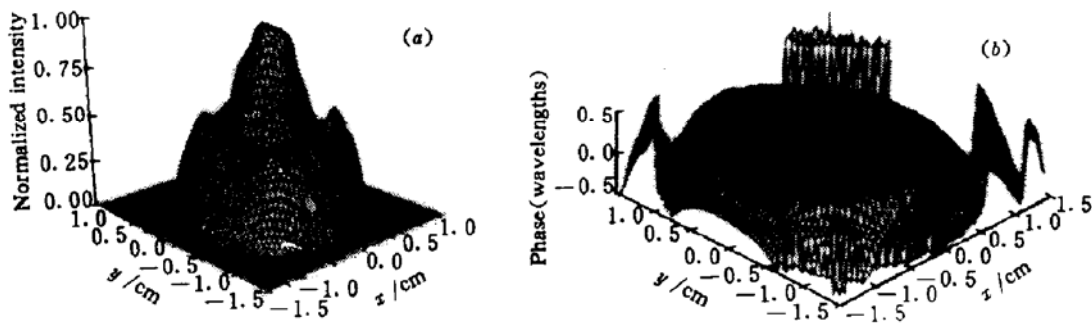


图 7  $N_{\text{eq}} = 1.82, M = 1.2$ , 并存在  $20 \mu\text{rad}$  倾斜的环状输出的  $90^\circ$ 束转非稳腔在耦合镜处光强 (a) 和相位 (b) 分布的三维曲线

Fig. 7 Plots of (a) wave intensity and (b) phase just inside the output mirror of an AOUR90 resonator with  $N_{\text{eq}} = 1.82, M = 1.2$  and a tilt of  $20 \mu\text{rad}$

对于环状输出的  $90^\circ$ 束转非稳腔(见图 7, 图 8), 同样大小的倾斜所造成的影响就小得多, 近场光强分布平缓而对称, 相位分布也趋于平坦, 而远场方向性的提高主要表现为偏移大大减小, 强度分布接近轴对称, 旁瓣基本消除, 光能更加集中, 也就是说, 即使存在倾斜因素, 仍能获得较高质量的输出光束。

像散对谐振腔模及远场特性的影响<sup>[5]</sup>也是不可忽视的, 图 9 表示常规环形非稳腔在  $x$  方向有  $1/10$  波长像散时的近场光强和相位分布, 可以看出, 相位分布受到像散的影响是相当严

重的,在  $x$  方向上产生抛物面形的畸变,腔内光场发生了模式分裂,远场弥散斑(图 10)增大,有 4 个旁瓣。

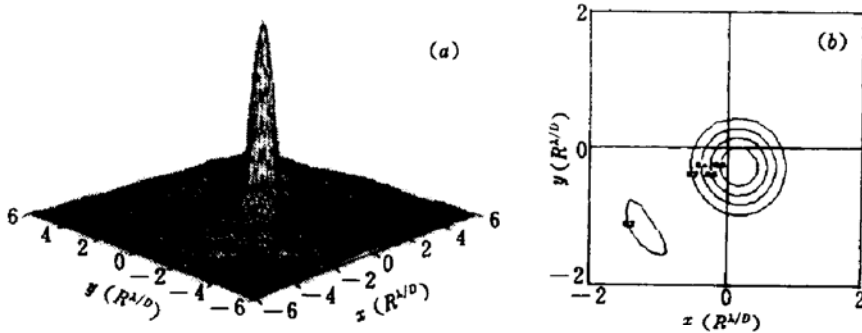


图 8  $N_{eq} = 1.82, M = 1.2$ , 并存在  $20 \mu\text{rad}$  倾斜的环状输出的  $90^\circ$  束转非稳腔远场强度分布三维曲线 (a) 和等高线图 (b)

Fig. 8 Far-field intensity distributions for an ideal AOUR90 resonator with  $N_{eq} = 1.82, M = 1.2$  and a tilt of  $20\mu\text{rad}$

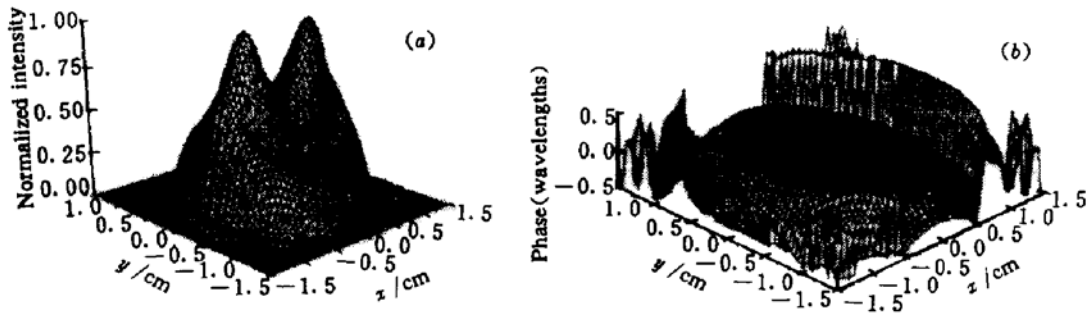


图 9  $N_{eq} = 1.82, M = 1.2$  并存在  $1/10$  波长像散的常规环形非稳腔在耦合镜处光强 (a) 和相位 (b) 分布的三维曲线

Fig. 9 Plots of (a) wave intensity and (b) phase just inside the output mirror of a ring unstable resonator with  $N_{eq} = 1.82, M = 1.2$  and an astigmatism of  $\lambda/10$

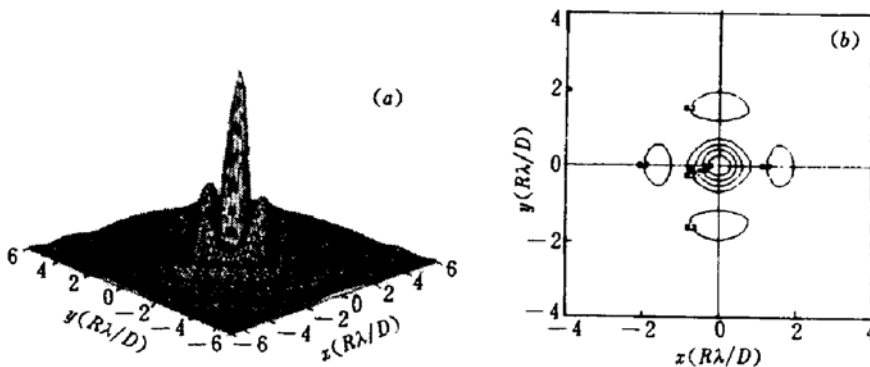


图 10  $N_{eq} = 1.82, M = 1.2$  并存在  $1/10$  波长像散的常规环形非稳腔远场强度分布三维曲线 (a) 和等高线图 (b)

Fig. 10 Far-field intensity distributions for a ring unstable resonator with  $N_{eq} = 1.82, M = 1.2$  and an astigmatism of  $\lambda/10$

具有同等像散的环状输出 90°束转非稳腔(图 11,图 12),相位的抛物面型畸变得到了较好的补偿,同时可以看到,远场方向性基本不受像散的影响。当然,如果像散大到一定程度,仅通过场转动技术也无法完全补偿。通过计算,当像散小于 1/5 波长时,环状输出 90°束转非稳腔的远场光斑是能保持十分优良和对称的模式分布的。

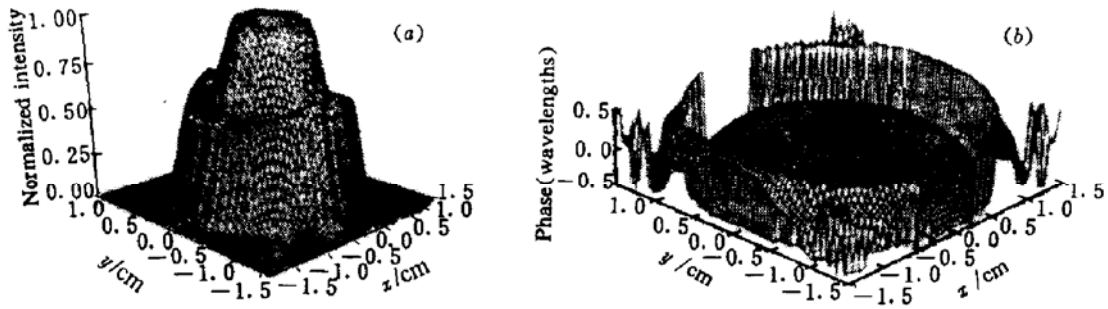


图 11  $N_{eq} = 1.82, M = 1.2$ , 并存在 1/10 波长像散的环状输出 90°束转非稳腔在耦合镜处光强(a)和相位(b)分布的三维曲线

Fig. 11 Plots of (a) wave intensity and (b) phase just inside the output mirror of an AOUR90 resonator with  $N_{eq} = 1.82, M = 1.2$  and an astigmatism of  $\lambda/10$

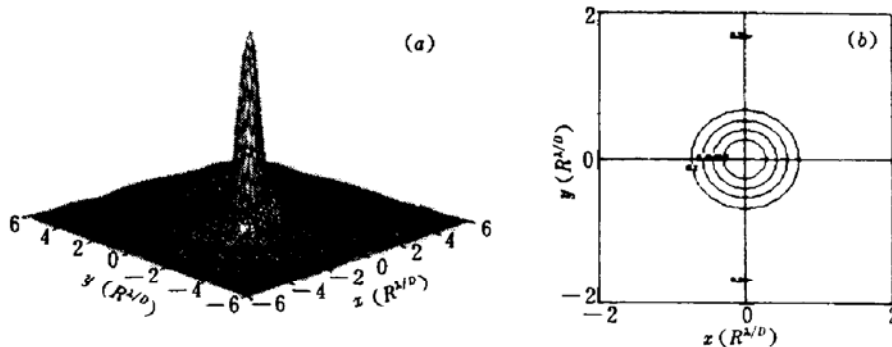


图 12  $N_{eq} = 1.82, M = 1.2$ , 并存在 1/10 波长像散的环状输出 90°束转非稳腔远场强度分布三维曲线(a)和等高线图(b)

Fig. 12 Far-field intensity distributions for an AOUR90 resonator with  $N_{eq} = 1.82, M = 1.2$  and an astigmatism of  $\lambda/10$

### 4 结 论

利用场旋转方法来平均波前,可以被形象地描述为一种“研磨”过程,光波在谐振腔中传播,通过旋转作用,其振幅在前一次经过增益较大的介质区域,也许下次将通过较小的增益区,因此,由于增益的不均匀性形成的振幅尖峰被“磨”平,在腔中振荡的次数越多,平均的效果越明显。当然,光束的旋转对折射率不均匀、腔镜失调和系统像差引起的非轴对称相位畸变也有类似的平均作用。对于高功率化学激光器来说,因为谐振腔内光场强度很高(可达数万瓦以上),腔镜失调和增益分布不均匀所导致的模场非轴对称畸变,将引起腔镜的动态热变形,从而使输出光束发生偏移,且其偏角随时间改变,这就给远距离精确定位输出造成很大困难,特别

是高功率超音速横流氧碘化学激光器,增益介质的高速流动使得运用直接的方法来获得较大范围的均匀的增益和折射率分布是很困难的。利用场旋转技术,以略微增加的系统复杂性为代价换取光束质量和系统稳定性的明显提高,是非常值得的。

### 参 考 文 献

- 1 Wei Zaifu, Wang Runwen, Wang Zhijiang. Geometric property analysis of unstable ring resonators with 90° beam rotation. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1995, 15(5):513~519 (in Chinese)
- 2 A. H. Paxton, W. P. Latham, Jr. . Unstable resonators with 90° beam rotation. *Appl. Opt.*, 1986, 25(17): 2939~2946
- 3 J. T. Hunt, J. A. Glaze, W. W. Simmons *et al.* . Suppression of self-focusing through low-pass spatial filtering and relay imaging. *Appl. Opt.*, 1978, 17(13):2053~2057
- 4 Edward A. Sziklas, A. E. Siegman. Mode calculations in unstable resonators with flowing saturable gain. 2: Fast Fourier transform method. *Appl. Opt.*, 1975, 14(8):1874~1889
- 5 K. E. Oughstun. Intracavity adaptive optic compensation of phase aberrations. II: Passive cavity study for a small  $N_{eq}$  resonator. *J. Opt. Soc. Am.*, 1981, 71(10):1180~1192

## Mode Calculations in Annular Output Ring Unstable Resonators with 90° Beam-rotation

Wei Qing Wei Zaifu Wang Runwen

(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800*)

**Abstract** An annular output ring unstable resonator with 90° beam rotation with aberration at a situation of low magnification  $M = 1.2$  is calculated by the fast Fourier transform method. The influence of the quality of the output beam with tilt and astigmatism is analyzed. The results indicate that this new resonator is better than a normal ring unstable resonator.

**Key words** UR90 resonator, FFT method, chemical oxygen-iodine laser, beam quality