

文章编号: 0253-2239(2004)10-1339-5

# 光束变换环形孔径有源激光谐振腔模式的数值模拟

刘文广 陆启生 刘泽金

(国防科技大学理学院, 长沙 410073)

**摘要:** 建立了燃烧驱动环柱型高能化学激光器环形增益介质的五种分布模型,使用差分 and 积分相结合的方法计算了束变换环孔腔在不同增益分布和折射率分布时的模式特征,研究了增益分布和折射率分布对束变换环孔腔输出性能的影响,结果表明束变换环孔腔在不同的增益介质及折射率分布情况下,仍然可以保持良好的输出光束质量,很高的提取效率,在化学激光器增益流存在激波扰动情况下,输出光场的施特雷尔比仍达到 0.8991,同时腔镜上光强分布较为均匀,可以避免镜面因热应力分布不均匀而造成镜面变形和破坏。该腔不但适用于高能化学激光器,也可以用于高能固体激光器,起到克服固体增益介质热畸变与热应力的作用,可获得优良的输出光束质量。

**关键词:** 激光技术; 高能激光; 化学激光; 激光谐振腔; 束变换环孔腔; 数值模拟; HF 增益介质

中图分类号: TN248; O347

文献标识码: A

## Numerical Simulation of Beam-Converting Annular Resonator with Active Medium

Liu Wenguang Lu Qisheng Liu Zejin

(Science College, National University of Defence Technology, Changsha 410073)

(Received 8 September 2003; revised 11 December 2003)

**Abstract:** Beam-converting annular resonator (BCAR) possesses outstanding characteristics of high extraction efficiency and near-diffractive beam quality. It is applied specially to annular HF/DF gain medium. A finite difference method is used to calculate the modes of BCAR with various active medium. It showed that BCAR is insensitive to aberrations introduced by active medium, the optical quality is excellent, and extraction efficiency of BCAR is high under all the conditions. When a shock wave exists in the active medium, Strehl ratio of BCAR can still reach 0.899, the intensity distribution on cavity mirrors is reasonable, thus the damage possibility resulting from thermal load on the mirrors is lower than the usual unstable resonators. All above advantages make BCAR a very useful resonator applied not only to high energy chemical lasers but also to other high energy lasers with annular gain medium.

**Key words:** laser techniques; high-energy laser; chemical laser; beam-converting annular resonator; numerical simulation; HF gain medium

## 1 引 言

光束变换环形孔径激光谐振腔 (Beam-converting annular resonator, BCAR, 本文简称为束变换环孔腔) 是 20 世纪 80 年代初由美国 TRW 公司设计的适用于环柱形增益介质的高性能谐振

腔<sup>[1]</sup>, 该腔是美国 ALPHA 高能化学激光器专用谐振腔<sup>[2]</sup>, 具有高的能量提取效率和近衍射极限的输出光束质量<sup>[2]</sup>, 1989 年 4 月进行了第一次高能出光试验, 功率达到 MW 级, 到目前为止, 已进行了 20 多次高能输出试验, 该腔的突出优点已被实验证明。束变换环孔激光谐振腔的结构复杂, 光学反射镜面特殊, 与传统非稳腔相比有很大的不同, 反射镜面多为高次非球面镜, 而且其类锥体的反射元件组可以引入偏振态的角向变化, 腔的设计和数值模拟难度

E-mail: lwg.kevin@163.com

收稿日期: 2003-09-08; 收到修改稿日期: 2003-12-11

很大。同时,TRW 公司对该腔的设计及数值模拟技术是保密的。可能也由于这些原因,目前国内外关于该腔设计和模拟方面的文献鲜有报道。我们曾经讨论了这种腔的结构特点及设计原理,并对所设计的谐振腔空腔模式进行了数值模拟<sup>[3]</sup>,说明了束变换环孔腔的突出特点是输出光束质量优,抗镜面失调能力强,光强分布合理,特别适于高能激光器使用。本文在此基础上,使用有限差分法,进一步研究了增益介质和折射率分布的变化对束变换环孔腔输出性能的影响。

## 2 束变换环孔激光谐振腔结构特点

束变换环孔激光谐振腔的纵剖面结构如图 1 所示(只标出了光线沿顺时针方向行进的箭头,逆时针方向标出了光线,但未标箭头)。分为环束段(Annular Leg)和紧束段(Compact Leg)两大部分。环束段由逆向反射锥面镜对(Waxicon)、后部锥面反射镜(Rear Cone)和前向反射锥面镜对(Reflaxicon)组成(这里所说的“锥面”实际上是外形接近锥面的曲面,曲面母线为高次曲线,为叙述方便,称之为“锥面”),作用是使光场与增益介质达到最佳的耦合;逆向反射锥面镜对和前向反射锥面镜对均由两个锥面镜组合而成,这两个锥面镜按各自位置的不同称为内部锥面镜(Inner Axicon)和外部锥面镜(Outer Axicon)。紧束段由一系列的平面反射镜和一个输出耦合镜组成,完成光场的旋转、反馈和输出。

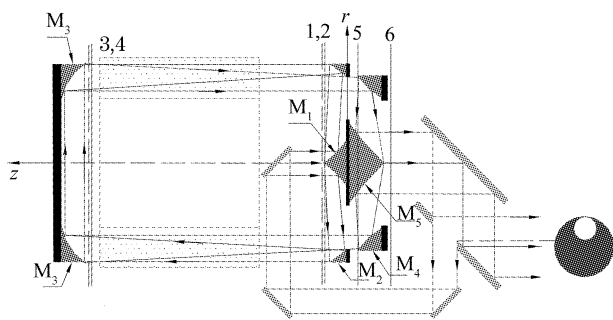


Fig. 1 Beam-converting annular resonator concept.

$M_1$ : waxicon inner cone;  $M_2$ : waxicon outer cone;  
 $M_3$ : rear cone;  $M_4$ : reflaxicon outer cone;  
 $M_5$ : reflaxicon inner cone; 1: waxicon input plane;  
 2: waxicon output plane; 3: rear cone input plane;  
 4: rear cone output plane; 5: reflaxicon input plane;  
 6: reflaxicon output plane

腔内光场传输如下:假设一实心光束从  $M_1$  处

入射到逆向反射锥面镜对的内锥镜处,经过两次反射后,实心光束变为环形光束,并呈发散状传输到后部锥面反射镜,环束光经过后部锥面反射镜后,旋转了  $180^\circ$ ,又以汇聚形式传输到前向反射锥面镜对的外锥镜上,经两次反射后,环形光束又变为实心光束,一部分经过输出镜输出,另一部分通过偏心小孔反馈,再次入射到逆向反射锥面镜对的内锥镜上。该腔结构上的特点决定了它具有很高的能量提取效率和模式鉴别能力,良好的抗失调能力,同时保证了镜面上光强分布较为均匀,可以最大限度避免热应力对镜面造成破坏<sup>[3]</sup>。

## 3 数值模拟方法

从数值模拟的角度将光场传输过程分为如下几个阶段(不同阶段的划分如图 1 所示):紧束段传输(参考平面 6~参考平面 1)、逆向反射锥面镜对的光强变换与相位移动(1~2)、环束段传输(2~3)、后部锥面反射镜光强变换与相位移动(3~4)、环束段传输(4~5)、前向反射锥面镜对的光强变换与相位移动(5~6)6 个阶段。针对不同传输阶段的特点,可以采用不同的处理方法。对空腔模的计算中,环束段和紧束段传输使用的均为积分方法。对于有源腔而言,特别是高能激光,采用积分法的薄层近似计算光场增益及传输是不合适的<sup>[4]</sup>;采用多层分布近似法虽然增益计算的可信度提高,但耗时巨大。为此,选用差分方法计算光场增益。光场在其他阶段的传输计算仍采用文献<sup>[3]</sup>的方法,这里不再赘述。

环束段中顺  $z$  轴传输的光场可以表示为

$$E = U(r, \theta, z) \exp(-ikz), \quad (1)$$

$\exp(-ikz)$  对应沿轴向快速变化的相位项。对  $U(r, \theta, z)$  使用缓变振幅近似,得到自由空间中,柱坐标系下的光场传输方程

$$\frac{\partial U^t(r, \theta, z)}{\partial z} = -\frac{i}{2k} \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial U^t(r, \theta, z)}{\partial r} \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U^t(r, \theta, z)}{\partial \varphi^2} \right\}. \quad (2)$$

用  $g(r, \theta, z)$  来表示增益介质的增益分布,  $\Delta n(r, \theta, z) = n(r, \theta, z) - 1$  来表示折射率分布的变化。采用 Rensch 所给的差分法计算有源腔光场的传输<sup>[5,6]</sup>:

$$U(r, \theta, z + \Delta z) = U^t(r, \theta, z + \Delta z) \times \exp \left\{ \left[ \frac{g(r, \theta, z)}{2} - ik \Delta n(r, \theta, z) \right] \Delta z \right\}, \quad (3)$$

$U^t(r, \theta, z + \Delta z)$  为按(2)式采用有限差分法计算的

光场传输到  $z + \Delta z$  处的场分布,再使用(3)式计算经历  $\Delta z$  的传输后得到的增益及由于介质折射率分布不均引起的相位变化。差分方程的离散使用 Rensch<sup>[5]</sup> 所给的 Dufort and Frankel 差分格式。

#### 4 增益介质对输出性能的影响

考虑采用高超音速低温喷管(Hypersonic low temperature nozzle, HYLTE)阵列的环形增益发生器<sup>[7,8]</sup>产生的高超音速 HF 增益介质流,气流方向沿径向  $r$  向外喷射,介质沿角向  $\theta$  的分布可以认为是不变的。为简单起见,所研究的增益介质只是  $r$  的函数,增益系数可以表示为<sup>[9]</sup>

$$g(r, \theta, z) = g_0 f(r) \left[ 1 + \frac{I(r, \theta, z)}{I_{\text{sat}}} \right]^{-1}, \quad (4)$$

$$\Delta n(r, \theta, z) = \Delta n_0 \cdot h(r), \quad (5)$$

其中  $g_0$  为小信号增益,  $I_{\text{sat}}$  为饱和光强,  $\Delta n_0$  为折射率变化的幅值,  $I(r, \theta, z)$  为光强,  $f(r)$ ,  $h(r)$  分别为增益曲线和折射率曲线。

使用以下五种线型参量来模拟高超音速 HF 化学增益介质,取  $g_0 = 0.106 \text{ cm}^{-1}$ ,  $I_{\text{sat}} = 200 \text{ W/cm}^2$ :

1)  $\Delta n_0 = 0$ , 均匀增益  $f(r) = 1$ ;

2)  $\Delta n_0 = \lambda/20$  线性折射率曲线:

$h(r) = 0.1 - 0.257(r - 20)$ , 均匀增益  $f(r) = 1$ ;

3)  $\Delta n_0 = 0$ , 抛物型增益曲线:

$f(r) = 1 - 0.3(r - r_0)^2$ ;

4)  $\Delta n_0 = \lambda/20$ , 线性折射率曲线, 抛物型增益曲线;

5)  $\Delta n_0 = \lambda/2$ , 高斯型折射率曲线:

$h(r) = \exp[-10(r - r_0)^2]$ , 均匀增益。

其中  $\lambda = 2.7 \times 10^{-6} \text{ m}$ ,  $r_0 = 18.5 \text{ cm}$  为增益区的中心。其中第四种情况代表了化学激光器增益分布的一般情况<sup>[10]</sup>, 第五种情况使用高斯函数代表高超音速气流中存在正激波<sup>[5]</sup>的情况。图 2 分别给出了线性折射率分布、高斯型折射率分布和抛物线

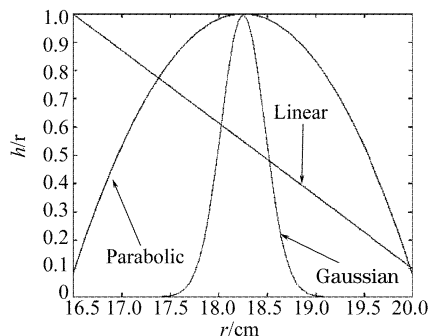


Fig. 2 Gain and refractive index profile

增益分布曲线。

对以上五种增益介质分布分别计算其输出光场近场分布,使用施特雷尔比来描述输出光场的光束质量<sup>[11]</sup>,施特雷尔比定义为:

$$S = 1 - \sigma_p^2,$$

$\sigma_p$  为前向反射锥面镜对输出平面上相位分布的标准差。与五种情况对应的施特雷尔比分别为 0.9865、0.9684、0.9896、0.9753、0.8991。

图 3 给出了五种情况下束变换环孔腔输出光场传输 50000 m 后归一化的远场分布,由于输出光场中 0 阶角向模的成分远大于其他阶角向模,远场衍射为轴对称分布,图 3 给出的是  $\theta = 0$  截面上的远场分布。

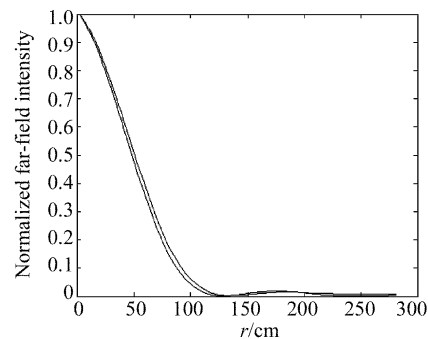


Fig. 3 Normalized far-field intensity for 5 cases

图中只能分辨出两条曲线,在中心处较低的曲线是正激波存在时,激光器输出的远场分布,另外一条是其余四种情况的远场分布,由于施特雷尔比非常接近,在图中无法区分。对超音速 HF 化学增益流而言,气流的不均匀性引起的光程差的幅值一般在  $\lambda/10 \sim \lambda/50$  之间<sup>[12]</sup>,我们计算中模拟了光程差幅值为  $\lambda/20$  的情况。由施特雷尔比可以看出,介质的增益分布对光束质量的影响是非常小的,同样的折射率分布,不同的增益分布,其施特雷尔比之差为  $10^{-3}$  数量级;折射率分布的变化对束变换环孔腔的输出光束质量影响比增益介质分布影响要大一些,同样增益分布,不同折射率分布之间,不存在较强烈的激波的情况下,输出光束的施特雷尔比之差为  $10^{-2}$  数量级。即使存在较强烈的正激波,光束质量的下降也很小,施特雷尔比与没有激波的情况相比下降了约 8%。因此,束变换环孔谐振腔对气体增益介质的不均匀性具有很好的补偿作用,可以有效抑制增益介质分布不均引起的光束质量下降。

图 4(a) 给出了均匀增益均匀折射率时的近场相位分布,图 4(b) 是正激波存在时的近场相位分布。可以看到由于激波存在,在激波附近相位发生了较明显的变化。

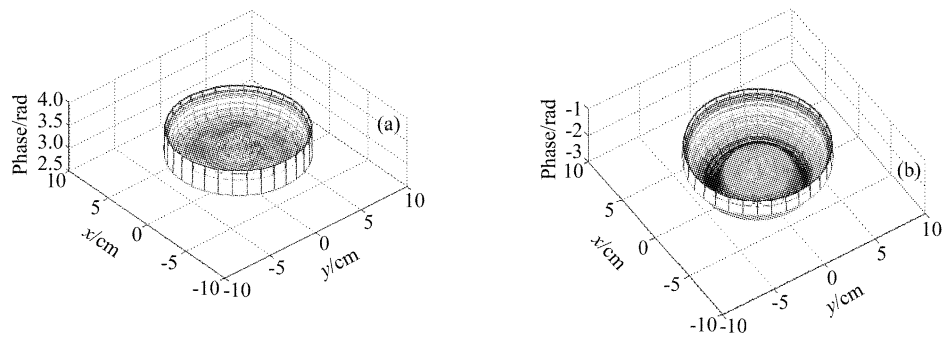


Fig. 4 Phase distribution with uniform medium (a) and shock wave (b)

图 5(a)给出了均匀增益、均匀折射率分布时的近场光强分布,图 5(b)为抛物型增益分布、均匀折射率分布时近场光强分布,图 5(c)为抛物型增益分布、线型折射率分布时的近场光强分布,图 5(d)为均匀增益、存在高斯型正激波时的近场光强分布。比较图 5(a)和图 5(b),增益分布的变化确实使近场光强分布发生了变化,但两种情况下光强分布仍然没有出现较明显的峰值,分布比较均匀,意味着整个

镜面热负荷均匀,这一点对高能激光器是很有意义的,可以最大限度降低镜面由热应力引起的变形和损坏。在输出平面的中心,光强分布比其他地方弱得多,这样可以避免前向反射锥面镜对尖端承受太大的热负荷。因此,增益分布的变化虽然可以影响光强分布,但光强仍然可以维持合理的分布,束变换环孔腔仍然能够降低热应力对镜面的不利影响。

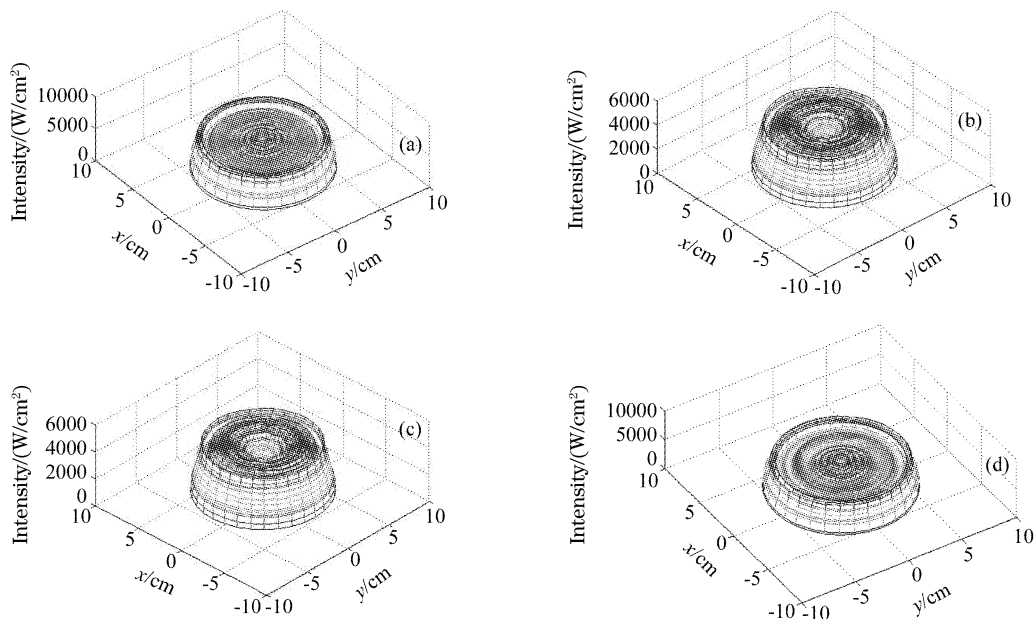


Fig. 5 Intensity distribution for 4 cases. (a) With uniform gain and uniform refractive index, (b) with parabolic gain and uniform refractive index, (c) with parabolic gain and linear refractive index, (d) with uniform gain and shock refractive index

对一般的高超音速 HF 增益流,折射率分布的变化对束变换环孔腔的近场光强的影响也是很小的。图 5(b)和图 5(c)的增益分布都是抛物型,折射率分布不同,近场光强分布的变化非常小。比较图 5(a)和图 5(d),两者增益分布相同,前者为均匀折射率分布,后者存在激波,对应的光强分布有所变化,但光强分布在中心处仍然很弱,在其余位置没有

明显的峰值。

由于增益分布的不同,激光器输出的峰值光强有所变化。均匀增益分布时, $g_0 = 0.106 \text{ cm}^{-1}$ ,输出的峰值光强在  $5800 \text{ W/cm}^2$  附近,随折射率分布的不同稍有变化;抛物型增益分布时,增益沿径向从  $0.106 \sim 0.01$  变化,因而激光器输出能量下降,输出的峰值光强在  $4700 \text{ W/cm}^2$  左右。

**总结** 上述增益介质的模型代表了超音速 HF 化学增益介质的主要特点, 我们的计算结果显示, 束变换环孔激光谐振腔能够克服增益介质分布不均匀性带来的负面影响, 可以克服超音速气流中激波对输出性能的影响, 使输出光束质量保持在较高的水平, 具有很高的稳定性; 同时腔镜上光强分布较为均匀, 中心处很弱, 可使各镜面热负荷合理, 有利于保护镜面。这些正是束变换环孔腔特有的突出优点。同时也可以看到, 束变换环孔腔不仅适用于采用环形增益介质的高能化学激光器中, 由于其对增益介质不均匀性引起的光束质量下降具有很好的抑制作用, 性能稳定, 输出光束质量高, 光强分布均匀, 束变换环孔腔也可以用于任何使用环形增益介质的高能激光器中, 以获得高质量的稳定的输出。

#### 参 考 文 献

- 1 Wade Richard C. Annular resonators for high-power chemical lasers. *Proc. SPIE*, 1993, **1868**: 334~360
- 2 Horkovich J A. Recent advances in the ALPHA High Power Chemical Laser Program. AIAA 97-2409: 23~45
- 3 Liu Wenguang, Lu Qisheng, Liu Zejin. Design and analysis of beam-converting annular resonator. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2004, **24**(4): 485~490 (in Chinese)
- 4 Du Yanyi. Stimulation of beam using more gain segments method in confocal unstable resonators. *High Power Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束), 2000, **12**(3): 433~436 (in Chinese)
- 5 Rensch D B. Three-dimansional unstable resonator calculations with laser medium. *Appl. Opt.*, **1974**, **13**(11): 2546~2561
- 6 Wei Zaifu, Wang Runwen, Wang Zhijiang. Numerical analysis of mode-field of Unstable Ring Resonator with 90° beam rotation. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1995, **15**(11): 698~702 (in Chinese)
- 7 Lohn P D, Haflinger D E, Fink S F. Fluid dynamics design for space based laser. AIAA 99-3574:57~68
- 8 Graves B, Patterson S, Betts J *et al.*. HYLTE self cooled module test results. AIAA 2000-2493:1~9
- 9 Gao Huide, Dong Yunhua, Li Qi. Numerical analysis of output mode of UR90 unstable ring resonator. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1996, **16**(12): 1704~1707 (in Chinese)
- 10 Yuan Shengfu, Hua Weihong, Jiang Zongfu. Performance analysis of small continuous wave DF chemical laser with HYLTE nozzle. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2003, **30**(4): 295~299 (in Chinese)
- 11 Tang Bin, Leng Yuxin, Peng Hanlin *et al.*. The deformable mirror method of adaptive phase correction. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(7): 432~436
- 12 Zelazny S W, Chambers W A, van Tassell W F *et al.*. Medium induced aberations in CW HF chemical lasers. *Proc. SPIE*, 1981, **293**: 126~132