

# 束变换环孔激光谐振腔的设计与分析

刘文广 陆启生 刘泽金  
(国防科技大学理学院, 长沙 410073)

**摘要:** 分析了束变换环孔激光谐振腔的特点和优势,给出了这种复杂激光谐振腔的设计原理。对采用该方法设计的激光谐振腔空腔模式进行了计算和分析,并使用自行编写的三维光线追迹程序对这种腔的稳定性也进行了研究,结果表明这种谐振腔输出光场分布合理,相位均匀,远场分布接近衍射极限,并且这种腔对于扰动在一定范围内具有抑制能力,是一种研究价值很高的非稳腔。此外针对该腔提出的设计及模式计算方法对其他复杂腔型也具有一定的参考价值。

**关键词:** 激光技术;束变换环孔激光谐振腔;环柱形增益介质;设计;模式计算  
中图分类号: TN248 文献标识码: A

## Design and Analysis of Beam-Converting Annular Resonator

Liu Wenguang Lu Qisheng Liu Zejin

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

(Received 5 December 2002; revised 21 July 2003)

**Abstract:** A design method of beam-converting annular resonator is presented. And the bare cavity modes of this resonator are calculated, the advantages of beam-converting annular resonator are analysed. The cavity's stability is also studied with home-made three-dimensional ray tracking program. It showed that beam-converting annular resonator is a valuable resonator with high extraction efficiency and near-diffractive-limit optical quality, and can sustain certain disturbance. The methods presented are also valuable to the design and calculation of other complex laser resonators.

**Key words:** laser technique; beam-converting annular resonator; annular gain medium; design; mode calculation

## 1 引 言

采用环柱形增益介质的氟化氢(HF)、氟化氘(DF)化学激光器从 1974 年起就一直倍受关注。化学激光器如果采用传统的线形增益介质会面临许多问题<sup>[1]</sup>:由于增益介质能量密度低,要获得满足需要的输出功率,增益介质的长度大约要在 20 m 左右。而 HF/DF 增益区宽度只有 3~5 cm,长度却高达 20 m,这样的增益分布一方面会增加镜面之间无用的衍射损耗,另一方面光场受增益介质不均匀性的影响也会加大,造成输出光束质量下降;就镜面的加

工来说,当镜面纵横比 $>10$ 时,难以达到加工精度,而且谐振腔对腔镜的失调十分敏感。而采用环柱形增益介质就可以在同样输出功率情况下,大大缩短增益介质长度,相应的可以获得高质量的输出光束,同时使整个激光系统结构紧凑合理,减小激光器的体积。

环孔谐振腔(Annular resonators)是一类适于环柱形增益介质的谐振腔,有许多不同的结构<sup>[1]</sup>,如具有内锥镜的半对称非稳腔(HSURIA, half symmetric unstable resonator with internal axicon)、环面非稳腔(TUR, toric unstable resonator)、高阶角向模非稳腔(HAMUR, high azimuthal mode unstable resonator)、单光轴环孔非稳腔(SARAD, single axis resonator for annular

E-mail: lwg. kevin@163. com

收稿日期:2002-12-05;收到修改稿日期:2003-07-21

devices) 等。束变换环孔激光谐振腔 (beam-converting annular resonator) 是环孔谐振腔中性能最为优秀的一种谐振腔。这种概念的谐振腔最早由 TRW 公司设计, 此后不断完善, 得到大量理论与实验研究, 被证明是一种高性能的激光谐振腔<sup>[1,2]</sup>, 对我国激光器研究发展具有很高的借鉴价值。Murphy 和 Bernabe<sup>[3]</sup> 曾经对 HSURIA 的空腔模式作了计算, Chodzko 等<sup>[4]</sup> 和 Guha 等<sup>[5]</sup> 分别对 HSURIA 的偏振混合效应作了实验研究; Morin 等<sup>[6]</sup> 对 TUR 空腔模式进行了数值模拟; Taichirod<sup>[7]</sup> 对使用卡塞格伦 (Cassegrain) 望远镜的环孔腔作了研究。然而, 由于 TRW 公司技术保密的原因或腔本身的复杂性, 有关束变换环孔谐振腔设计方法及其参量的报道在国内外期刊杂志上均未发现。本文分析了这种适于环柱形增益介质的束变换环孔激光谐振腔的特点和优势, 在此基础上, 使用等光程原理设计了这种复杂激光谐振腔, 并使用波动光学原理计算和分析了这种谐振腔的模式特点, 使用自行编写的三维光线追迹程序对这种腔的稳定性进行了研究, 结果表明这种谐振腔具有良好的输出光束质量, 并且对于扰动在一定范围内具有抑制

能力。

## 2 束变换环孔激光谐振腔特点

束变换环孔激光谐振腔是一种针对环柱形增益介质设计的具有高能量抽取效率和近衍射极限输出光束质量的激光谐振腔, 它的纵剖面结构如图 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)、锥面反射镜 (Rear cone) 和前向反射锥面镜对 (Refluxicon) 组成 (这里所说的“锥面”实际上是外形接近锥面的高次曲面, 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, 完成光场的反馈和输出。

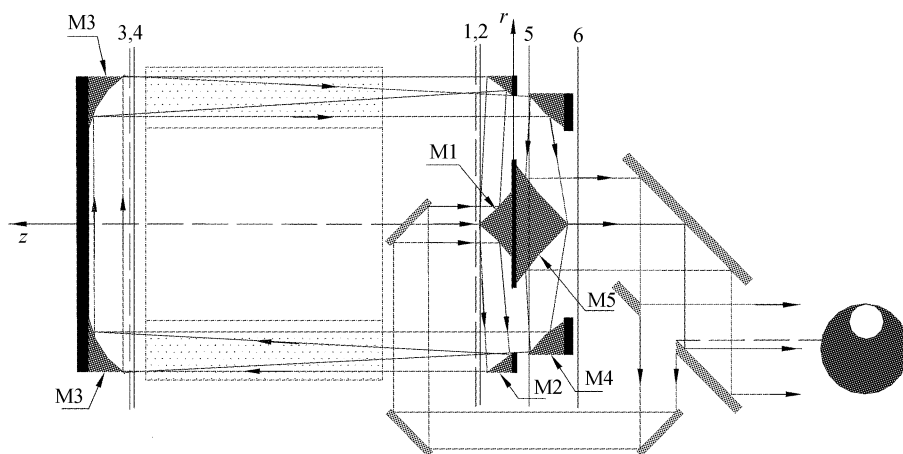


Fig. 1 Beam-converting annular resonator concept. M1: Waxicon inner cone; M2: Waxicon outert cone; M3: Rear cone; M4: Refluxicon outer cone; M5: Refluxicon inner cone; 1: Waxicon input plane; 2: Waxicon output plane; 3: Rear cone input plane; 4: Rear cone output plane; 5: Refluxicon input plane; 6: Refluxicon output plane

这种腔设计上的独特之处是大量采用了外形接近锥面的非球面反射镜来控制光场, 使之与环柱形增益介质匹配。在第一次通过增益介质时, 光场为发散球面波的形式, 有利于本征模式最大限度的占据增益介质, 增强竞争能力, 在腔内迅速形成本征模式。一般来说, 高功率激光器希望光场在增益介质中均能以发散球面波的形式传输<sup>[8]</sup>, 但在束变换环孔腔中, 光场第二次通过增益介质时, 却变为会聚球

面波, 这样设计是为了避免光场受到逆向反射锥面镜对的外部锥镜的遮挡; 束变换环孔腔的另一大特点是采用了偏心反馈, 反馈光束的中心与输出光束的中心并不重合。这样的设计可以降低整个激光谐振腔对失调的灵敏度<sup>[1]</sup>, 同时也使得谐振腔的光轴只有一条, 极大的改善了使用环柱形增益介质的激光谐振腔角向模式的鉴别能力。另外这样的设计还可以避免光场最强的部分落在锥面镜尖端造成对镜

面的破坏<sup>[1]</sup>。

### 3 束变换环孔腔设计原理

#### 3.1 环束段设计原理

从几何光学观点来看,束变换环孔腔的各个腔镜都是对远轴物点和远轴光线成像,所以这种谐振腔的设计中,近轴光学的公式显然不再成立。为了控制光场与增益介质相匹配,环束段中各个腔镜的设计既要使光束按要求的方向行进,又要使光束扩散或会聚的角度满足要求;更重要的是必须保证光束经各个镜面反射后能保持光束质量不被破坏,从成像的观点来看就是不引入像差或少引入像差。为实现以上功能,只有采用复杂的非球面反射镜。

环束段中,各反射镜面都是旋转对称曲面。在柱坐标系下,曲面函数可以表示为  $n$  次曲面<sup>[9]</sup>

$$z(r) = \sum_{i=0}^n a_i r^i. \quad (1)$$

按一般非球面系统设计方法<sup>[9]</sup>,即使将非球面的阶数限制在  $n = 4$ ,每个镜面有 5 个待定系数,而整个环束段由 5 个非球面镜组成,设计环束段所需的待定系数就有 25 个。如此多的待定系数将使系统

设计非常复杂。

然而,由于束变换环孔腔使用的全部是反射型光学元件,色差可以不用考虑;另外,环束段中的腔镜关于腔中心轴线是对称的,故我们在设计时只需考虑控制一个平面内的像差;由前面所描述的光场在环束段内的传播特点,我们只要使光束经每一镜面反射后能保持单心性即可(由于镜面具有绕腔中心轴的旋转对称性,我们在设计中所说的“镜面”指的是镜面的母线,单心性是在包含镜面母线的平面内而言的)。这样,对系统设计的像差约束就只剩下单心性一项。针对束变换环孔腔的这些特点,我们在设计束变换环孔腔时使用等光程原理,如图 1 所示。令入射到 M1 上的光束为平行光,通过计算机搜索各镜面的最佳位置,使之经 M1、M2、M3、M4 反射后光束保持单心性,从 M5 出射的光为平行光。镜面 1、镜面 5 可以用抛物面实现,如图 2 所示,镜面 2、镜面 3、镜面 4 计算机搜索得到的是数值解,我们为了以后进行光线追迹和模式计算的方便,对各镜面的离散点进行了多项式的拟合,镜面 2、镜面 3 拟合为 4 阶多项式,镜面 4 拟合为 6 阶多项式,这种拟合并不影响输出光束的平行性。

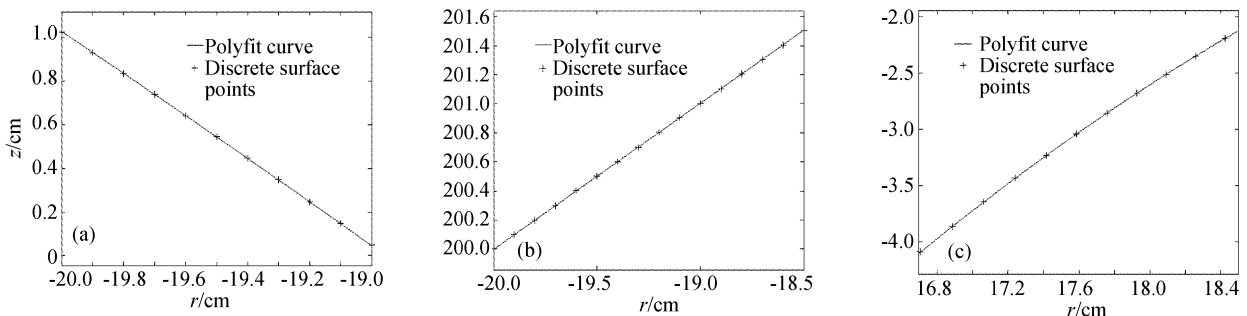


Fig. 2 Discrete surface points and polyfit curves of mirrors. (a) mirror 2, (b) mirror 3, (c) mirror 4

#### 3.2 紧束段的设计

紧束段的设计均采用平面镜,其中用于反馈光路的平面镜的数目、布局会影响光束的翻转。在本文中,反馈光路使用了四片平面反射镜,光束不发生翻转。反馈光路的长度会影响到紧束段的衍射损耗,我们以后将根据增益介质的特点使用物理光学模型进一步的讨论它对谐振腔模式的影响。输出耦合镜的反馈孔径中心的位置和大小也是设计中需注意的地方。系统的稳定性与反馈孔径的位置有关,输出能量与反馈孔的大小有关,它们对腔性能的影响我们将在以后作进一步的研究。

## 4 束变换环孔激光谐振腔空腔模式计算与分析

#### 4.1 紧束段和环束段的传输

我们从数值计算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)、逆向反射锥面镜对变换(1~2)、环束段传输(2~3)、锥面反射镜变换(3~4)、环束段传输(4~5)、前向反射锥面镜对变换(5~6)6 个阶段。针对不同传输阶段的特点,进行数值计算时可以采用特殊的处理方法和计算方法。

在紧束段光场以实心光束传输,光场可表示为

$$U(r, \theta) = \sum_m U_m(r) \exp(jm\theta),$$

$$m = \dots, -1, 0, 1, \dots \quad (2)$$

经过距离为  $L$  的传输后场分布为

$$U'(\rho, \phi) = \frac{2\pi}{\lambda L} \exp(jkL) \sum_m \int_0^a U_m(r) j^{m+1} J_m\left(\frac{2\pi}{\lambda L} \rho r\right) \times$$

$$\exp\left[\frac{j\pi}{\lambda L}(\rho^2 + r^2)\right] r dr \exp(jm\phi), \quad (3)$$

式中  $a$  为入射场实心光束的半径,  $J_m$  为  $m$  阶的贝塞尔函数(第一类)。这样的积分可以使用快速汉开尔(Hankel)变换进行快速计算。

环束段光场呈薄环状分布, 其传输满足

$$U'_m(\rho, \phi) = \int_a^b U_m(r) j^{m+1} J_m\left(\frac{2\pi}{\lambda L} \rho r\right) \times$$

$$\exp\left[\frac{j\pi}{\lambda L}(\rho^2 + r^2)\right] r dr \exp(jm\phi), \quad (4)$$

其中  $a$  是环的内径,  $b$  为外径。在环束段, 环的内外径数值较大, 积分核沿径向的变化非常快, 这使得进行数值计算时必需大量的抽样点, 计算速度非常慢, 成为严重限制整个程序执行速度的瓶颈。为此, 需要进行近似处理。环束段传输的近似公式为<sup>[3]</sup>

$$\sqrt{\rho} U'_m(\rho, \phi) = \exp(jm\phi) \sqrt{\frac{j}{\lambda L}} \int_a^b \sqrt{r} U_m(r) \times$$

$$\exp\left[j \frac{\pi}{\lambda L}(\rho - r)^2\right] dr, \quad (5)$$

对束变换环孔腔来说,  $|\rho - r|$  一般为几个厘米, 进行数值计算所需抽样点个数大幅度减少, 而且积分很明显是一个卷积形式, 可以使用快速傅里叶变换进行计算。

#### 4.2 逆向反射锥面镜对, 锥面反射镜, 前向反射锥面镜对传输的计算

计算光场在逆向反射锥面镜对, 前向反射锥面镜对, 锥面反射镜中的传输时, 如果使用物理光学方法, 由于传输距离短, 涉及镜面面形复杂, 因而对应的衍射积分形式复杂, 且积分核振荡剧烈, 计算耗时巨大。鉴于光场在这些传输区间的传输距离相比紧束段和环束段来说短得多, 我们认为使用几何光学原理来描述光场的传输是可行的。以逆向反射锥面镜对为例, 光场从输出平面 6 到逆向反射锥面镜对入射平面 1 的传输使用(3)式进行计算, 得到逆向反射锥面镜对入射面上的场分布, 对该场上的一点  $P(r, \theta, z)$ , 设场值为  $E(r, \theta, z)$ , 理想情况下, 该点光线对逆向反射锥面镜对入射面的入射角为  $90^\circ$ , 使用光线追迹的方法, 得到逆向反射锥面镜对出射平面上的点坐标为

$P'(r', \theta', z)$ , 该点处光线从逆向反射锥面镜对入射面到出射面的光程可以计算, 设为  $L_{OP}$ ; 设逆向反射锥面镜内镜在入射面上的投影为  $S$ , 逆向反射锥面镜外镜在出射面上的投影为  $S'$ , 按照能量守恒原理, 可得  $P'$  处场值为

$$E'(r', \theta', z) = \sqrt{S/S'} E(r, \theta, z) \exp(ik \cdot L_{OP}),$$

然而, 必须注意到光场在逆向反射锥面镜对和 RearCone 段传输时, 偏振态会发生变化<sup>[10]</sup>。我们把光场偏振态以笛卡尔坐标系下的琼斯矩阵表示为

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = E_x \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + E_y \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

为简单起见, 我们假设这些元件对不同偏振方向的入射光反射率均为 1, 且反射前后不引入附加相位变化, Tyler 和 Southwell<sup>[11]</sup> 给出了光场经逆向反射锥面镜对或锥面反射镜偏振态的变化为

$$\begin{bmatrix} E'_x \\ E'_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos 2\theta & -\sin 2\theta \\ -\sin 2\theta & \cos 2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中  $\theta$  为柱坐标系下角向坐标(柱坐标系如图 1 标示)。可见, 经过这些元件后,  $x$  方向的偏振与  $y$  方向的偏振发生耦合, 这种现象称为偏振混合<sup>[1, 10]</sup>(Polarization mixing)。一般情况下前向反射锥面镜对元件不会引起偏振态的变化<sup>[11]</sup>。

#### 4.3 空腔模计算结果

初始令从虚反馈孔出发的光场为均匀振幅的平面波, 光场为线偏振, 沿  $x$  方向和  $y$  方向的偏振分量相同。我们使用普通的 Fox-Li 迭代方法, 迭代 34 次收敛, 得出了束变换环孔腔的空腔模式。

图 3(a) 为  $x$  方向偏振光在逆向反射锥面镜对出射面上的光强分布, 图 3(b) 为  $y$  方向偏振光在逆向反射锥面镜对出射面上的光强分布, 可以看到由于逆向反射锥面镜对的偏振混合作用, 不同偏振态的光场分布不同, 也就是说在光场不同点上, 由于  $x$  方向的偏振分量和  $y$  方向的偏振分量不同, 各点的偏振方向发生了变化, 不再是初始的偏振方向, 但仍为线偏振光。图 3(c) 是前向反射锥面镜对输出平面上的光强分布, 此时不同偏振方向的光场分布是相同的。这是因为经过锥面反射镜的又一次偏振变换, 恰好抵消了以前逆向反射锥面镜对造成的偏振混合效应, 而前向反射锥面镜对不引入偏振混合。这样经过锥面反射镜后, 到达前向反射锥面镜对的光场各点又恢复了原先的偏振方向。

束变换环孔腔为非稳腔, 从反馈孔径开始, 光场每完成一周往返, 到达输出平面的光束尺寸得到了放大。图 3(d) 为前向反射锥面镜对输出平面上的相位

分布,代表了谐振腔的输出特性,从图 3(d)中可以看出该腔的空腔模式相位分布均匀,沿角向变化非常缓慢。表明该自再现模为低阶角向模式<sup>[4]</sup>;我们把输出光场  $U(r, \theta)$  按(2)式进行模式分解<sup>[4]</sup>

$$U(r, \theta) = \sum_m U_m(r) \exp(im\theta),$$

$$m = 0, 1, 2, \dots, 63$$

$U_m(r)$  代表  $m$  阶角向模。令  $P_m(r) = U_m(r) \cdot U_m(r)^*$  为  $m$  阶角向模的谱强度,归一化谱强度,得到  $m = 0$  时  $P_m$  为最大值 1,第二最大值出现在  $m = 4$  处,此时

谱强度为  $10^{-35}$  量级。所以该腔的空腔模式为 0 阶角向模,从而远场聚焦能力强<sup>[12]</sup>。由图 3(c)可见,光强在边缘和中心都很弱,可以避免前向反射锥面镜对尖端因光功率密度过大而造成破坏<sup>[13]</sup>。这正是束变换环孔腔采用偏心反馈小孔带来的好处:高角向模式鉴别能力,低的锥形镜面尖端热负荷。而其他环孔腔由于没有采用偏心反馈,都存在角向模式鉴别力低而引起的多角向模并存,从而使远场聚焦能力降低<sup>[1]</sup>。

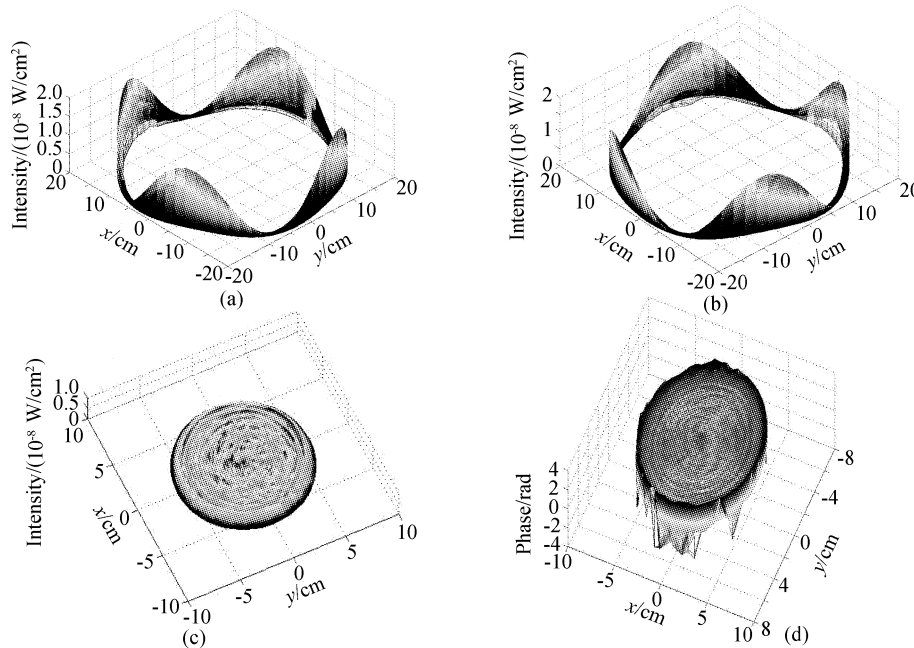


Fig. 3 Intensity and phase distribution on different plane. (a) Intensity distribution on Waxicon output plane ( $x$  polarized); (b) Intensity distribution on Waxicon output plane ( $y$  polarized); (c) Intensity distribution on Reflexicon output plane; (d) Phase distribution on Reflexicon output plane

我们假设该腔理想的输出为一与实际输出能量相同的等幅平面波,分别计算实际输出光场与理想输出光场自由传输 5000 m 后的远场衍射分布。从图 4 可以看出,输出光场的远场衍射接近理想情况,可以说光束质量接近衍射极限。

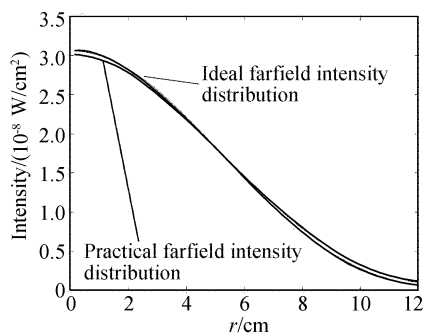


Fig. 4 Ideal intensity distribution vs practical

#### 4.4 束变换环孔腔的稳定性

为简单起见,我们使用光线追迹的方法考察镜面倾斜对腔的影响。图 5 所示为紧束段镜面倾斜一微小角度  $d\theta=0.01$  mrad 时,谐振腔输出光束的出射角随反馈次数的变化(出射角定义为输出光束与

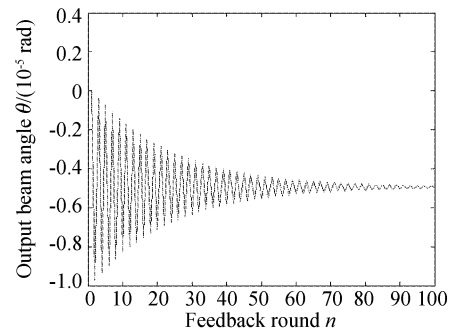


Fig. 5 Output beam angle vs feedback

$r$  轴的夹角)。可以看出,此时谐振腔输出光束的出射角随反馈次数的增加收敛到一稳定值,也就意味着腔能克服此扰动而保持稳定的输出。与常规非稳腔相比,由于束变换环孔激光谐振腔采用了锥面反射镜作为反射镜面,因而可以克服奇数阶相差引起的激光器输出性能的下降<sup>[1]</sup>,因此这种腔相对普通非稳腔而言对腔失调灵敏度小。束变换环孔腔主要用于高能化学激光器中,增益介质为高超音速气流,增益分布和折射率分布很不均匀,而使用环形增益的束变换环孔腔由于其优越的抗腔失调性能,从而也可以克服增益介质不均匀引起的激光器输出性能的下降。而采用线性增益介质的普通腔就无法克服气体增益介质不均匀带来的不利影响。

同时也应看到,束变换环孔腔的结构复杂,镜面面型复杂,对于设计、加工和装配技术<sup>[14]</sup>要求都很高。这是束变换环孔腔最大的缺点。

**小结** 本文给出了束变换环孔谐振腔的设计原理,并计算了这种腔的空腔模式和讨论了该腔的稳定性,从理论上证实了这种腔的可实现性和突出的优点:具有很高的角向模式鉴别能力,输出光束质量接近衍射极限,且对倾斜扰动具有抑制能力,能量抽取效率高,特别适合环柱形增益介质,结构紧凑合理。这种腔的设计概念对我国激光器件的研制发展具有很高的借鉴价值。

### 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 Murphy W D, Bernabe M L. Numerical procedures for solving nonsymmetric eigenvalue problems associated with optical resonators. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(15):2358~2364
- 4 Chodzko R A, Mason S B, Turner E B *et al.*. Annular (HSURIA) resonators: some experimental studies including polarization effects. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(5):718~789
- 5 Guha J K, Kohler D, Mickish R *et al.*. Performance of an annular resonator with a polarizer in the annular log. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(23):4135~4140
- 6 Michel Morin, Pierre-A. Belanger. Diffractive analysis of annular resonators. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(12):1942~1947
- 7 Taichiro Tamida, Jun-ichi Nishimae. Annular resonator with a Cassegrain configuration. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(24):5844~5848
- 8 Siegman A E. *Lasers*. California: University Science Books, 1986
- 9 Wang Yongzhong. *Computer Design of New Optical Systems* (新光学系统的计算机设计). Beijing: Science Press, 1993 (in Chinese)
- 10 Fink D. Polarization effects in axicons. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(2):581~582
- 11 Tyler G A, Southwell W H. Synthesis of the vector resonator modes from scalar results. *Opt. Lett.*, 1980, **5**(2):42~44
- 12 Wang Qi, Yu Xin, Wang Yuezhu *et al.*. Improvement of beam quality of polarex cavity with SBS. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(10):1255~1258 (in Chinese)
- 13 Xu Qiao, Gu Yuanyuan, Cai Lin *et al.*. Measurement of wavefront power spectral density of large optical component. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(3):344~347 (in Chinese)
- 14 Li Zhi, Zhao Yang, Li Dacheng *et al.*. A diffractive long trace profiler for large aspherical optics. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(10):1225~1227 (in Chinese)