

文章编号: 0258-7025(2005)06-0803-07

# 光束变换环形孔径谐振腔的失调特性分析

刘文广, 陆启生, 刘泽金

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 光束变换环形孔径激光谐振腔(BCAR)是适用于环形增益介质的高性能谐振腔,已成功应用到高能连续波 HF 化学激光器中。建立了光束变换环形孔径激光谐振腔镜面倾斜及非共轴的数学模型,在此基础上,使用积分和差分结合的计算方法,计算了失调腔的输出光场近场分布,分析了束变换环孔腔在镜面失调情况下的模式特征,以及对远场传输能力的影响。计算结果表明,非共轴偏移和紧束段倾斜将使输出光场的相位分布呈现剪切、扭曲现象,并且沿偏移方向出现相位跳变;随偏移量的增大,相位畸变严重,远场传输能力下降。不同的偏移方向对于输出光场影响差别很小。两者相比,非共轴偏移对输出光场质量的影响更为严重,而紧束段倾斜的影响相对而言非常小,表现在相位分布的扭曲现象不明显,谐振腔的能量抽取效率变化微弱。

**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; 环形增益介质; 失调腔

**中图分类号** TN243 **文献标识码** A

## Misalignment Characteristic Analysis Beam-Converting Annular Resonant Cavity

Liu Wen-guang, Lu Qi-sheng, Liu Ze-jin

(College of Photon-Electron Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**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. In this paper, numerical model of rear cone misalignment and compact leg tilt is presented, and this numerical model has been used in physical optics code. The numerical result shows that the output power is insensitive to rear cone decentration and compact leg tilt, but beam quality is very sensitive to the decentration and tilt. The rear cone decentration and compact leg tilt can both result in a phase shear and twist on the optical field, and lead to phase jump and tilt along the misalignment direction. When the misalignments increase, the phase distribution of BCAR output field is twisted more severely. The directions of misalignments have little effects on the output field. Among these misalignments, rear cone decentration has more severe effect on the output field, and it must be controlled carefully in engineer.

**Key words** laser technique; high energy laser; chemical laser; laser resonant cavity; beam-converting annular resonator; annular gain; misalignment

## 1 引 言

光束变换环形孔径激光谐振腔(BCAR)是一种适于环形增益介质、高功率化学激光器的具有高抽取效率和高光束质量的非稳腔,20 世纪 80 年代中期由美国 TRW 公司设计完成。1989 年 4 月,使用光束变换环形孔径激光谐振腔的 Alpha 激光器第一次实现高功率输出,功率达到兆瓦级<sup>[1]</sup>,到 1997 年共进行了 20 多次高能激光实验,此后不断完善,

进行了大量的理论与实验研究,被证明是一种高性能的激光谐振腔<sup>[2~4]</sup>,对我国激光器的研究发展具有很高的借鉴价值。

我们曾经使用等光程原理设计了这种复杂的谐振腔,使用积分和差分结合的方法,研究了不同增益介质分布对谐振腔模式的影响<sup>[5,6]</sup>,数值模拟的结果证实了文献[1]中对该腔模式特点的评价:光强分布合理,光束质量接近衍射极限,对增益介质的不均

收稿日期: 2004-05-24; 收到修改稿日期: 2004-07-18

作者简介: 刘文广(1978—),男,国防科技大学光电科学与工程学院博士研究生,主要从事激光谐振腔及高能化学激光器增益发生器的研究。E-mail: lwg.kevin@163.com

匀性具有很好的补偿作用,适合高能激光系统使用。然而,束变换环孔腔的镜面面形和结构复杂,加工和装配的精度对于谐振腔性能的影响是实际工作中必须考虑的问题。束变换环孔腔使用环形的类锥体镜面作为谐振腔镜面,对其建立合适的失调腔的数学模型是比较困难的。V. I. Volkov<sup>[7]</sup>曾经对使用后向反射锥面镜组的半对称非稳腔(HSURIA)的失调特性作了数值模拟,然而文中没有给出失调腔的数学模型,原因不明;Chun-Ching Shih<sup>[8]</sup>针对束变换环孔腔的加工和装配的实际情况,给出了一个光场偏移模型的原理性叙述,据报道已用于 TRW 公司的专用数值模拟软件 CROQ 中,并取得了很好的效果。但 Chun-Ching Shih 的文章中并没有给出数学模型,可能是出于技术保密的原因。

本文建立了束变换环孔腔镜面失调的数学模型,运用到我们开发的束变换环孔腔的数值分析软件中,对束变换环孔腔失调情况下的输出特性进行了数值模拟,分析了各种情况下输出光场的特点,从而对加工和装配的精度要求提供了参考。我们把本文结果与文献[8]的相关结论作了比较,以此也验证了分析软件的正确性。

## 2 失调腔的数学模型

### 2.1 引起束变换环孔腔失调的主要因素

设计的束变换环孔激光谐振腔如图 1 所示。分为环束段和紧束段两大部分。环束段由后向反射锥面镜组、后部锥面反射镜和前向反射锥面镜组构成(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;后向反射锥面镜组和前向反射锥面镜组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和外部锥面镜。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<sup>[5,6]</sup>。

腔内光场传输如下:假设一实心光束从  $M_1$  处入射到后向反射锥面镜组的内锥镜处,反射后,又到达后向反射锥面镜组的外锥镜上;再次反射后,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组的外锥镜上,反射后,又到达前向反射锥面镜组的内锥镜上;再次反射后,环形光束又变为实心光束,一部分经过输出耦合镜输出,另一部分通过偏心反馈孔,进入紧

束段,经过一系列平面镜后,再次入射到后向反射锥面镜组的内锥镜上。该腔结构上的特点决定了它具有很高的能量抽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,可以最大限度地避免热应力对镜面造成破坏<sup>[6]</sup>。

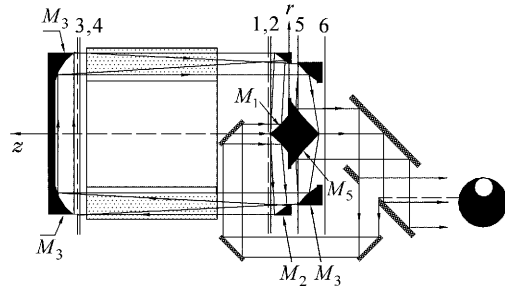


图 1 束变换环孔腔结构图

$M_1, M_2$ : 逆向反射锥面镜组的内锥镜,外锥镜;  $M_3$ : 后部锥面反射镜;  $M_4, M_5$ : 前向反射锥面镜组的外锥镜,内锥镜; 1, 2: 后向反射锥面镜组的入射面,出射面; 3, 4: 后部锥面反射镜的入射面,出射面; 5, 6: 前向反射锥面镜组的入射面,出射面

Fig. 1 Beam-converting Annular Resonator concept

$M_1$ : Waxicon inner cone;  $M_2$ : Waxicon outer cone;  $M_3$ : Rear cone;  $M_4$ : Reflexicon outer cone;  $M_5$ : Reflexicon inner cone; 1: Waxicon input plane; 2: Waxicon output plane; 3: Rear cone input plane; 4: Rear cone output plane; 5: Reflexicon input plane; 6: Reflexicon output plane

束变换环孔腔镜面数目众多,面形复杂,引起失调的原因也是非常多的,因而进行全面的分析非常困难。紧束段均为平面反射镜,考虑到它们的尺寸足够大,所以引起谐振腔失调的主要原因为多个镜面之间相对倾斜角度的误差,从而使入射到后向反射锥面镜组内锥镜上的光束不再是正入射,而是引入了一个倾斜的相位分布,倾斜量为非轴对称分布,而环束段中的光学反射元件为轴对称分布;这样必然会对谐振腔产生较大的影响。环束段中,可能造成失调的原因是各个环形光学反射镜面加工误差,后部锥面反射镜相对后向反射锥面镜组/前向反射锥面镜组镜面产生倾斜,以及后部锥面镜的旋转对称轴与后向反射锥面镜组/前向反射锥面镜组的旋转对称轴不重合,而是相互产生了微小的偏移,为叙述方便起见,我们称之为非共轴偏移。由于后向反射锥面镜组和前向反射锥面镜组的内锥镜是在同一毛坯上加工的<sup>[9]</sup>,因此这二者之间的偏移可以忽略。Chun-Ching Shih<sup>[8]</sup>指出,后部锥面镜的特点决定了束变换环孔腔对后锥面镜的倾斜是“极其”不敏感的,而对偏移非常敏感。镜面面形的加工误差对谐振腔的性能也有影响,但对其建立合适的模型非常

困难。因此,本文研究将集中于紧束段中镜面倾斜和环束段中后部锥面镜相对后向反射锥面镜组/前向反射锥面镜组非共轴偏移造成的腔失调对激光器输出性能的影响。

## 2.2 数学模型

紧束段中,造成谐振腔失调的主要因素是多个平面镜间相对倾斜角度的误差的累积,使光束不再为正入射,其入射角可表示为 $(\cos \theta, \cos \beta, \cos \gamma)$ 。则该倾斜引入的附加光程差可以表示为

$$\phi(x, y) = -\frac{1}{\cos \gamma}(x \cos \alpha + y \cos \beta), \quad (1)$$

在柱坐标系下,对于给定的倾斜角 $(\cos \alpha_0, \cos \beta_0, \cos \gamma_0)$ ,光程差可表示为

$$\phi(r, \theta) = -\frac{1}{\cos \gamma_0}(r \cos \theta \cos \alpha_0 + r \sin \theta \cos \beta_0)。 \quad (2)$$

设从反馈小孔出射的光场为 $U_0(r, \theta)$ ,加入附加的相位移,光场为

$$U(r, \theta) = U_0(r, \theta) \cdot \exp[-i \cdot k \cdot \phi(r, \theta)], \quad (3)$$

其中 $k$ 为波数。然后对 $U(r, \theta)$ 使用快速汉克尔变换(FHT)进行衍射积分<sup>[5]</sup>计算。

在极坐标系下考察后部锥面镜相对后向反射锥面镜组/前向反射锥面镜组中心的移动。如图2(a)所示, $o$ 为后向反射锥面镜组/前向反射锥面镜组的中心,而 $o'$ 为后部锥面反射镜的中心。假设 $o'$ 沿着 $\theta=90^\circ$ 的方向移动了一个微小的距离 $\Delta$ ,可以想象,这样的移动使得由后向反射锥面镜组传输来的环形光束不再与后部锥面反射镜共心,而是相对后部锥面反射镜的中心产生沿 $\theta=-90^\circ$ 的移动,那么,有一部分光将不经过后部锥面反射镜的反射而直接逸出腔外。在数值计算模型中,这一效果可以等价于:后部锥面反射镜相对后向反射锥面镜组/前向反射锥面镜组没有移动,当光场传输到后部锥

面反射镜处时,光场向相反方向平移相同的距离,如图2(b)所示。图2(b)中, $Q$ 为从后向反射锥面镜组出射到达后部锥面反射镜入射面上的环形光场的中心,该中心相对于后部锥面反射镜的中心 $o$ 沿 $\theta=-90^\circ$ 的方向移动了 $\Delta$ ,环形光场以虚线表示。那么,在后部锥面反射镜上任意一点 $P(r, \theta)$ 上的光场就取偏移后的环形光场在 $P$ 点上的值。以环形光场的中心建立新的极坐标系,如图2(b)所示,在新坐标系下, $P$ 点的坐标为 $P(\xi, \varphi)$ ,那么,通过简单的三角关系不难求出 $r, \theta$ 与 $\xi, \varphi$ 之间的关系为

$$\xi = \sqrt{r^2 + \Delta^2 - 2r\Delta \cos(\theta + 90^\circ)}, \quad (4)$$

$$\varphi = 90^\circ - \arcsin\left[\frac{r}{\xi} \sin(\theta + 90^\circ)\right], \quad (5)$$

这样,由于后部锥面反射镜相对于后向反射锥面镜组/前向反射锥面镜组的偏移,使得后部锥面反射镜入射面上任意一点 $P(r, \theta)$ 上的光场就等于环形光场上对应的坐标 $(\xi, \varphi)$ 上的值。令后部锥面反射镜上的光场为 $E(r, \theta)$ ,而环形光场表示为 $E'(\xi, \varphi)$ ,有下列对应关系

$$E(r, \theta) = E'(\xi, \varphi), \quad (6)$$

后部锥面反射镜与虚线所示的环形光束不重合的部分表明无光场辐照,置为0。后部锥面反射镜相对后向反射锥面镜组/前向反射锥面镜组向其他方向的偏移对应的光场移动与上述推导方法类似,这里不再重复。

对束变换环孔腔模式的计算使用分段传输的计算方法<sup>[5]</sup>,先从偏心反馈小孔开始计算,先后经历前向反射锥面镜组出射平面到后向反射锥面镜组入射平面间的紧束段传输、后向反射锥面镜组入射平面到后向反射锥面镜组出射平面的光场变换、后向反射锥面镜组出射平面到后部锥面反射镜入射平面的环形光束传输、后部锥面反射镜变换、后部锥面反射镜出射平面到前向反射锥面镜组入射平面的环形光束传输、以及前向反射锥面镜组的光场变换(各平面如图1所示),循环迭代,最后得到稳定的场分布。如果考虑紧束段镜面的倾斜,就在每次迭代的前向反射锥面镜组出射平面的偏心小孔处加入(3)式的倾斜因子;如果考虑后部锥面反射镜相对后向反射锥面镜组/前向反射锥面镜组的中心偏移,就在后部锥面反射镜的入射面上根据(4)~(6)式进行光场的对应,得到传输到后部锥面反射镜入射面上的场分布,以此分布继续腔内的光场传输,就模拟了后部锥面反射镜偏移对谐振腔的影响。

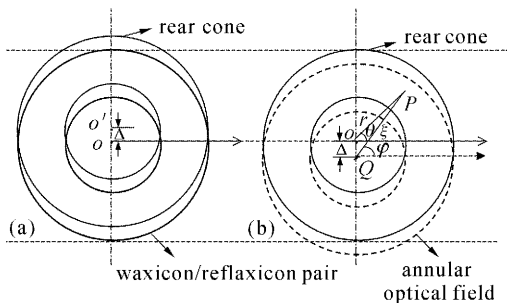


图2 后部锥面反射镜相对后向反射锥面镜组的非共轴偏移(a)及造成的相对光场移动(b)

Fig.2 (a) Rear cone decentration from waxicon/reflexicon pair and (b) the equivalent optical field shift on the rear cone input plane

### 3 失调腔输出特性分析

#### 3.1 非共轴偏移失调腔的输出特点

使用本文的偏移模型和计算方法,增益介质模型选用参考文献[6]给出的抛物型小信号增益分布和线性折射率分布,对非共轴失调腔模式的计算结果显示,非共轴偏移使一周往返的输出光场相位分布沿偏移方向发生跳变,而垂直于偏移方向上的相位不发生跳变。为了叙述方便起见,在后文中,我们将后部锥面反射镜沿  $\theta=0^\circ$  方向上的偏移称为沿正  $x$  轴方向偏移,沿  $\theta=90^\circ$  方向上的偏移称为沿正  $y$  轴方向偏移。图 3(a)为计算所得后部锥面反射镜相对后向反射锥面镜组/前向反射锥面镜组沿正  $x$  轴偏移  $300\ \mu\text{m}$  时,光场传输一周在输出平面上沿  $x$  和  $y$  轴上的相位分布(为便于与文献[8]比较,以波

数作为单位)。由图可见,在  $x=0$  的两边,相位发生跳变,幅度为半个波长;图中另外的一条曲线关于  $x=0$  是对称的,这条曲线是  $y$  轴上的相位分布,中心处下凹。这一计算结果与 Chun-Ching Shih<sup>[8]</sup> 对 Alpha 激光器的非共轴情况下输出相位分布的计算结果是一致的,图 3(b)为 Chun-Ching Shih 的计算结果, $x$  轴上相位跳变的幅度大约也是半个波长; $y$  轴上相位分布是对称的,中心处也是下凹的。由于具体设计参数不同,Alpha 激光器的输出光束半径比本文的设计大得多,在前向反射锥面镜元件中的放大倍数也大很多,因此 Chun-Ching Shih 的计算结果中输出光场的相位分布沿  $x$  轴变化更为缓慢。由图 3 也可以看出,偏移使得单程往返的光场相位在  $x$  轴上呈现倾斜,但在  $y$  轴上的相位无变化。

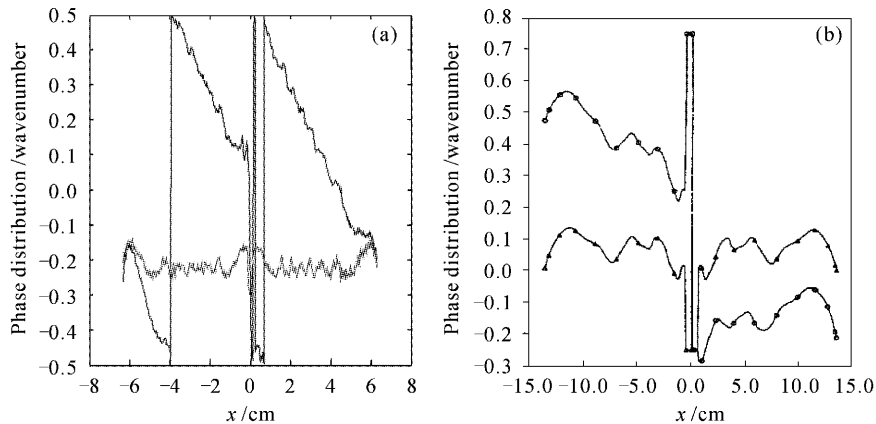


图 3 偏移造成的  $x$  轴上的相位跳变。(a)本文计算结果;(b)参考文献[8]计算结果

Fig. 3 Decentration induced phase jump across  $x$  axis. (a) This paper result and (b) Ref. [8] result

图 4 给出了不同偏移量下的输出光场的相位分布。可以看到,输出光场的相位分布总体上是沿偏移方向倾斜的,且在中心处发生跳变。除此之外,相位分布表现出扭曲现象。因此,非共轴偏移失调腔的输出相位分布中倾斜量的成分占很大比重,但是

也存在一些其他的高阶像差成分,并且随着非共轴偏移量的增大,高阶像差成分增大。

图 4 中沿  $y$  轴方向的相位分布也发生了变化,这一点与图 3 不同,这是因为图 3 为光场在腔内渡越一周后的输出相位分布,而图 4 为多次渡越收敛

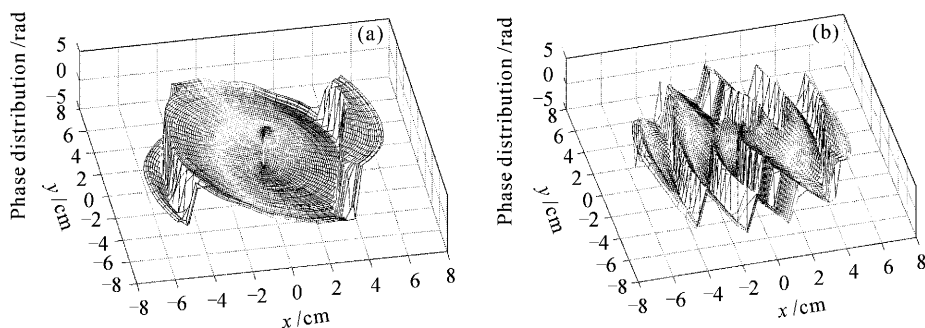


图 4 非共轴偏移情况下输出光场近场相位分布。(a)沿  $x$  轴偏移  $300\ \mu\text{m}$ ; (b)沿  $x$  轴偏移  $1000\ \mu\text{m}$

Fig. 4 Near field phase distribution (a) decentraion of  $300\ \mu\text{m}$  and (b) decentration of  $1000\ \mu\text{m}$  along  $x$  axis

后的相位分布。由于中心的偏移是非旋转对称的，而束变换环孔腔的后部锥面反射镜、后向反射锥面镜组和前向反射锥面镜组都是旋转对称的，因此，沿不同角向引入的像差是不相同的，再加上反馈小孔为偏心小孔，每次反馈得到的光场不再呈现任何对称性或规律性，所以最终输出光场的相位分布呈现扭曲、剪切图样，沿  $x$  轴和  $y$  轴的相位分布都发生了变化。

图 5 给出了沿正  $x$  轴偏移  $300\ \mu\text{m}$  和  $1000\ \mu\text{m}$

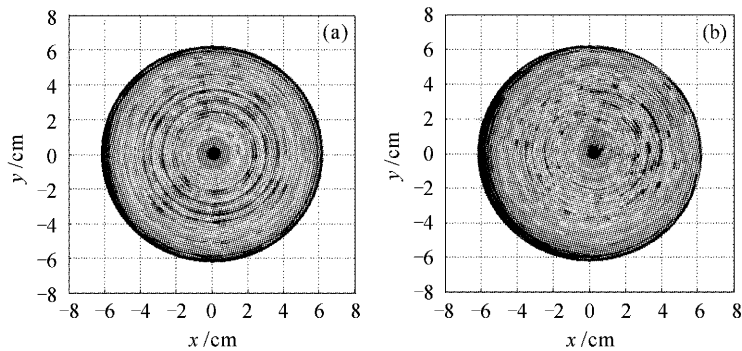


图 5 非共轴偏移情况下近场光强分布的灰度图。(a)沿  $x$  轴偏移  $300\ \mu\text{m}$ ；(b)沿  $x$  轴偏移  $1000\ \mu\text{m}$

Fig. 5 Near field intensity contours (a) decentration of  $300\ \mu\text{m}$  and (b) decentration of  $1000\ \mu\text{m}$  along  $x$  axis

表 1 不同偏移量和偏移方向下束变换环孔腔的输出特征

Table 1 Intensity characteristics at different decentration and direction

Decentration / $\mu\text{m}$	$x=200$	$x=-200$	$y=200$	$y=-200$	$x=300$	$x=-300$	$y=300$	$y=-300$
Average intensity / ( $\text{W}/\text{cm}^2$ )	6770	6770	6776	6780	6670	6660	6670	6680
Far field peak intensity / ( $\text{W}/\text{cm}^2$ )	1620	1590	1475	1500	1376	1400	1379	1365
Position / cm	-9.62	9.89	-11.38	11.31	-15.54	15.60	-17.39	17.39

近场平均光强反映了谐振腔的抽取效率。从表 1 可以看出，随偏移量的增大，近场平均光强下降，但降幅很小，约 1.4% 左右，这说明非共轴失调对于束变换环孔腔的能量抽取效率影响较小，激光器输出功率的变化很小，这是束变换环孔腔的突出优点之一。同时也可看出，不同的偏移方向对近场平均光强影响很小。远场峰值光强代表了激光器输出光场的传输能力，在一定程度上可以反映输出光束质量的高低。计算结果表明，随偏移量的增大，远场峰值光强降低，降幅约 12% 左右；不同偏移方向对远场峰值光强的影响较小。偏移引起的腔失调可以产生相位跳跃和相位剪切，失调腔的近场相位分布中，倾斜量占了较大的比重，因此远场峰值光强的位置将发生移动。计算

时有源腔的近场光强分布，可以看出，其光强分布仍然保持了中心处较弱而其余地方较为均匀的特点，所以在非共轴偏移情况下，谐振腔镜面热负荷仍较为均匀，有利于减小腔镜变形或破裂的危险。同时也可看出，非共轴偏移使得输出光场的强度分布也发生了偏移，并且输出光强的偏移随着非共轴偏移量的增大而加大。表 1 列出了在不同偏移量和不同偏移方向时，输出光场近场的平均光强和传输 5 km 后的峰值光强及其位置。

结果表明，峰值位置的方向与偏移方向相反，如表 1 所示。例如，偏移量沿  $x$  轴正方向偏移  $300\ \mu\text{m}$ ，即  $x=300\ \mu\text{m}$ ，由于近场相位分布除了倾斜量外，还存在其他像差，因此峰值位置并不是正好在负  $x$  轴上，而是在其附近，在表中写为  $-15.54\ \text{cm}$ 。

从表 1 可以发现，随着偏移量的增大，不但远场峰值光强的位置远离中心，远场峰值也大幅降低，当偏移  $x=1000\ \mu\text{m}$  时峰值光强降低到了  $455\ \text{W}/\text{cm}^2$ ，位置在负  $x$  轴附近，距离中心 51 cm。这也说明了偏移量的增大将使输出光场的相位倾斜程度和扭曲程度增大，高阶像差成分增加，因此光斑弥散变大，峰值光强降低。图 6 给出偏移  $x=300\ \mu\text{m}$  和  $x=1000\ \mu\text{m}$  时失调腔输出光场的远场光强分布。

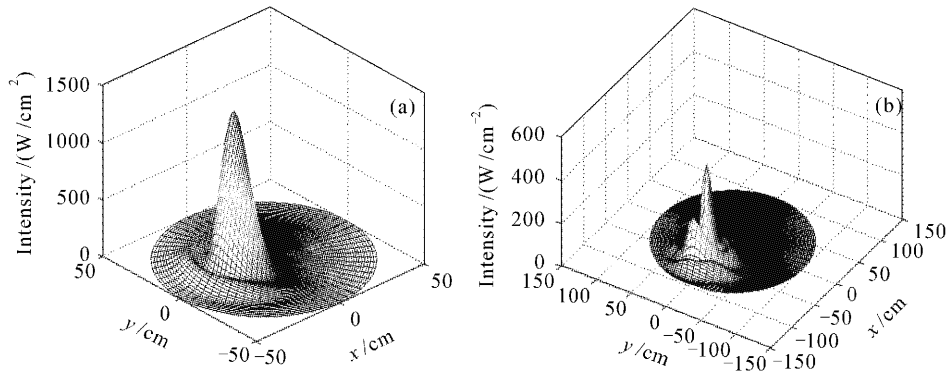


图6 非共轴偏移情况下远场光强分布。(a)沿  $x$  轴偏移  $300 \mu\text{m}$ ; (b)沿  $x$  轴偏移  $1000 \mu\text{m}$   
Fig. 6 Farfield intensity distribution (a) decentration of  $300 \mu\text{m}$  and (b) decentration of  $1000 \mu\text{m}$  along  $x$  axis

### 3.2 紧束段倾斜失调腔的输出特点

相比前者,紧束段中镜面倾斜引起的腔失调对输出性能的影响程度要小。表2列出了入射到  $M_1$  上的光束空间角为  $(\sin \theta, 0, \cos \theta)$ ,  $\theta=0, 25, 50, 100 \mu\text{rad}$  时的近场平均光强、远场峰值光强和峰值位置。可见,随着倾角增大,近场平均光强下降幅度非常微弱,表明紧束段倾斜对输出功率影响非常小,即对谐振腔的抽取效率影响很小。远场峰值光强下降较快,表明随倾斜角度增大,近场相位分布中高阶像差的成分逐渐增大。这一点可以从图7中看出。因

而,随倾角增大,远场光斑弥散,旁瓣加大,峰值光强减小。在这种失调情况下,输出光场的相位分布中的倾斜量依然占有较大比重,因此,随倾角增大,远场峰值位置远离中心。

表2 不同倾斜角下束变换环孔腔的输出特征

Table 2 Intensity characteristics at different tilt angle

Tilt angle / $\mu\text{rad}$	0	25	50	100
Average intensity / $(\text{W}/\text{cm}^2)$	7190	7200	7200	7220
Far field peak intensity / $(\text{W}/\text{cm}^2)$	4670	4120	2970	1130
Position / cm	0	0.87	1.67	3.05

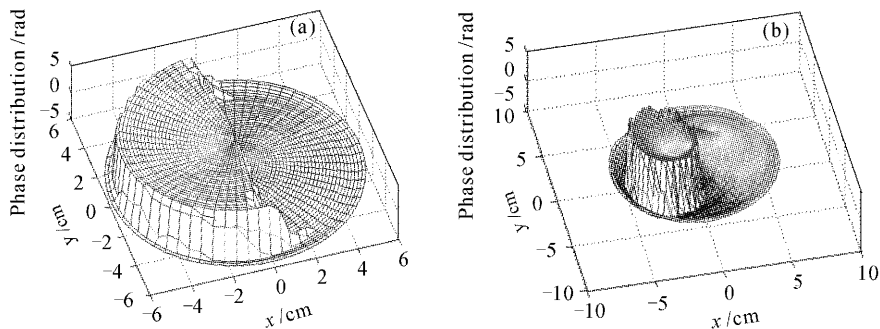


图7 紧束段倾斜情况下输出光场的近场相位分布。(a)沿  $x$  轴倾斜  $50 \mu\text{rad}$ ; (b)沿  $x$  轴倾斜  $100 \mu\text{rad}$   
Fig. 7 Near field phase distribution (a) tilt of  $50 \mu\text{rad}$  and (b) tilt of  $100 \mu\text{rad}$  along  $x$  axis

## 4 结 论

通过对以上计算结果的分析,可得到如下结论:

1) 非共轴偏移和紧束段倾斜对光束变换环形孔激光谐振腔的能量抽取效率影响不大,但是对输出光束质量的影响非常大。

2) 非共轴偏移和紧束段倾斜将使输出光场的相位分布呈现剪切、扭曲现象,并且沿偏移方向出现相位跳变;随偏移量的增大,相位畸变严重,远场传输能力下降。不同的偏移方向对于输出光场影响差

别很小。

3) 两者相比,非共轴偏移对输出光场质量的影响更为严重,而紧束段倾斜的影响相比而言非常小,表现在相位分布的扭曲现象不明显,谐振腔的能量抽取效率变化微弱。

束变换环孔腔能够克服增益介质不均匀性带来的不利影响,输出光束质量好,能量抽取效率高,腔内光强分布均匀,有利于减轻镜面热应力不均匀带来的腔镜变形<sup>[10]</sup>,因此非常适合紧凑化、高功率的

化学激光器使用。然而由于束变换环孔腔的结构特点,非轴对称的像差对于输出性能的影响最为严重,这是束变换环孔腔的最大缺陷,也是工程实践中应该努力控制的对象。

### 参 考 文 献

- 1 J. A. Horkovich, P. T. Pomphrey Jr.. Recent Advances in the ALPHA high power chemical laser program [C]. *AIAA*, 1997, **2409**: 23~45
- 2 Richard C Wade. Annular resonators for high-power chemical lasers [C]. *SPIE*, 1993, **1868**: 334~360
- 3 T. Wiest, J. Norris, S. Amimoto *et al.*. Progress in alpha laser characterization [C]. *AIAA*, 1999, **3545**: 69~79
- 4 Capt. Dean Fitzgerald, Sherwin Amimoto, David Johanssen *et al.*. Recent results from the alpha laser optimization program [C]. *AIAA*, 2000, **2498**: 1~11
- 5 Liu Wenguang, Lu Qisheng, Liu Zejin. Design and analysis of beam-converting annular Resonator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4): 485~490  
刘文广,陆启生,刘泽金. 束变换环孔激光谐振腔的设计与分析 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(4): 485~490
- 6 Liu Wenguang, Lu Qisheng, Liu Zejin. Numerical simulation of beam-converting annular resonator with active medium [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 1339~1343  
刘文广,陆启生,刘泽金. 光束变换环形孔径有源激光谐振腔模式的数值模拟 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(10): 1339~1343
- 7 V. I. Volkov. Influence of the misalignment of mirrors and of a deviation of the shapes of their reflecting surfaces from ideal on the losses and mode structure of the field in an unstable resonator with a ring-shaped active region and an internal W axicon [J]. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1992, **22**(1): 79~84
- 8 Chun-Ching Shih. Modeling of rear cone misalignment in the annular resonator [C]. *SPIE*, 1994, **2117**: 128~135
- 9 Frank R. Hassell, Frank M. Groark. Fabrication of a 20.5 inch diameter segmented silicon annular optic prototype for the ROMA program [C]. *SPIE*, 1995, **2543**: 59~72
- 10 Huang Wei, Zhang Yundong, Cai Bangwei. Study of cavity mirrors of DF chemical laser with high damage threshold [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(2): 153~156  
黄伟,张云洞,蔡邦维. 高损伤阈值氟化氙腔镜研制 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(2): 153~156