

直角棱镜谐振腔钕玻璃激光器

中国科学院上海光机所 101 组

一、引言

激光器输出光束的方向性或它的发散角是一个十分重要的参量，它直接影响着输出光束亮度的提高。

影响固体激光器输出光束方向性的因素很多。目前看来主要的有三个：

1) 多模振荡：我们知道，如果激光器能做到单模工作，它的方向性便可以达到衍射极限。但是一般的固体激光器由于受到多种扰动而处于多模工作状态，远远达不到这个极限。改善方向性的一个重要措施就是减少振荡的横模数（以下均指横模）。为了减少模的数目，要求谐振腔具有良好的选模性能，或者说要求谐振腔具有大的模损失间距。不稳定谐振腔（以下简称为不稳定腔）具有大的模损失间距，能做到有效的选模，实验上获得了很好的结果。但是普通的不稳定腔主要是对径向模具有较大的模损失间距。而对角向模的损失间距并不理想。下面将看到由直角棱镜构成的谐振腔（以下简称为棱镜腔）可以获得十分良好的角向选模性能。因此用直角棱镜构成的不稳定腔可望获得更良好的选模性能，从而使方向性获得改善。

2) 热形变：影响方向性的另一个主要因素是激光工作物质在光泵过程中的畸变。我们称它为热形变。工作物质的热形变主要来源于光泵的不均匀。热形变将引起模式畸变和模式耦合，由此产生多模振荡，破坏了方向性。减小热形变的方法很多，如设计合理的聚光器，使光泵尽可能均匀；尽量减小工作物质的热光常数等等。

实验和理论表明，同样的热形变对不同的谐振腔有不同的影响。直角棱镜不稳定腔受热形变的影响比其他谐振腔受的影响小。从而使方向性获得进一步的改善。

3) 弥散：影响方向性的再一个因素是弥散。这里所谓弥散，指的是由于激光束本身在工作物质中的非线性效应所引起的光束弥散。实验表明，使激光束强度的空间分布均匀可以减少这种弥散。由于直角棱镜不稳定腔的场分布比其它谐振腔的场分布更均匀，从而可以使弥散得到一定程度的克服。

本文对各种谐振腔的多模情况、弥散和热形变进行了观察和测量。因为不同的工作物质、不同的光泵强度等因素均影响热形变和弥散，因此实验中保持这些条件不变，只改变谐振腔的结构进行比较。

二、直角棱镜谐振腔的模

关于直角棱镜谐振腔的模式结构，这里只简要叙述一下主要结果。

假设一个棱镜腔,它由两个直角棱镜构成。两棱镜的底面彼此平行,谐振腔的轴线通过两棱线的中点,两棱线的夹角为 Θ 。采取适当的措施(如镀增透膜等)消除棱镜底面的反射。那么这种腔的本征方程可以写为:

$$bu(r, \varphi) = \frac{ik}{2\pi L} e^{-ikL} \int_0^a \int_{-\Theta}^{2\pi-\Theta} \exp\left\{-ik\left[\frac{1}{2L}(r^2 + \Delta^2) - \frac{r\Delta}{L} \cos(\psi + \varphi - \pi - \Theta)\right]\right\} u(\Delta, \psi) \Delta d\Delta d\psi \quad (1)$$

其中 a ——谐振腔横向尺寸的半径;

L ——两棱线的距离,即腔长;

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ——传播常数, λ ——工作波长。

设方程(1)有如下形式的本征解:

$$u(r, \varphi) = Rm(r) (e^{-im\varphi} \pm e^{im\varphi}), m = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

将等式(2)代入方程(1)便可以得到如下的角向自再现条件:

$$\left. \begin{aligned} m=0; \text{ 或} \\ \Theta = \frac{l}{m}\pi; \text{ 或} \\ \Theta = \frac{2l+1}{2m}\pi \quad l=0, 1, 2, \dots \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

由(3)式我们看到,当 Θ 以 π 为单位取无理数时,(3)式中后两个条件是不满足的,此时只有 $m=0$ 才满足自再现条件。这就是说当两棱线的夹角以 π 为单位取无理数时,谐振腔内只有零次角向模,不存在高次角向模。也就是说此时谐振腔内的特征态只能是一些环状场分布,不存在任何梅花瓣式的场分布。这个结果可以由几何光路的特点得到解释。对于平行平面谐振腔(以下简称为平面腔)而言,垂直于腔面的光线多次反射不引起光线的位移。对于棱镜腔则不同,光线将随反射而位移,而且每两次反射的圆心角有 2Θ 的变化。由此可知,当 Θ 不是 π 的有理分数时,光路便不能闭合,光线将经过一个圆周上的所有点。或者说只有这个圆周上的所有光线组成的光线汇才是腔的特征态。对棱镜腔铍玻璃激光器腔内场分布的拍摄观测到了这个结果。

实验装置示意图见图1。工作物质棒的两端面平行磨斜,用高速摄影机拍摄棒端面上的光强分布。拍摄的结果见图2。实验首先对平面腔和棱镜腔进行了比较,我们知道,这两种腔具有相同的径向模和不同的角向模。图2(a)是平面腔激光器振荡初期的腔内光强分布。我们可以看到它是由一些斑点与条纹组成的。而棱镜腔激光器振荡初期,腔内的光强分布与平面腔的分布截然不同(见图2(c)),它出现了理论上预言的环状结构。

实验中要求棱镜的棱线完整和锐度良好。否则由于棱线的散射将使分布呈直条纹状。这

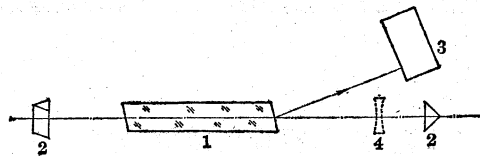


图1 直角棱镜谐振腔实验装置示意图

1—铍玻璃棒; 2—直角棱镜(腔元件); 3—高速照相机; 4—构成不稳定腔的凹透镜

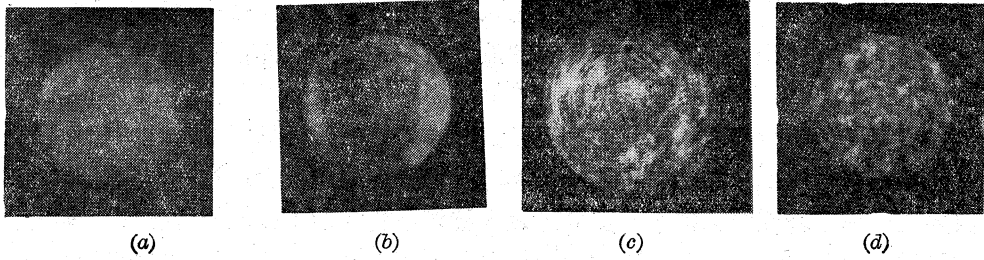


图2 直角棱镜谐振腔与平行平面谐振腔的场分布

- (a) 平行平面腔内的光强分布(振荡初期);幅/16 微秒
- (b) 平行平面腔内的光强分布(振荡后期);幅/16 微秒
- (c) 直角棱镜腔内的光强分布(振荡初期);幅/13 微秒
- (d) 直角棱镜腔内的光强分布(振荡后期);幅/13 微秒

是由棱线散射的柱面波与全反射的平面波干涉的结果。实验中两棱线的夹角 Θ 取无理数的条件是容易满足的。因为无理数在数轴上是密致的，而有理数是稀疏的。因此两棱镜成任意一个角度便可以了。当 Θ 十分接近于某个有理数时，场分布将出现明显的瓣状结构，实验中观察到了这一点。

我们知道，不稳定腔比平面腔的选模性能要好。棱镜腔也可以做成不稳定腔。这只要将直角棱镜的底面加工成球面便可以等效于某曲率的球面反射镜。于是它的本征方程便可以写为：

$$bu(r, \varphi) = \frac{ik}{2\pi L} e^{-ikL} \int_0^{\alpha} \int_{-\Theta}^{2\pi-\Theta} \exp \left\{ -ik \left[\frac{g}{2L} (r^2 + \Delta^2) - \frac{r\Delta}{L} \cos(\psi + \varphi - \pi - \Theta) \right] \right\} u(\Delta, \psi) \Delta d\Delta d\psi \quad (4)$$

其中 $g = 1 - \frac{L}{R}$ ——腔的曲率因子； R ——棱镜的等效曲率半径。

由方程(4)我们看到，它要求与(3)式相同的条件。也就是说它具有与棱镜腔相同的角向选模性能。

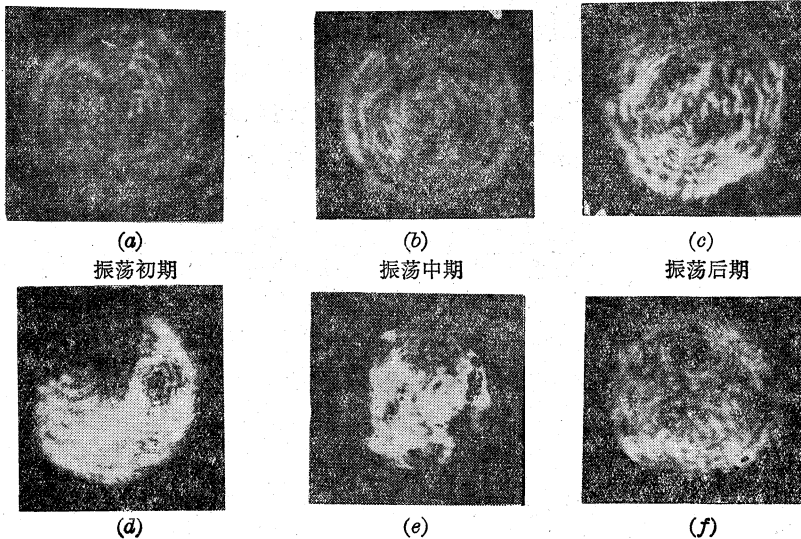


图3 不稳定直角棱镜谐振腔的场分布

- (a)、(b)、(c) — 棱镜不稳腔内的光强分布
- (d)、(e)、(f) — 平镜不稳腔内的光强分布(拍摄速度: 13 微秒/幅)

为了进行实验观测，在普通的棱镜腔内插入一块负透镜使之构成一个不稳定的直角棱镜谐振腔(以下简称为棱镜不稳定腔)。这种腔的放大倍数和虚光点的位置与将棱镜换成平面反射镜构成的不稳定腔(以下简称为平镜不稳腔)的相同。

对棱镜不稳腔和平镜不稳腔的棒端面上光强分布拍摄的结果见图 3。这些照片表明，棱镜不稳腔的场分布很规则，它的起伏比平镜不稳腔场分布的起伏少。这一点意味着棱镜不稳腔的弥散要比平镜不稳腔的弥散小。图 3 还表明棱镜不稳腔的工作稳定性很好。即激光器在整个工作过程中的场分布是十分稳定的，几乎不变(见图 3(a))。图中振荡的初期、中期、后期的照片是分三次拍摄的。因此图 3 还表明棱镜不稳腔对调整精度的要求很低。或者说对腔内的一级象差(或称为劈形扰动)不敏感(详见后)。实验表明，平镜不稳腔也具有同样好的工作稳定性，但是它对调整精度的要求比较高，也就是说，平镜不稳腔对一级象差比棱镜不稳腔敏感。

三、不稳定直角棱镜谐振腔的畸变

谐振腔的畸变是指的模畸变。它主要来源于光泵引起的工作物质的热形变。我们用光在谐振腔内往返一周时腔边缘处与腔中心点的光程差 $\Delta L(r)$ 来描写热形变对场分布的影响。这个差就是波前畸变量。

为了简单起见，我们只讨论一个一维分布的问题。设谐振腔内介质的折射率分布有如下形式：

$$n(x) = n_0 + n_1 x + n_2 x^2 + \dots \quad (5)$$

其中 x 是在谐振腔横截面的一维坐标。光在多次通过谐振腔后最终畸变量为：

$$\Delta L(x) + \Delta L\left(\frac{x}{M}\right) + \Delta L\left(\frac{x}{M^2}\right) + \dots = L \sum_{k=1}^{\infty} a_k(M) n_k x^k, \quad (6)$$

其中 M 是不稳定腔的放大倍数，我们称 n_1 为一级象差， n_2 为二级象差等等。 $a_k(M)$ 表示 k 级象差引起的畸变大小的系数。不同谐振腔的畸变系数 $a_k(M)$ 的形式是不同的。下面列出几种谐振腔的畸变系数 $a_k(M)$ 。不同谐振腔的畸变系数分别用不同的符号 α_k, β_k, \dots 等表示。其中“左棱镜不稳腔”指的是左边用棱镜右边用平镜中间加负透镜的不稳定腔，凸棱望远镜腔是用凸面镜和凸底面棱镜构成的望远镜腔等，其他类推。具体如下：

望远镜腔

$$\alpha_k = \frac{1}{M^k - 1} \left[M^k + \frac{M^{k+1} - 1}{(k+1)(M-1)} \right] \quad (7.1)$$

不对称共焦腔

$$\beta_k = \frac{1}{M^k - (-1)^k} \left[M^k + \frac{M^{k+1} - (-1)^{k+1}}{(k+1)(M-1)} \right] \quad (7.2)$$

平凸腔

$$\gamma_k = \frac{1}{M^k - 1} \frac{2(M^{k+1} - 1)}{(k+1)(M-1)} \quad (7.3)$$

平镜不稳腔

$$\delta_k = \frac{1}{M^k - 1} \frac{(\sqrt{M^{k+1}} - 1)(\sqrt{M^k} + 1)}{(k+1)(\sqrt{M} - 1)} \quad (7.4)$$

左棱镜不稳腔

$$\xi_k = \frac{1}{M^k - (-1)^k} \frac{1}{(k+1)(\sqrt{M}-1)} \left\{ \sqrt{M}^{k+1} \left[\sqrt{M}^k + (-1)^k \right] + (-1)^{k+1} \left(\sqrt{M}^k + 1 \right) - [1 + (-1)^{k+1}] \sqrt{M}^k \left(\frac{\sqrt{M}+1}{2} \right)^{k+1} \right\} \quad (7.5)$$

右棱镜不稳腔

$$\eta_k = \frac{1}{M^k - (-1)^k} \frac{1}{(k+1)(\sqrt{M}-1)} \left\{ \sqrt{M}^{k+1} (\sqrt{M}^k + 1) - (\sqrt{M}^k + (-1)^k) - [1 + (-1)^{k+1}] \left(\frac{\sqrt{M}+1}{2} \right)^{k+1} \right\} \quad (7.6)$$

双棱镜不稳腔

$$\zeta_k = \frac{1}{M^k - (-1)^k} \frac{1}{(k+1)(\sqrt{M}-1)} \left\{ [\sqrt{M}^{k+1} (-1)^k - 1] \times [\sqrt{M}^k + (-1)^k] - [1 + (-1)^{k+1}] (\sqrt{M}^k - 1) \left(\frac{\sqrt{M}+1}{2} \right)^{k+1} \right\} \quad (7.7)$$

凸棱望远镜

$$\alpha_k = \frac{1}{M^k - (-1)^k} \left[M^k + \frac{(-1)^k (M^{k+1} - 1)}{(k+1)(M-1)} \right] \quad (7.8)$$

双棱望远镜

$$\theta_k = \frac{1}{M^k - 1} \left[M^k + \frac{(-1)^k (M^{k+1} - 1)}{(k+1)(M-1)} \right] \quad (7.9)$$

上述公式中平镜不稳腔类型的谐振腔是对负透镜位于中心位置时求得的。为了更清楚地看出问题,我们对于各级象差的畸变系数值(根据上述公式进行计算的)列表如下:

表 1 畸变系数表

k=1	M=3	M=4	k=2	M=3	M=4	k=6	M=3	M=4	k=10	M=3	M=4
α_1	2.500	2.167	α_2	1.666	1.534	α_6	1.216	1.191	α_{10}	1.136	1.121
β_1	1.000	1.100	β_2	1.416	1.356	β_6	1.216	1.191	β_{10}	1.136	1.121
γ_1	2.000	1.667	γ_2	1.086	0.933	γ_6	0.429	0.381	γ_{10}	0.273	0.242
δ_1	1.866	1.500	δ_2	0.955	0.778	δ_6	0.344	0.288	δ_{10}	0.198	0.182
ξ_1	-0.210	-0.200	ξ_2	0.955	0.778	ξ_6	0.344	0.288	ξ_{10}	0.198	0.182
η_1	0.510	0.650	η_2	0.955	0.778	η_6	0.344	0.288	η_{10}	0.198	0.182
ζ_1	-1.935	-1.584	ζ_2	0.955	0.778	ζ_6	0.344	0.288	ζ_{10}	0.198	0.182
α_1	0.250	0.300	α_2	1.666	1.534	α_6	1.216	1.191	α_{10}	1.136	1.121
θ_1	0.500	0.500	θ_2	1.666	1.534	θ_6	1.216	1.191	θ_{10}	1.136	1.121

从表 1 看出由棱镜构成的各种谐振腔对一级象差引起的畸变都很小。也就是说棱镜谐振腔对调整精度的要求很低。这就说明了为什么棱镜不稳腔的场分布有如此好的重复性(见图 3)的原因。在一般的对称光泵的情况下,一级象差只来源于腔面失调。而由此产生的影响只是使光轴偏一个固定的角度。这样的影响可以事先进行校正。而二级象差以及高级象差(即透镜型的畸变等)所引起的畸变一般说来是光泵过程中的一个动态过程。它引起虚光点的运动和变形,对它进行校正是困难的。因此我们希望二级以及高级畸变系数越小越好。实验表明,工作物质在光泵过程中的形变大致在 6~10 级之间是主要的。因此要求高级畸变系数应该很小。从表 1 看到平镜不稳腔型的谐振腔对高级象差引起的畸变要比望远镜腔的畸变小得

多。当形变主要是高级形变时，平镜不稳腔比望远镜腔所具有的优点是相当突出的。总之，那种光束平行通过工作物质的谐振腔畸变都很大，以发散光束通过工作物质的谐振腔畸变较小。也就是说通常应用的望远镜腔并不是一个“好的”谐振腔，因为它以平行光束工作，具有较大的畸变。一个较好的谐振腔结构是用两只直角棱镜和一个凹透镜组成的不稳腔，这两个棱镜的棱线的夹角取接近于 $1/2$ 的无理数。使它不满足条件(3)中的后两个。这种腔在 x, y 两个方向上分别为左(右)棱镜不稳腔和右(左)棱镜不稳腔。它们除具有最小的二级畸变外，还具有较小的一级畸变。对各种谐振腔的畸变观察的结果与上述理论是一致的。

此外，平镜不稳腔与平凸腔从几何光路来看是相同的，都是以发散光束工作的，但是在腔内的发散次数不同。光在腔内往返一个周期时平凸腔经过一次发散而平镜不稳腔则经过两次发散。因此对于同样放大倍数的这两种腔的两条具有相同的始点(r/M)和相同的终点(r)的光线，其光程的增量是不同的。平镜不稳腔的光路始终位于折射率梯度比平凸腔光路更低的区域内(见图4)。因此它的光程增量要比平凸腔的光程增量小。因此平镜不稳腔的畸变系数比平凸腔的畸变系数小是自然的。

为了观测输出光束的总畸变。我们采用网格方法。实验装置如图6。将一个均匀布满小孔的网格板放在用来聚焦输出激光束的透镜后面。这样一个完整的激光束便被分成了很多相同的小光束，再在半焦长的位置上放上炭纸。这样便在炭纸上得到网格板的象，从拍摄的“照片”直接反映出光束畸变的程度。对不同谐振腔拍摄的“照片”见图5。这些照片是对同一根工作物质棒在相同光泵下拍摄的。各种不稳定腔的放大倍数相同，腔长大体相同。

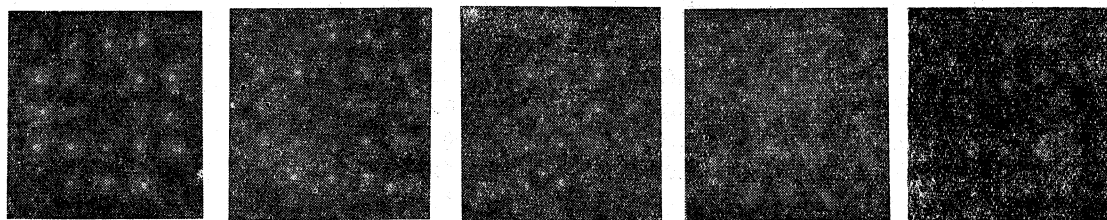


图5 不同谐振腔的网格板的象

(a) 平镜不稳腔; (b) 棱镜不稳腔; (c) 平凸腔; (d) 望远镜腔; (e) 平面腔

从图5我们看到如下两点:

1) 如上面指出的, 发散光束工作的谐振腔(图5(a)、(b)、(c))畸变都很小。这表现在网格象点的分布是方方正正的。而平行光束参与工作的谐振腔(图5(d)、(e))的畸变都很大。例如望远镜腔产生了较大的枕形失真。它的枕形失真的量比棱镜不稳腔的枕形失真的量要大3~4倍。完全由平行光束工作的谐振腔如平面腔的象的特征是杂乱无章的。

2) 图5表明, 棱镜不稳腔和平镜不稳腔等四单元腔(即棱镜——工作物质——透镜——棱镜)的场分布比平凸腔等三单元腔(平面镜——工作物质——凸面镜)的场分布要均匀。这表现在照片上的光束大小均匀, 强度相近(见图5(a)、(b))和光点大小不均, 强度相差很大(图5(c))。

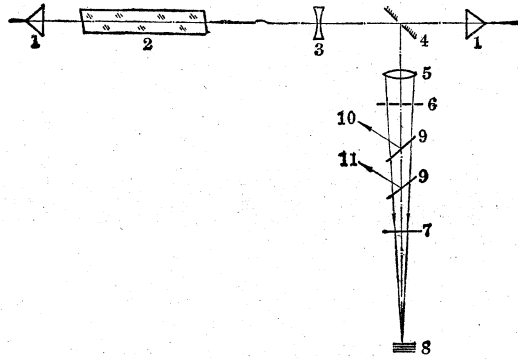


图6 不稳定直角棱镜谐振腔实验装置示意图

1—直角棱镜(或其他腔元件); 2—激光工作物质; 3—凹透镜; 4—输出平板; 5—聚焦透镜; 6—网格板; 7—炭纸; 8—金属片; 9—分光平板; 10—至能量接收器; 11—至光电管及示波器

四、不稳定直角棱镜谐振腔的弥散

实验表明,采用网格方法,还可以直观的了解各种谐振腔的弥散情况。它表现为图5中照片上每一个光点本身的畸变程度。我们上一节讨论的形变实际上是光束“整体”的畸变,它反映在光点分布规律的变化。本节讨论的弥散实际上是光束的“局部”畸变,它反映在每个光点本身的变形。弥散主要来源于光束分布的不均匀。例如平面腔和棱镜腔振荡后期的场分布极度不均匀(见图2(c)、(d)),因此它们具有较大的弥散是自然的。比较图5中的(a)、(b)、(c)、(d),我们看到场分布均匀的谐振腔如棱镜不稳腔和平镜不稳腔等的弥散,即光点周围的伴生物以及光点的变形程度,比场分布不均匀的谐振腔如平凸腔和望远镜腔等要小得多。特别是棱镜不稳腔的弥散还要比平镜不稳腔的弥散小。由图3我们已看到,棱镜不稳腔场分布的起伏比平镜不稳腔场分布的起伏要小,因此这样一个实验结果是不难解理的。

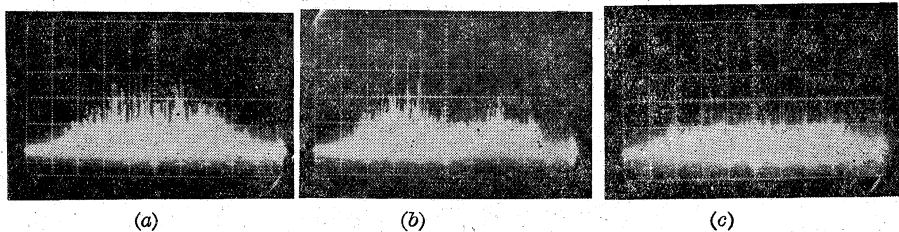


图7 不同谐振腔的尖峰结构

(a)—棱镜不稳腔; (b)—平镜不稳腔; (c)—望远镜腔(示波器扫描速度为1.2毫秒/厘米;灵敏度相同)

五、结 论

实验表明棱镜不稳腔是一种比较好的腔结构,它除具有优良的角向选模性能外,还具有对一级象差不敏感的特性,因此对调整精度要求低。用腔内加凹透镜的方式构成的不稳腔还具有很好的对二级象差不敏感的特性,因此受工作物质热形变的影响较小。此外由于棱镜不稳腔的场分布比较均匀,因而弥散也较小。综观影响激光器输出方向性的各种因素来看,棱镜不稳腔的特性都是比较理想的。