

# 交叉棱镜腔 Nd:YAG 板条激光器\*

吕百达 蔡邦维 廖 严 许世友 黄晓月  
(四川大学 物理系)

## 提 要

对稳定和非稳共焦型 Nd:YAG 板条激光器的特性作了理论分析和实验研究。证实了使用交叉棱镜腔的流动空气-水混合冷却板条激光器有高的光束质量和对棱镜失调的不灵敏性,可望获得某些实际应用。  
关键词: 交叉棱镜腔,板条激光器。

板条(slab)固体激光器具有能消除一阶热效应、输出光束质量高等优点。实验表明<sup>[1]</sup>,当泵浦水平不是很高时,对激光介质风冷的方案是可行的。为了进一步提高板条激光器的性能,特别是对失调的不灵敏性。有必要所激光器的参数和光腔结构作一些研究。文献[2]曾报道使用非稳共焦型交叉棱镜腔的棒状 YAG 激光器的实验结果。本文首次将这类非稳交叉棱镜腔和稳定的交叉棱镜腔用于 Nd:YAG 板条激光器,进行了理论分析和实验研究。给出了一些有关的结果。

## 一、理 论 分 析

### 1. 稳定交叉棱镜腔

在图 1(a)所示的交叉棱镜腔中,设球面棱镜  $P_i$  的入射球面半径为  $R_i$  ( $i=1, 2$  下同) 厚度均为  $d$ , 二球面棱镜相距  $L$ 。按照矩阵光学, 它可等效为图 1(b) 的多元件平行平面腔, 图中两个内透镜的焦距  $f_i = [R_i/(n-1)]$ ,  $l_0 = (d/n)$ ,  $n$  为棱镜折射率。这类光腔是采用腔内插入介质偏振片方式输出激光的, 对 TEM<sub>00</sub> 模工作情况, 决定输出光束发散角的光腰  $w_{00}$  和位置  $L_{01}$  (以  $M_1$  为参考) 直接用“混合等价腔”方法<sup>[3]</sup> 推得为

$$\left. \begin{aligned}
 w_{00}^2 &= \frac{\lambda L^*}{\pi} \frac{[g_1^* g_2^* (1 - g_1^* g_2^*)]^{1/2}}{g_1^* (L^*/\rho_2')^2 + g_2^* (1 - g_1^* g_2^*)}, \\
 L_{01} &= l_0 + l_2' - L^* \frac{g_1^* L^*/\rho_2'}{g_1^* (L^*/\rho_2')^2 + g_2^* (1 - g_1^* g_2^*)}, \\
 L^* &= l_0 + l_2' - (l_0 l_2'/f_1), \\
 g_1^* &= 1 - (l_2'/f_1), \quad g_2^* = 1 - \frac{l_0 + l_2'}{\rho_2'} - \frac{l_0}{f_1} \left(1 - \frac{l_2'}{\rho_2'}\right), \\
 \rho_2' &= \frac{f_2^2}{f_2 - l_0}, \quad l_2' = L - f_2 + \frac{f_2^2}{f_2 - l_0},
 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

光腔的约束稳定条件可用  $g_1^*$ 、 $g_2^*$  参数表示为

$$0 < g_1^* g_2^* < 1, \quad (3)$$

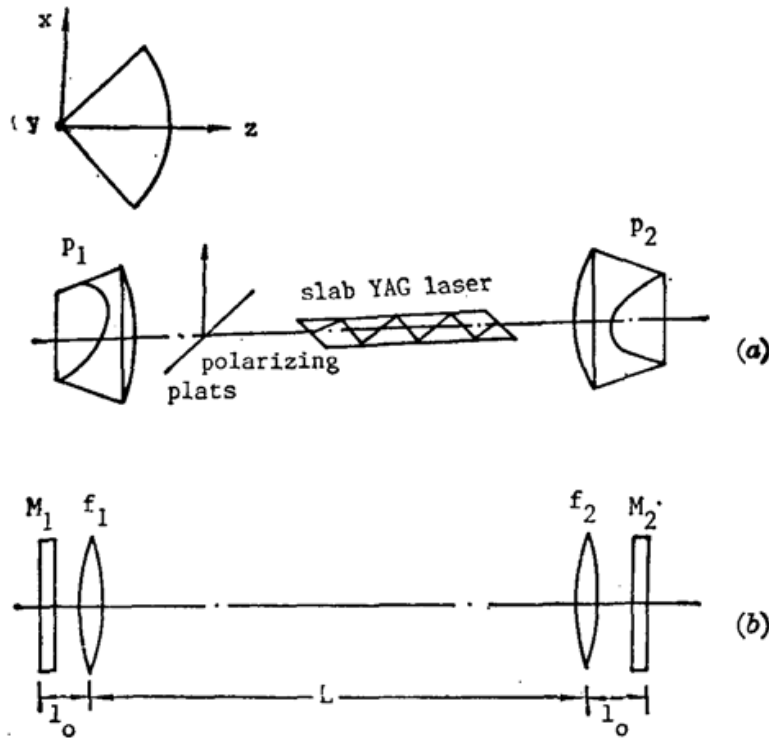


Fig. 1

- (a) schematic diagram of a crossed-prism resonator pp-polarizing plate.
- (b) equivalent multielement plane-plane resonator of Fig. 1(a)

$$\theta_0 = \frac{\lambda}{\pi w_{00}}, \tag{4}$$

式中  $\theta_0$  为远场发散角,  $\lambda$  为激光波长。对多模工作情况, 设模序数为  $p, l$  (圆形域), 则远场发散角<sup>[4]</sup>

$$\theta_{p,l} \cong \sqrt{2p+l+(1/2)} \theta_0. \tag{5}$$

对更为复杂的光腔, 例如使用棱镜腔的高功率泵浦棒状固体激光器, 激光介质可等效为一个具有可变焦距  $f$  的热透镜如图 2 所示\*,  $f_1 \sim f$  间的光腰  $w_{00}$  及位置  $L_{01}$ ,  $f_2 \sim f$  间的光腰  $w_{00'}$  及位置  $L_{02}$  (以  $M_2$  为参考), 亦不难使用文献 [3] 中的方法, 推导出相应计算公式。

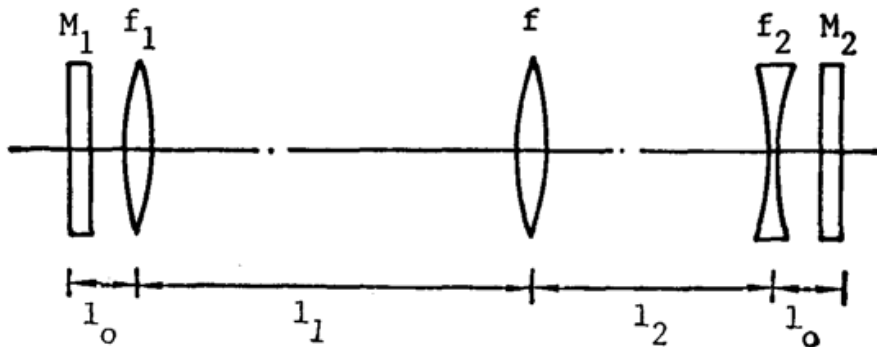


Fig. 2 Equivalent resonator of the crossed-prism resonator with a thermal lens

稳定交叉棱镜腔的数值计算例如表 1 所列。

现在分析光腔的失调特性。使用矩阵方法, 得出球面棱镜  $P_i$  在  $XOZ$  和  $YOZ$  面的变换矩阵为

\* 应注意这一等效不能用于板条激光器。

Table 1 Numerical examples of crossed-prism stable resonator

	$R_1(m)$	$R_2(m)$	$l_0(mm)$	$L(mm)$		$W_{00}(mm)$	$L_{01}(mm)$	$W_{00'}(mm)$	$L_{02}(mm)$	$g_1^*g_2^*$	(备注)
I	$\infty$	1.2	6.6	761.8		0.62	0			0.68	IV 中取 $f=5m$ ( $f=5m$ in IV)
II	$\infty$	1.9	6.6	761.8		0.72	0			0.80	
III	1.9	1.2	6.6	761.8		0.57	271.1			0.54	
IV	1.9	1.2	6.6	$l_1(mm)$ 250	$l_2(mm)$ 400	0.53	191.5	0.53	341.6	0.51	

$$T_{xoz,i} = \left( \begin{array}{cc} -1 + 2l_0[(n-1)/R_i] & -2l_0 \\ (n-1)\{(2/R_i) - 2l_0[(n-1)/R_i]\} & -1 + 2l_0[(n-1)/R_i] \end{array} \right), \quad (6)$$

$$T_{yoz,i} = -T_{xoz,i}$$

在实验中常有  $l_0 \ll L$ ,  $R_1, R_2$ , 于是(6)式可简化为

$$\left. \begin{array}{l} T_{xoz,i} = \left( \begin{array}{cc} -1 & 0 \\ (2/R'_i) & -1 \end{array} \right), \\ T_{yoz,i} = \left( \begin{array}{cc} 1 & 0 \\ -(2/R'_i) & 1 \end{array} \right), \\ R'_i = [R_i/(n-1)] = f_i, \quad (i=1, 2) \end{array} \right\} \quad (7)$$

当棱镜失调时, 将(7)式增广, 分别得出在  $XOZ$  面(相当于棱镜  $P_i$  绕  $Y$  轴转  $\alpha_{ix}$  角)和  $YOZ$  面(相当于棱镜  $P_i$  绕  $X$  轴转  $\alpha_{iy}$  角)的  $4 \times 4$  失调矩阵<sup>[5]</sup>

$$\left. \begin{array}{l} M_{xoz,i} = \left( \begin{array}{cccc} -1 & 0 & 0 & 0 \\ (2/R'_i) & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right), \\ M_{yoz,i} = \left( \begin{array}{cccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -(2/R'_i) & 1 & 0 & -2\alpha_{iy} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \end{array} \right\} \quad (8)$$

由失调灵敏度参量  $D$  的定义<sup>[4,5]</sup>, 并利用(8)式, 经矩阵计算得到棱镜  $P_i$  在  $X$  方向失调时的失调灵敏度参量  $D_{yoz,i}$  为

$$\left. \begin{array}{l} D_{yoz,1}^2 = \frac{\pi L}{\lambda} \left( \frac{g_2}{g_1} \right)^{1/2} \frac{1 + g_1 g_2}{(1 - g_1 g_2)^{3/2}}, \\ D_{yoz,2}^2 = \frac{\pi L}{\lambda} \left( \frac{g_1}{g_2} \right)^{1/2} \frac{1 + g_1 g_2}{(1 - g_1 g_2)^{3/2}} \end{array} \right\} \quad (9)$$

$$g_1 = 1 - (L/R'_1), \quad g_2 = 1 - (L/R'_2). \quad (10)$$

由(8)、(9)式和失调灵敏度参量的物理意义知:

(1) 与同腔长  $L$  曲率半径为  $R'_1, R'_2$  组成的稳定球面腔相比较, 在  $X$  方向的失调特性

相同\*,但与平行平面腔比较,则对失调的不敏感性大为增加;

(2) 棱镜稳定腔在  $Y$  方向对小失调是完全不敏感的。

## 2. 非稳共焦型棱镜腔

为了进一步提高光腔的选模能力,对板条固体激光器也可采用非稳共焦型的设计方案。

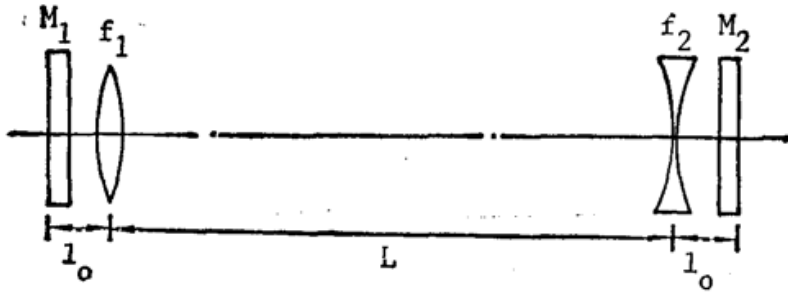


Fig. 3 Equivalent resonator of the crossed-prism unstable resonator

现采用对多元件非稳腔的  $ABCD$  矩阵法<sup>[6]</sup>对此作一具体分析。对图 3 所示情况(光腔几何参数与图 1(b)相似,已标记在图上但多选用  $f_2 < 0$  当按实验要求在图 1(a)所示方向耦合输出准直平行光时,应先计算以  $f_1$  为参考,腔内往返一周矩阵  $T$  之值

$$\begin{aligned}
 T &= \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -(1/f_1) & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2l_0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -(1/f_1) & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 &\quad \times \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -(1/f_2) & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2l_0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -(1/f_2) & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (11)
 \end{aligned}$$

平行光输出条件(相当于文献[6]中的广义共焦条件)为  $C=0$ ,由(11)式得

$$L = \frac{1}{2} \left( \frac{f_1^2}{l_0 - f_1} + \frac{f_2^2}{l_0 - f_2} \right) + f_1 + f_2, \quad (12)$$

共轭物、像点位置

$$r = f_1 - l_0, \quad r_2 = l_0 - f_2. \quad (13)$$

往返一周放大率

$$M = 2g_1'g_2' - 1 \pm 2\sqrt{g_1'g_2'(g_1'g_2' - 1)}. \quad (14)$$

能量损耗率

$$\Gamma = 1 - \frac{1}{M^2}. \quad (15)$$

(14)式中  $g_1'$ ,  $g_2'$  如(2)式所示。式中开方号前 ± 号取舍法则为:对正支非稳腔 ( $g_1'g_2' > 1$ ) 取“+”,对负支非稳腔 ( $g_1'g_2' < 0$ ) 取“-”。

这一方法亦可推广用于腔内含有热透镜  $f$ (棒状固体激光器)时光腔的设计。对图 4 所示光腔(腔几何参数见图),稍为复杂的计算得到非稳共焦型腔的设计方程为

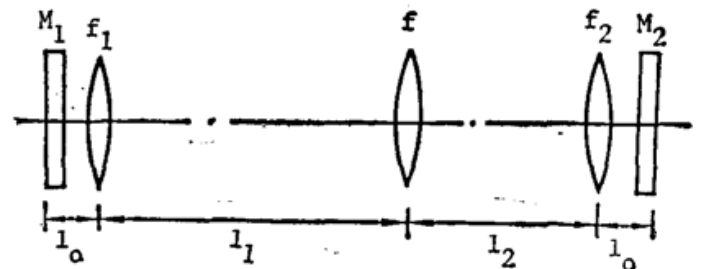


Fig. 4 Equivalent resonator of the crossed-prism unstable resonator with a thermal lens

$$\begin{aligned}
 \Delta_2 [(l_0 - f_2)\Delta_2 - f_2^2] [2(l_0 - f_1)\Delta_1 - f_1^2] &= f^2(l_0 - f_1) [2(l_0 - f_2)\Delta_2 - f_2^2], \\
 \Delta_1 &= l_1 - f - f_1, \quad \Delta_2 = l_2 - f - f_2, \quad (16)
 \end{aligned}$$

\* 若考虑(7)式引入的近似后,在  $X$  方向失调特性与稳定球面腔相似。

共轭物, 像点位置

$$r_1 = f_1 - l_0, \quad r_2 = l_0 - f_2 - (f_2^2 / \Delta_2), \quad (17)$$

往返一周放大率  $M$  和能量损耗率  $\Gamma$  分别为

$$\left. \begin{aligned} M &= 2G_1G_2 - 1 \pm 2 \sqrt{G_1G_2(G_1G_2 - 1)}, \\ \Gamma &= 1 - (1/M^2), \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$$\left. \begin{aligned} G_1 &= \frac{(f^2 - \Delta_1\Delta_2)(l_0 - f_2) + f_2^2\Delta_1}{f_1f_2f}, \\ G_2 &= \frac{(f^2 - \Delta_1\Delta_2)(l_0 - f_1) + f_1^2\Delta_2}{f_1f_2f}, \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

非稳共焦型棱镜腔的数值计算例如表 2 所列。工作于非稳共焦状态的棱镜腔, 在小失调条件下, 在  $Y$  方向有完全不敏感的特征, 在  $X$  方向对失调亦比平行平面腔大为不敏感<sup>[7]</sup>。

Table 2 Numerical examples of crossed-prism unstable resonator

	$R_1(\text{m})$	$R_2(\text{m})$	$l_0(\text{mm})$	$L(\text{mm})$		$r_1(\text{mm})$	$r_2(\text{mm})$	$g_1^*g_2^*$	$M$	$\Gamma$	(备注)
I	1.2	-0.26	6.6	933.4		2393.4	526.6	1.73	4.68	0.95	
II	0.70	-0.26	6.6	433.4		1393.4	526.6	1.28	2.74	0.87	III, IV 中取 $f=2m$
III	1.2	-0.26	6.6	$l_1(\text{mm})$	$l_2(\text{mm})$	2393.4	737.9	1.27	2.69	0.86	$(f=2m \text{ in III, IV})$
				522	200						
IV	0.70	-0.26	6.6	$l_1(\text{mm})$	$l_2(\text{mm})$	1393.4	714.4	1.11	1.93	0.73	
				284	40						

## 二、实验研究

实验是在作者设计的流动空气-水混合冷却式板条固体激光器<sup>[1]</sup>上进行。其输出为全偏振光, 激光能量  $E_{\text{out}}$  随二棱镜棱线之间的交角  $\tilde{\alpha}$  而改变, (棱镜  $P_2$  的棱线应与介质膜片起偏方向平行) 实验曲线如图 5 所示。由图知, 当  $\tilde{\alpha} \cong 22.5^\circ, 67.5^\circ$  时有最大耦合输出, 这是

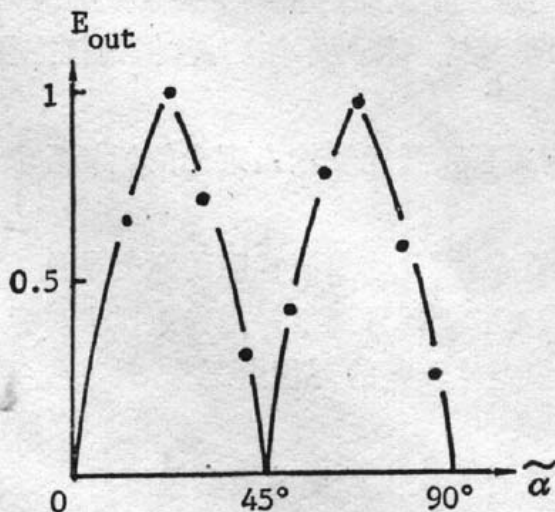


Fig. 5 Relative output energy  $E_{\text{out}}$  as a function of crossed angle  $\tilde{\alpha}$  of two prisms

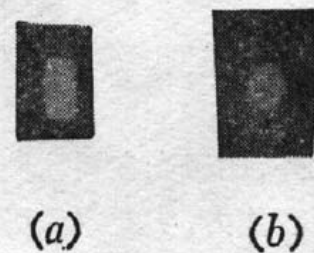


Fig. 6 Burnt spots of slab laser for (a) conventional resonator; (b) crossed-prism resonator

与电光调 Q 情况不同的。

使用交叉棱镜腔, 可将通常板条激光器输出的矩形光斑变为圆形如图 6 所示。实验中我们观察到, 一般情况下, 输出光斑为椭圆, 只有精心调整才能得到圆光斑, 这是由板条激光器本身<sup>[8]</sup>和棱镜  $P_1$  在  $XOZ$ 、 $YOZ$  面非对称性决定的像散光束的特征。而且, 在传输过程中, 还会出现椭圆形光斑“旋转”的现象。上述的一些实验结果, 是无论使用稳定或非稳棱镜腔板条激光器, 都观察到的共同特征。

### 1. 稳定交叉棱镜腔

使用表 1 中 I、II、III 类腔,  $\tilde{\alpha}=22.5^\circ$  作了 Nd:YAG 板条激光器失调实验, 典型曲线

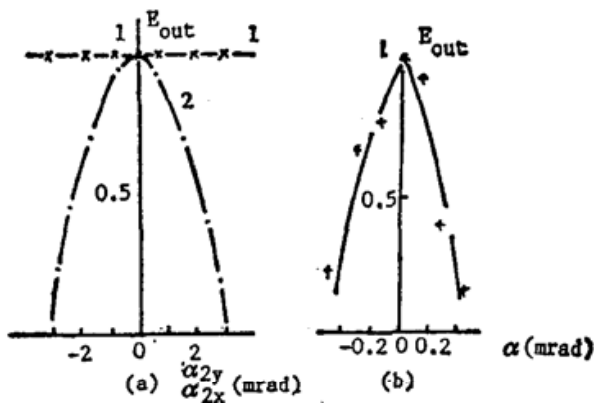


Fig. 7 Relative output energy vs. tilt angle for (a) crossed-prism stable resonator, Parameters are compiled in III of Table 1; (b) plane-plane resonator.

如图 7(a) 所示。由图 7(a) 知, 棱镜腔在  $Y$  方向是完全不灵敏的, 在  $X$  方向则有大约  $5 \text{ mrad}$  的失调容限。将二棱镜换用平行平面镜后所作的对比实验结果如图 7(b) 所示, 由此可清楚地说明使用交叉棱镜腔在改善板条激光器稳定性方面的优点; 实验结果与作者上述的理论分析相符合。

采用打靶法<sup>[9]</sup>, 并用公式

$$2\theta = (\phi/f), \quad (20)$$

(式中  $f$  为聚焦透镜焦距,  $\phi$  为在透镜后焦面上激光光斑的直径) 求得远场发散角的典型值为

$$\theta \simeq 2 \text{ mrad}. \quad (21)$$

### 2. 非稳共焦棱镜腔

作者用表 2 中 I、II 数据作了非稳共焦棱镜腔的实验。实验中首先用 He-Ne 激光粗调, 然后微调腔长使之共焦。对非稳共焦棱镜腔 I、II 所作失调曲线与图 7(a) 相似, 故从略。

## 三、讨 论

(1) 本文的理论分析和实验研究都表明, 使用稳定交叉棱镜腔有进一步改善板条激光器性能, 特别是具有对失调不灵敏性的优点, 且能将矩形截面的光束变为圆或椭圆形, 其发散角约为  $2 \text{ mrad}$ 。与非稳共焦型棱镜腔比较, 虽然其选模特性不如后者, 但调整方便、易于出光。

(2) 实验还表明, 使用非稳共焦型棱镜腔能将板条激光器输出束光的远场发散角压缩到接近衍射极限。

(3) 此外, 由于光在棱镜腔内有“兜圈子”的效应, 因此使用棱镜腔的激光器还有较强的补偿腔内畸变能力, 实验中使用不同质量的 YAG 板条, 都得到很好的光束质量。采用风冷的交叉棱镜腔板条固体激光器\*, 可在无水、机械稳定性较差的环境中工作, 对某些实际应用来说, 不失为可供选择的一种设计方案<sup>[1]</sup>。

(4) 容易证明, 使用(6)式或节一理论分析方法计算交叉棱镜腔模参数所得结果相同。因此, 将棱镜腔等效为多元件平行平面腔在求模参数时是正确的。但是(6)~(8)式表明, 球面

\* 实验中氙灯用水冷的目的是为了延长灯的使用寿命, 完全可换用风冷。

棱镜在  $XOZ$  面和  $YOZ$  面的某些光学性质, 例如失调特性是不同的, 所以本文在分析棱镜腔的失调问题时没有使用节一理论分析的等效法。由此亦说明针对具体问题, 正确、灵活地使用矩阵光学的变换技巧和不同等效方法在光腔分析中是十分重要的。

作者对西德 H. Weber 教授、北京理工大学邓仁亮、魏光辉教授和成都 208 厂常伟工程师在实验工作中的支持和有益讨论谨致谢忱。

### 参 考 文 献

- [1] B. Lu *et al.*; *Proc. SPIE*. 1989, Vol. 1021, 175~180. 吕百达等;《中国激光》, 1989, 16, No. 2 (Feb), 108~110.
- [2] 邓仁亮等;《光学学报》, 1984, 4, No. 8 (Aug), 721~725.
- [3] 吕百达等;《激光谐振腔》, 1988, 15, No. 12 (Dec), 727~731.
- [4] H. Weber;《激光谐振腔》, (华中工学院出版社, 武汉, 1983), 104, 157.
- [5] S. Wang, H. Weber; 'Matrix Optics' 9to be published.
- [6] A. E. Siegman; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1976, QE-12, No. 1 (Jan), 35~39.
- [7] 私人通讯。
- [8] 陆璇辉等;《中国激光》, 1988, 15, No. 6 (Jun), 371~373.
- [9] 私人通讯。

## Slab Nd:YAG laser using crossed prism resonator

LÜ BAIDA, CAI BANGWEI, LIAO YAN, XU SHIYOU AND HUANG XIAOYUE

(Department of Physics, Sichuan University, Chengdu)

(Received 7 March 1989; revised 10 July 1989)

### Abstract

The characteristics of a slab Nd:YAG laser with crossed-prism stable unstable confocal resonator are analysed theoretically and investigated experimentally. It has been shown that the flowing air-water cooled slab laser using crossed-prism resonator demonstrates high beam quality and mechanical insensitivity to prism tilt, and some practical applications can be expected.

**Key words:** crossed-prism resonator; slab laser.