

一种新型的正交棱镜望远镜激光共振腔

陈德章

张承铨

卢亚雄

(西南技术物理研究所, 成都)

(电子科技大学, 成都)

摘要: 本文描述了正交屋脊棱镜-复合全内反射棱镜望远镜腔的特性。实验测得在15pps重复频率下激光输出峰值功率1.3MW, 光束远场发散角为0.6mrad, 敏感方向最大失调容限角约为1mrad。

A new-type telescopic resonator with cross prisms

Chen Dezhang, Zhang Chengquan

(Southwest Institute of Technical Physics)

Lu Yaxiong

(University of Electronic Science and Technology of China)

Abstract: This paper emphasizes the properties of a new type telescopic resonator with a porro prisms cross with a compound total internal reflection prisms. The experiments show that the peak output power of the laser is 1.3 MW at the pulse rate of 15 pps, the far-field divergency angle is 0.6 mrad. The biggest misalignment tolerance angle is approximately 1 mrad in sensitive orientation.

一、引 言

由于军用激光目标指示器使用环境恶劣, 一般要求具有高功率Q开关输出、小的远场发散角和抗失调稳定性。针对这些要求, 我们设计了一种采用屋脊棱镜和复合全内反射棱镜正交的望远镜共振腔, 如图1所示。图中, P_2 为屋脊棱镜; P_1 为复合全内反射棱镜; S为Nd:YAG棒; F为介质偏振片; R为LiNbO₃晶体; TL为可调焦望远镜。腔参数的选择为:

- 1. 屋脊棱镜的屋脊线与偏振片透光方向的夹角取近似45°;
- 2. 复合全内反射棱镜的尖棱GH在 ΔEFH 面中成的象HG' (见图2)与屋脊线的夹角近似为 $\pi/2$, 但不等于 $\pi/2$, 以 π 为单位

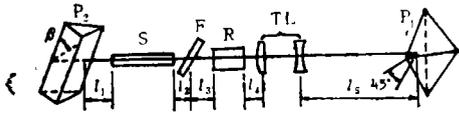


图1 共振腔光路图

取无理数; 3. HG'与LiNbO₃晶体快慢轴的夹角为 $\pi/4$ 。

二、共振腔特性分析

1, 零偏压封锁特性

光在复合全内反射棱镜 P_1 中的作用过程如图2所示^[1]，入射光的S分量和P分量在棱镜内转换次数相同，其过程分别为 $S \rightarrow P \rightarrow P \rightarrow S$ 和 $P \rightarrow S \rightarrow S \rightarrow P$ ，S分量和P分量全反射产生的相移相同^[2]，即相对相移 δ 为零，但由于棱镜的空间反转作用引入了附加相移 π 。所以， P_1 棱镜对入射光两分量的总相移为 π 。由于 P_1 棱镜做Q开关耦合棱镜，从偏振知识分析知，开关晶体上无偏压时，返回偏振器处的线偏振光不能通过偏振器，腔处于封锁状态。当晶体两极加上四分之一波电压，返回偏振器处的线偏振光能顺利的透过，腔处于开通状态。所以，无需采取任何预偏置措施，腔具有零偏压封锁特性，电光Q开关巨脉冲工作时，不需封锁高压源。

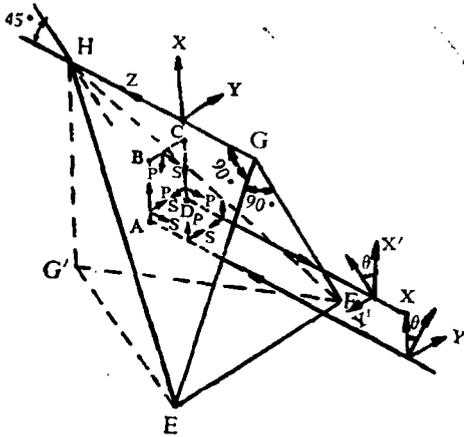


图2 复合全内反射棱镜

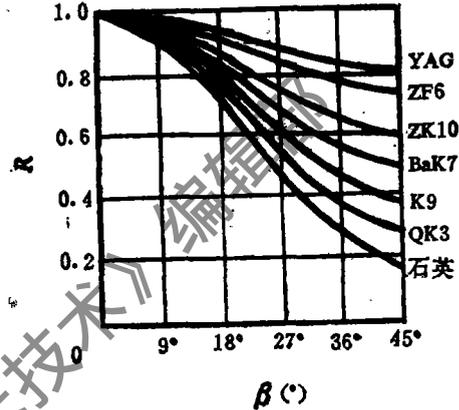


图3 $R-\beta$ 曲线

2. 等效输出耦合反射率R

设偏振片透光方向水平，并忽略棒的双折射。则R可由偏振片和 P_2 棱镜的琼斯矩阵 M_F ， M_{P_2} 确定^[3]，即

$$M_1 = M_F M_{P_2} M_F, \quad R = M_1 \cdot M_1^*$$

$$M_{P_2} = \begin{bmatrix} a & jb \\ jb & a^* \end{bmatrix}$$

$$M_F = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$a = \cos(p/2) + j \sin(p/2) \cos(2\beta)$$

$$b = \sin(p/2) \sin(2\beta)$$

$$p = \pi + 4 \tan^{-1} [\cos i \sqrt{\sin^2 i - n^{-2}} / \sin^2 i]$$

式中， i 为入射角， n 为 P_2 棱镜的折射率， β 为屋脊线同偏振片透光方向的夹角， p 为 P_2 棱镜的相移。

$$\therefore M_1 = M_F M_{P_2} M_F = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & jb \\ jb & a^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R = M_1 \cdot M_1^* = \cos^2(p/2) + \sin^2(p/2) \cos^2 2\beta$$

可见，R与 p 和 β 有关， $R-\beta$ 曲线如图3所示。

3. 消光比

消光比是指偏振片的最大透射率与最小透射率之比。它可由偏振片，Q开关晶体和 P_1 棱

镜的琼斯矩阵之积确定^[3], 即:

$$M_2 = M_F M_Q M_{P_1} M_Q M_F$$

式中, M_Q , M_{P_1} 为 LiNbO_3 和 P_1 棱镜的琼斯矩阵, 分别为:

$$M_{P_1} = \begin{pmatrix} j\cos^2\beta_1 & j\sin^2\beta_1 \\ j\sin^2\beta_1 & -j\cos^2\beta_1 \end{pmatrix}$$

$$M_Q = \begin{pmatrix} \cos(\delta_q/2) + j\sin(\delta_q/2)\cos 2p_q & j\sin(\delta_q/2)\sin 2p_q \\ j\sin(\delta_q/2)\sin 2p_q & \cos(\delta_q/2) - j\sin(\delta_q/2)\cos 2p_q \end{pmatrix}$$

$$\delta_q = V_Q \left[\frac{2n}{\lambda} n_Q^2 r_{22} d/a \right]$$

式中, β_1 是 P_1 棱镜的取向角; p_q 为 LiNbO_3 晶体的取向角; δ_q 为其位相延迟; n_Q 是其折射率, a , d 是晶体的长和宽, r_{22} 是其电光系数, V_Q 是晶体上所加的电压。

$$\text{令 } a_1 = \cos(\delta_q/2) + j\sin(\delta_q/2)\cos 2p_q$$

$$b_1 = \sin(\delta_q/2)\sin 2p_q$$

$$c_1 = \cos 2\beta_1$$

$$d_1 = \sin 2\beta_1$$

$$m_2 = ja_1^2 c_1 - 2a_1 b_1 d_1 + jb_1^2 c_1$$

$$\therefore M_2 = M_F M_Q M_{P_1} M_Q M_F$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 & jb_1 \\ jb_1 & a_1^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} jc_1 & jd_1 \\ jd_1 & -jc_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 & jb_1 \\ jb_1 & a_1^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} m_2 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

透射率 $T = M_2 \cdot M_2^* = m_2 \cdot m_2^*$, 对于典型的 Q 开关 1/4 波长工作方式, p_q 为 $\pm \pi/4$ ^[3], 得:

$$T = m_2 \cdot m_2^* = \cos^2 2\beta_1 + \sin^2 2\beta_1 \sin^2 \delta_q$$

$$\text{令 } dT/d\delta_q = 0, \quad \text{得 } \delta_q = 0 \quad \text{或 } \delta_q = \pi/2$$

$$\text{当 } \delta_q = 0, \quad T_{\min} = \cos^2 2\beta_1$$

$$\text{当 } \delta_q = \pi/2, \quad T_{\max} = 1$$

$$\therefore \text{消光比} = T_{\max}/T_{\min} = \frac{1}{\cos^2 2\beta_1}$$

由于 β_1 取 $\pi/4$, 故消光比为无穷大。因存在各种缺陷, 一般为几百至壹千。从上可见, $\delta_q = 0$, T_{\min} 取零, 说明开关处于封锁状态, 再一次说明腔具有零电压封锁特性。

4. 调制特性

电光 Q 开关的透射率 T 与晶体所加电压的关系称为调制特性。正常工作时, p_q , β_1 都取 $\pi/4$,

$$\text{则: } T = \sin^2 2\beta_1 \sin^2 \delta_q + \cos^2 2\beta_1 = \sin^2 \delta_q$$

可见, T 仅与 δ_q 有关, 即完全由所加电压确定。

5. 抗失调性

由于屋脊棱镜的屋脊线同复合全内反射棱镜的 G'H 正交构成腔, 形成了补偿结构, 棱镜失调引起腔内光线方向的改变总是限制在最大 2α 内 (α 为失调角)。而平-平腔在同样失调角 α 下, 光线方向变化为 $(2m+1)\alpha$, m 是光线在腔内振荡次数。所以, 腔具有抗失调稳定性。

6. 动态热稳定性

动态热稳腔是指腔的激光输出特性对Nd:YAG棒的热焦距 f 的扰动不敏感,一般以输出光斑 w 为代表即 $\frac{dw}{df} = 0^{[4]}$ 。由于在腔的反馈臂插入可调焦望远镜,适当选取失焦距 δ 就可补偿棒的热透镜效应,使腔的输出特性对 f 的扰动不敏感,即具有动态热稳定性。

三、失焦距 δ 的选择

望远镜失焦是为了补偿棒热焦距 f 的扰动。下面从动态热稳腔的必要条件 $G_1 \cdot G_2 \approx 1/2$ 出发^[5],并根据自孔径选模条件 $r/w \approx 1.5$,用矩阵分析法和计算机模拟求望远镜的失焦距 δ 。

屋脊棱镜和复合全内反射棱镜的光线作用矩阵分别为:

$$\text{屋脊棱镜} \begin{bmatrix} 1 & 2h/n_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, n_2 \text{ 为折射率, } h \text{ 为脊高。}$$

$$\text{复合全内反射棱镜} \begin{bmatrix} 1 & 2H/n_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, n_1 \text{ 为折射率, } H \text{ 为尖棱GH长度。}$$

$$\therefore \begin{bmatrix} 1 & 2h/n_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & h/n_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & h/n_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 2H/n_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & H/n_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & H/n_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

可见,它们可等效为平面镜和长度为 h/n_2 或 H/n_1 的空气层系统的矩阵。

根据文献[5],失焦距为 δ 的望远镜的光线作用矩阵可等效为长为 $-f_1$ 的空气层、焦距为 f_r 的薄透镜、紧靠的倍率为 M 的薄望远镜和长为 $-f_2$ 的空气层的组合系统的矩阵,其中 f_1 , f_2 和 M 分别为望远物镜、目镜的焦距和倍率, $1/f_T = \delta/f_1^2$ 。

经过以上等效,图1所示腔的等效光路图如图4所示。

$$\text{式中, } \begin{cases} L_1 = h/n_2 + l_1 + l/2n_0 \\ L_2 = l/2n_0 + l_2 + l_3 + d/n_3 + l_4 + (-f_1) \\ L_0 = -f_2 + l_5 + H/n_1 \end{cases}$$



图4 等效腔

这里将棒近似为焦距为 f 的薄透镜,其主平面离端面距离为 $l/2n_0$, n_0 , l 为棒的折射率和长度。以等效平面镜1为参考平面,腔单程作用矩阵为:

$$\begin{bmatrix} a' & b' \\ c' & d' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_r & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & 1/M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

计算得腔的 G 参数为:

$$G_1 = a' - \frac{b'}{R_1} = a' = M \left[\left(1 - \frac{L_1}{f} \right) - \left(L_1 + L_2 - \frac{L_1 L_2}{f} \right) / f_r \right] \quad (1)$$

$$G_2 = d' - \frac{b'}{R_2} = \left[1 - \frac{L_2 + M^2 L_0}{f} \right] / M - \frac{M L_0}{f_r} + \frac{M L_0 L_2}{f f_r} \quad (2)$$

$$b = b' = (L_1 + L_2 + M^2 L_0) / M - \frac{L_1 L_2}{M f} + \frac{M L_1 L_2 L_0}{f f_r} - M L_0 \left(\frac{L_1}{f} + \frac{L_1}{f_r} + \frac{L_2}{f_r} \right) \quad (3)$$

因 $G_1 \cdot G_2 = 1/2$, 将 $G_1 \cdot G_2$ 代入, 得:

$$AD_T^2 + BD_T + C = 0 \quad (4)$$

式中, $D_T = 1/f_T = \delta/f_1^2$

$$A = \left(1 - \frac{L_2}{f}\right) \left(L_1 + L_2 - \frac{L_1 L_2}{f}\right) \cdot M^2 L_0$$

$$B = \left(L_1 + L_2 - \frac{L_1 L_2}{f}\right) \left(\frac{2M^2 L_0}{f} + \frac{L_2}{f} - 1\right) - M L_0$$

$$C = \left(1 - \frac{L_1}{f}\right) \left(1 - \frac{L_2}{f} - \frac{M^2 L_0}{f}\right) - \frac{1}{2}$$

令 $F = B^2 - 4AC$, 解一元二次方程得:

$$\begin{cases} \delta_1 = D_{T1} \cdot f_1^2 = f_1^2 (-B + \sqrt{F}) / 2A \\ \delta_2 = D_{T2} \cdot f_1^2 = f_1^2 (-B - \sqrt{F}) / 2A \end{cases} \quad (5)$$

等效镜面的光斑半径为:

$$\begin{cases} w_1^2 = \frac{\lambda b}{\pi} \left[\frac{G_2}{G_1(1-G_1 G_2)} \right] \\ w_2^2 = \frac{\lambda b}{\pi} \left[\frac{G_1}{G_2(1-G_1 G_2)} \right] \end{cases} \quad (6)$$

又因自孔径选模条件要求 $r/w \pm 1.5$, 此处 w 为棒处光斑半径, 分析知:

$$w = \sqrt{w_2^2 + \left(\frac{\lambda L_1}{\pi w_2}\right)^2} \quad (7)$$

从以上各式求出 w 和 f 最平稳时的 δ 值就是所求的失焦量。取 $L_1 = 120\text{mm}$, $L_2 = 0$, $f = 4.3\text{m}$, $f_1 = 150\text{mm}$, $M = 2\times$, 经计算机模拟求得 $L_0 = 800\text{mm}$, $\delta = -1.8\text{mm}$, $w_1 w_2$ 与 δ 和 $w_1 w_2$ 与 f 曲线如图5和图6所示。

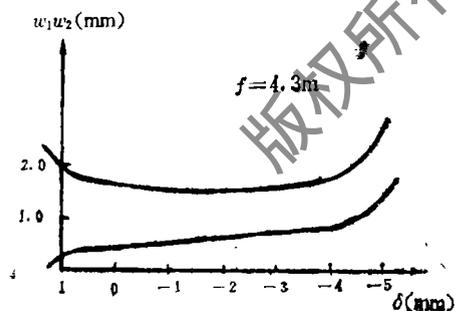


图5 $w_1 w_2$ 与 δ 曲线

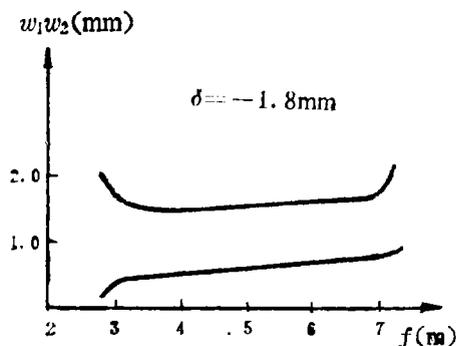


图6 $w_1 w_2$ 与 f 曲线

四、实验及结果

腔的初始参数按前言所述选择, 近似取 l_1 为100mm, l_2 为70mm, l_3 为20mm, l_4 为40mm, l_5 为710mm, 望远镜失焦量 δ 为-1.8mm, 物镜焦距为149.76mm, 目镜焦距为-74.82mm, 偏振片尺寸为 $\phi 25\text{mm} \times 3\text{mm}$, LiNbO_3 晶体尺寸为 $8\text{mm} \times 8\text{mm} \times 20\text{mm}$, 按图1

所示安装构成实际腔长约为1m的侧向输出共振腔。采用自孔径选模,可控硅脉冲 加压调Q方式。测得激光输出峰值功率为1.3MW,脉冲半宽度为30ns,采用阈值强度法测得光束远场发散角约为0.6mrad。测得 P_2 棱镜失调时,能量 E 与失调角 α 的关系曲线见图7。从曲线

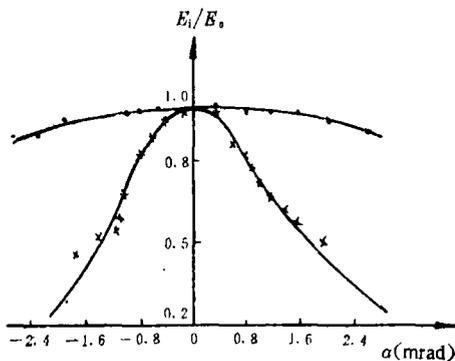


图7 能量 E 与失调角 α 的关系曲线

- 绕屋脊线方向转动 (失调)
- × 绕屋脊线垂直方向转动 (失调)

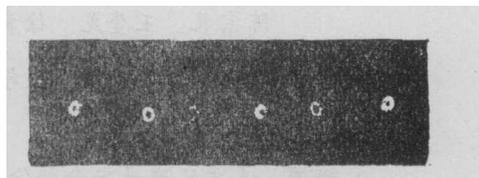


图8 远场激光光斑

可知,屋背线的垂直方向是腔的失调敏感方向,能量下降三分之一的失调角 α 约为1mrad,同时测得同参数的平-平腔的失调容限角约为0.14mrad。黑纸记录5m远处光斑见图8。

五、结果及讨论

1. 最大失调容限角是平-平腔的7倍,腔具有抗失调稳定性。
2. 光束远场发散角约为0.6mrad,光束发散角较小。
3. 远场光斑显示能量有微小扰动,但模式基本不变。
4. 无需采取预偏置措施,电光调Q工作不需封锁高压电源。
5. 实验发现,腔损耗较大,特别是插入望远镜。今后应在降低损耗、缩短腔长方面做更多的工作。

参 考 文 献

- [1] Richards J. AD-A112178, 1981
- [2] 玻恩·M, 沃耳夫·E. 光学原理. 北京: 科学出版社, 1978: 71~77
- [3] 张承铨, 罗毓昂, 卿光平 *et al.* 兵器激光, 1981; 5(6): 16~20
- [4] 卢亚雄, 吕百达. 矩阵光学. 大连: 大连工学院, 1989: 236~240
- [5] Hanna D C, Sawyers C G, Yvratich M A. Opt & Quant Electron, 1981; 13: 493~507

*

*

*

作者简介: 陈德章, 男, 1964年11月出生。工学硕士。现从事激光技术研究工作。

收稿日期: 1992年3月10日。 收到修改稿日期: 1992年5月29日。