

# 交叉棱镜望远镜腔激光器

邓仁亮 徐荣甫 张自襄 朱宝亮  
(北京工业学院)

## 提 要

本文提出了一种交叉棱镜望远镜腔,并用该腔进行了重复频率 YAG 调 Q 激光实验。理论分析和实验表明,该腔的机械稳定性好,选模能力强,对激光工作物质的光学质量要求不高。用该腔组成的激光器很容易得到发散角小于 1 mrad、强度为 10 MW 量级的激光束。

## 一、前 言

已经有不少人研究了球面非稳腔<sup>[1~2]</sup>,棱镜非稳腔<sup>[3~5]</sup>和交叉波罗棱镜腔<sup>[6~10]</sup>。为了集中球面虚共焦非稳腔和交叉波罗棱镜腔的优点,克服它们的缺点,我们提出把两者融合的设计,并研制出一种用于电光调 Q 重复频率 YAG 等激光器的新型谐振腔——交叉棱镜望远镜腔,其光路如图 1 所示(其中图 1(a)为侧向输出方式,图 1(b)为轴向输出方式)。图中 1 是激光棒, 2 是介质偏振片, 3 是电光晶体 KDP, 4 是凹棱镜 P<sub>1</sub>, 5 是凸棱镜 P<sub>2</sub>, 6 是输出光束。

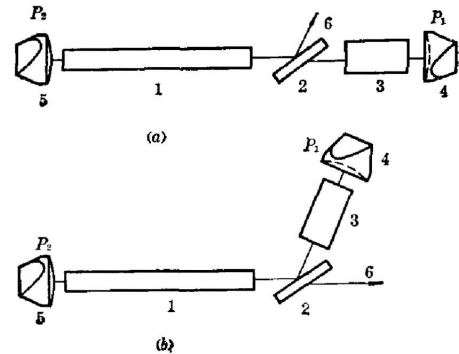


图 1 交叉棱镜望远镜腔

Fig. 1 Laser with telescopic-crossed prism resonator

## 二、腔 型 设 计

交叉棱镜望远镜腔以带球面的直角棱镜代替平面的直角棱镜而区别于交叉波罗棱镜腔,带凹球面直角棱镜 P<sub>1</sub> 的构造如图 2(a)所示,带凸球面直角棱镜 P<sub>2</sub> 的构造如图 2(b)所示。

由带凹球面的直角棱镜 P<sub>1</sub> 和带凸球面的直角棱镜 P<sub>2</sub> 组成的交叉棱镜望远镜腔,展开以后相当于一个伽利略望远镜系列,从而原则上等效于虚共焦球面非稳腔。

参照王之江等人的推导<sup>[4]</sup>,可以写出这一腔型的积分方程

$$bu(r, \varphi) = \frac{ik}{2\pi L} e^{-ikL} \int_0^a \int_0^{2\pi} A dA d\psi u(A, \psi) \times \exp\left\{-ik\left[\frac{g_1}{2L} r^2 + \frac{g_2}{2L} A^2 - \frac{Ar}{L} \cos(\varphi + \psi - \pi - \theta)\right]\right\}, \quad (1)$$

其中  $g_1 = 1 - L/R_1$ ,  $g_2 = 1 - L/R_2$ , 式中  $r, \varphi, A, \psi$  分别表示棱镜 P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub> 棱线处参考平面内的点的坐标,  $\theta$  为棱镜 P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub> 两棱线的交叉角,  $L$  为腔长,  $a$  为通光孔半径,  $R_1, R_2$  为棱镜

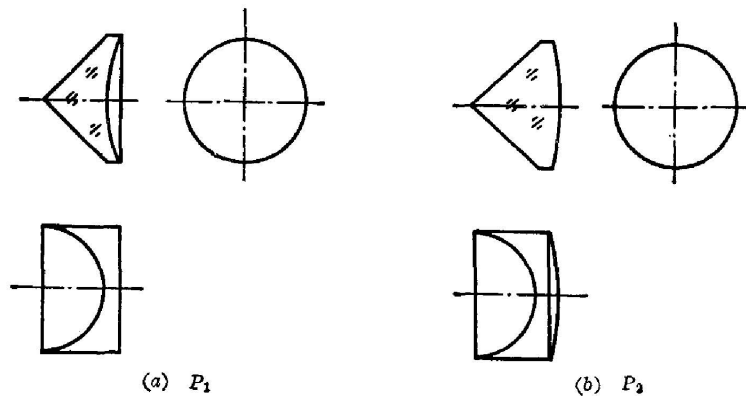


图2 带球面的直角棱镜  
Fig. 2 Porro prism with spherical surface

$P_1$ 、 $P_2$  的等效曲率半径。

由积分方程可知：(1) 当两棱镜棱线的交叉角  $\theta$  取以  $\pi$  为单位的无理数倍时，谐振腔内只存在零次角向横模，全部高次角向横模都被抑制掉了；(2) 这个方程的径向部分与球面谐振腔的径向部分完全相同，当  $g_1$ 、 $g_2$  处于不稳定区并有一定的放大倍数时，谐振腔有大的模损耗间距，从而容易得到衍射极限的单一径向横模。正是由于这种腔型角向( $\varphi$ )和径向( $r$ )强的选模能力，可以预言，即使选用一般质量的激光棒，也能得到高质量的输出光束。

为了实现实际激光器件的运转，必须对谐振腔参数进行计算，并对零件间的关系作出规定。

首先是关于两棱镜棱线间的关系，和交叉波罗棱镜腔一样，从 Q 开关最大消光比、最佳输出耦合、最高机械稳定性以及实现角向单横模选择几点出发，应当满足两个条件：(1) Q 开关一边的棱镜  $P_1$  的棱线应当与光的偏振面成  $45^\circ$  角<sup>[6]</sup>；(2) 输出耦合棱镜  $P_2$  的棱线应当与棱镜  $P_1$  的棱线交叉成接近  $90^\circ$  但不等于  $90^\circ$  的角，该角为  $\pi$  的无理数倍<sup>[5,7]</sup>。

第二是棱镜  $P_1$ 、 $P_2$  的球面曲率半径必须使谐振腔满足指定重复频率条件下的虚共焦条件。

在以上理论分析的基础上，在确定谐振腔的各个参数时，以交叉棱镜望远镜腔的放大倍数  $M$  和工作物质的热畸变量为重要。

对工作物质光学不均匀性及热畸变影响的分析表明，交叉棱镜望远镜腔对奇数级象差引起的畸变与虚共焦望远镜腔相比很小，当激光棒受到的泵浦是均匀的时候一级象差只来源于腔面的失调，由于畸变系数很小，所以腔面的失调容限很大。二级等偶数级高次象差所引起的畸变与球面虚共焦非稳腔相同，最主要的是激光棒的热透镜效应。交叉棱镜望远镜腔的热透镜效应和球面虚共焦腔一样，在实际应用中可以消除。用在实际运转条件下测得的激光棒热焦距  $f_T$  作为激光器的设计参数。

交叉棱镜望远镜腔的几何放大率  $M$  直接影响到腔损耗  $(1 - \frac{1}{M^2})$ ，选模能力和抗激光棒光学不均匀性(包括热畸变)能力。下式给出放大率  $M$  和输出耦合棱镜  $P_2$  的最佳反射率  $R$  的近似表达式

$$\ln \frac{1}{R} = (\ln M^2 + \alpha) \left[ \left( \frac{P_i}{\sqrt{2} P_\sigma} \right)^{2/\beta} - 1 \right], \quad (2)$$

式中  $\alpha$  是不包括输出的腔内损耗,  $P_i$  是工作时的输入功率,  $P_\sigma$  是  $R=1$  时的阈值功率, 棱镜  $P_1$  的反射率  $R$  为<sup>[9]</sup>

$$R = \cos^2 \left( \frac{P}{2} \right) + \sin^2 \left( \frac{P}{2} \right) \cos^2 (2\beta), \quad (3)$$

式中  $P$  是棱镜  $P_2$  引起的相移,  $\beta$  是棱镜  $P_2$  与光束偏振面的夹角。

当我们给出了棱镜  $P_2$  的反射率, 用 (2) 式可求得最佳几何放大率  $M$ 。把求得的  $M$  值放在实验中去检验, 可以找出比较合理的  $M$  值范围。

考虑到交叉棱镜望远镜腔展开以后与虚共焦球面非稳腔等效, 所以其参数计算可以在虚共焦球面非稳腔的基础上进行, 其要点如下:

设棱镜  $P_1$ 、 $P_2$  的等效焦距分别为  $f_1$ 、 $f_2$ , 则

$$f_1 = \frac{L}{M-1}, \quad (4)$$

$$f_2 = M f_1 \frac{f_T - \Delta}{f_T - M f_1}, \quad (5)$$

式中  $L$  为空腔腔长,  $\Delta$  为激光棒中间位置至棱镜  $P_2$  主面间的距离。

由  $f_1$ 、 $f_2$  可以算得棱镜  $P_1$ 、 $P_2$  的球面曲率半径为

$$R_{P_1} = -(n_1 - 1) f_1 \left[ 1 + \sqrt{1 - \frac{D_1}{n_1 f_1}} \right], \quad (6)$$

$$R_{P_2} = (n_2 - 1) f_2 \left[ 1 + \sqrt{1 - \frac{D_2}{n_2 f_2}} \right], \quad (7)$$

式中  $D_1$ 、 $D_2$  为棱镜  $P_1$ 、 $P_2$  的等效厚度,  $n_1$ 、 $n_2$  为棱镜  $P_1$ 、 $P_2$  的材料折射率。

由上式可以算得实际器件的腔长  $L_R$

$$L_R = f_T - f_1 - \frac{f_T^2}{f_1 + f_2 + \Delta} - \frac{R_{P_2} D_2}{2n_2 R_{P_1} - (n_2 - 1) D_2} + \frac{R_{P_1} D_1}{2n_1 R_{P_1} + (n_1 - 1) D_1} + C, \quad (8)$$

式中  $C$  为与谐振腔内各元件参数有关的常量。

在激光器的最终设计中我们以最小结构尺寸确定腔长, 把事先测得的在要求重频工作下的激光棒热焦距  $f_T$ , 在满足一定放大倍数  $M$  的条件下最后确定  $R_{P_1}$ 、 $R_{P_2}$ 。

采用交叉棱镜望远镜腔和电光  $Q$  开关可以组成两种输出方式的激光器。当激光棒出现退偏现象时, 侧向输出方式将有利于输出; 当要求偏振度高的输出光束时, 用轴向输出方式较好。

### 三、实验结果

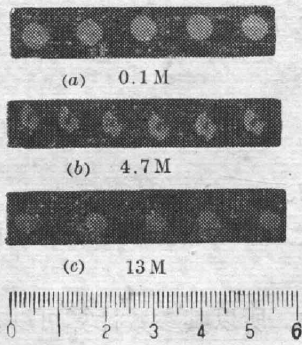
用  $\phi 6.35 \times 76.2$  mm 的 YAG 棒、介质偏振片、 $\phi 12 \times 26$  mm 的 KDP 电光晶体和  $R_{P_1} = -260$  mm,  $R_{P_2} = 700$  mm 的棱镜组成实际腔长  $L_R = 360$  mm 的侧向输出激光器, 输入能量 22 J、重复频率 15 pps, 主要测试结果如下:

#### 1. 光束质量

在输出光束的不同距离上用相纸直接烧蚀光斑进行观察。图 3 是通光口径为  $\phi 6.35$

的激光器输出能量约 100 mJ 时在所标明距离上的光斑。按照理论分析<sup>[11]</sup>, 平面波的最远一个菲涅耳衍射中心暗斑应该出现在  $m=2$  的  $Z = (\phi/2)^2/m\lambda = 4.755$  m 处。我们在该距离上看到了这个暗斑[图 3(b)], 这说明激光器的输出已接近平面波。由图 3(c) 可见, 远场光束以基模为主, 其束散在理论上只受衍射极限的限制, 为 0.407 mrad, 现测得在 13 m 处中心光斑直径约为 5 mm, 与理论值相符。用套孔法测得中心亮斑的能量超过全部激光输出的 70%。由图 3(a) 可见, 光束在近场是实心的, 不像环状输出球面共焦腔那样是空心的, 这使得远场中心亮斑的能量比环状输出之远场中心亮斑的能量更多, 次极大的能量更少<sup>[12]</sup>, 这对某些应用会更适宜。

图 3 不同距离上的烧蚀光斑  
Fig. 3 Burnt spots of laser beam for different distances



在实验中选用不同质量的 YAG 棒, 光束质量都很好。图 4 是两支 YAG 棒的干涉条纹和它们的远场光斑, 说明光学质量较差的棒, 也可以得到光束质量好的激光束。这是目前已知其它腔型所不能比拟的。

在实验中选用不同质量的 YAG 棒, 光束质量都很好。图 4 是两支 YAG 棒的干涉条纹和它们的远场光斑, 说明光学质量较差的棒, 也可以得到光束质量好的激光束。这是目前已知其它腔型所不能比拟的。

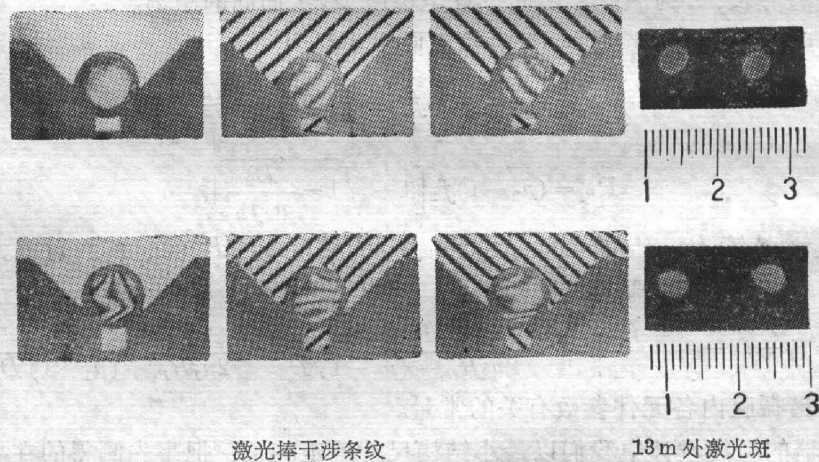


图 4 两支不同质量 YAG 棒的对比

Fig. 4 Comparison of two YAG rods with different optical quality

## 2. 机械稳定性

在最差的方向上使最敏感的输出耦合棱镜  $P_2$  失调, 测出激光输出能量下降三分之一时的失调容限达  $\pm 3$  mrad, 这比平行平面腔高一个数量级, 和交叉波罗棱镜腔相近, 具有很高的机械稳定性。

## 3. 激光输出功率

在 22 J 输入能量下得到 102.5 mJ 的输出, 测得脉冲宽度为 8.5 ns, 峰值功率达 12 MW。

## 4. 重复频率范围

当保持输入能量不变, 改变重复频率时, 例如在 10~20 pps 范围内, 输出能量和束散角都变化不大。

## 四、结 论

理论和实验结果表明,交叉棱镜望远镜腔集中了交叉波罗棱镜腔和球面虚共焦腔的优点,而克服了它们的缺点,其突出表现是:(1)基本上保持了交叉波罗棱镜腔的高机械稳定性;(2)因为兼容了交叉波罗棱镜腔角向和球面虚共焦腔径向选模能力,容易实现单横模运转;(3)由于保持了交叉波罗棱镜腔的轴对称翻转效应,故对激光棒的光学质量没有苛求,即使选用光学质量低的激光棒也可获得束散小的输出光束;此外还有近场光束实心,腔长短,重复频率有一定适应范围等优点。

最后需要说明的是本文只对电光调  $Q$  重复频率 YAG 激光器进行了讨论,但交叉棱镜望远镜腔也适用于其它激光工作物质、运转方式(包括单次、连续、静态或其它调  $Q$  方式),只要在某些方面稍作改动就可以实现。

国家科委穆荣谦同志参加了本课题的前期工作。

## 参 考 文 献

- [1] A. E. Seigman; *Proc. IEEE.*, 1965, **53**, No. 3 (Mar), 277.
- [2] R. L. Herbst *et al.*; *Opt. Com.*, 1977, **21**, No. 1 (Apr), 5.
- [3] Yu. A. Anan'ev; *Sov. J. Q. E.*, 1973, **3**, No. 1 (Jul-Aug), 53.
- [4] 王之江,方洪烈;《物理学报》, 1975, **24**, No. 6 (Jun), 454.
- [5] 中国科学院上海光学精密机械研究所 101 组;《激光》, 1976, **3**, No. 3 (Mar), 29.
- [6] USP. 3831106, 1973.
- [7] USP. 3924201, 1975.
- [8] T. G. Crow *et al.*; *Electro-Optics/Laser 78 Conference & Exposition*, (Boston, September, 1978), 305.
- [9] M. K. Chun, E. A. Teppe; *Appl. Opt.*; 1976, **15**, No. 8 (Aug), 1942.
- [10] AD. AO96538, 1981.
- [11] 姚启钧;《光学教程》, (人民教育出版社 1981), 92.
- [12] M. 玻恩, E. 沃耳夫;《光学原理》, (科学出版社, 1978), 544.

## Telescopic-crossed prism resonator

REN RENLIANG XU RONGFU MU GONGQIN ZHANG ZIXIANG AND ZHU BAOLIANG

(Beijing Institute of Technology)

(Received 23 November 1983)

## Abstract

A new type of resonator called telescopic-crossed prism resonator is proposed and investigated on a repetitive YAG laser. Theoretical analyses and experimental results have showed that this resonator has a high mechanical stability and excellent transverse mode selectivity even if a YAG rod with moderate optical quality is used. By using this resonator, it is easy to obtain a beam which can give an output power of 10 MW and its divergence angle less than 1 mr.