

## 端面抽运的正交直角棱镜腔激光器研究

万玮华, 郝培育, 滕云鹏, 李金全, 李毅, 郝海洋

### Research on an end-pumped orthogonal Porro prism cavity laser

引用本文:

万玮华, 郝培育, 滕云鹏, 李金全, 李毅, 郝海洋. 端面抽运的正交直角棱镜腔激光器研究[J]. *激光技术*, 2023, 47(5): 600–605.

WAN Weihua, HAO Peiyu, TENG Yunpeng, et al. Research on an end-pumped orthogonal Porro prism cavity laser[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 47(5): 600–605.

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### 1. 光束参量积对半导体激光器光束质量的评估

引用本文: 杨孝敬, 焦清局, 王乙婷. 光束参量积对半导体激光器光束质量的评估[J]. *激光技术*, 2018, 42(6): 859–861.

### 2. 3kW射频板条CO<sub>2</sub>激光器抛物面非稳波导腔研究

引用本文: 严拓, 郭海平, 王振, 等. 3kW射频板条CO<sub>2</sub>激光器抛物面非稳波导腔研究[J]. *激光技术*, 2016, 40(6): 796–800.

### 3. 用于光纤激光器光谱组束的外腔反馈研究

引用本文: 刘小溪, 王学锋, 阚宝玺, 等. 用于光纤激光器光谱组束的外腔反馈研究[J]. *激光技术*, 2018, 42(6): 835–839.

### 4. 负支离轴共焦非稳腔过量噪声的研究

引用本文: 吴超, 唐霞辉, 李根, 等. 负支离轴共焦非稳腔过量噪声的研究[J]. *激光技术*, 2016, 40(6): 882–887.

### 5. 9.3 μm射频激励板条波导CO<sub>2</sub>激光器的研究

引用本文: 张鹏, 任宁, 林守利, 等. 9.3 μm射频激励板条波导CO<sub>2</sub>激光器的研究[J]. *激光技术*, 2017, 41(6): 812–815.

文章编号: 1001-3806(2023)05-0600-06

## 端面抽运的正交直角棱镜腔激光器研究

万玮华, 郝培育, 滕云鹏, 李金全, 李 毅, 郝海洋

(中国航空工业集团公司 洛阳电光设备研究所 光电控制技术重点实验室, 洛阳 471000)

**摘要:** 为了获得结构紧凑、光束质量高、光轴稳定性好的机载激光辐射器, 采用 LD 端面抽运构型与正交直角棱镜腔技术对该型激光器进行研究, 基于琼斯矩阵理论分析了特殊波片实现调  $Q$  关门的原理, 通过带曲率设计的直角棱镜腔, 将腔型控制在大基模尺寸, 并实验对比了正交偏振关门与特殊波片关门两种方式。结果表明, 在正交偏振关门状态下, 20 Hz 的工作重频时获得了单脉冲能量 72.2 mJ、光束质量  $M_x^2=8$  和  $M_y^2=6$  的激光输出; 基于 K9 玻璃的直角棱镜材料, 利用 0.648 $\mu$ m 波片进行调  $Q$  关门, 在 20 Hz 的工作重频下, 获得了单脉冲能量 80 mJ、光束质量  $M_x^2=5.7$  和  $M_y^2=4.8$  的高光束质量输出, 其中激光器在  $x$  与  $y$  方向上的发散角分别为 1.65 mrad 和 1.35 mrad。这一结果对高性能小型化激光器的研发是有帮助的。

**关键词:** 激光器; 光束质量; 端面抽运; 直角棱镜腔; 电光调  $Q$

中图分类号: TN248.1 文献标志码: A doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2023.05.004

## Research on an end-pumped orthogonal Porro prism cavity laser

WAN Weihua, HAO Peiyu, TENG Yunpeng, LI Jinqian, LI Yi, HAO Haiyang

(Science and Technology on Electro-Optical Control Laboratory, Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, Aviation Industry Corporation of China, Luoyang 471000, China)

**Abstract:** In order to obtain an airborne laser radiator with compact structure, high beam quality and good optical stability, LD end-pumped configuration and orthogonal porro prism cavity technology were used to study this type of laser. Based on Jones matrix theory, the principle of realizing  $Q$ -switched with special wave-plate was analyzed, and the cavity was controlled to the large fundamental mode size through the design of Porro prism cavity mirror with suitable curvature. The results show that the laser output with single pulse energy of 72.2 mJ and beam quality of  $M_x^2=8$  and  $M_y^2=6$  can be obtained at 20 Hz repetition frequency under the condition of orthogonal polarization closed state. Based on the Porro prism material of K9 glass, 0.648 $\mu$ m wave-plate was used for  $Q$ -switched closed state. Under the working repetition frequency of 20 Hz, a high beam quality output with single pulse energy of 80 mJ, beam quality of  $M_x^2=5.7$  and  $M_y^2=4.8$  is obtained. The divergence angles of the laser in the  $x$ - and  $y$ -direction are 1.65 mrad and 1.35 mrad respectively. This result is helpful for the research and development of high performance miniaturized lasers.

**Key words:** lasers; beam quality; end-pumped; Porro prism cavity; electro-optical  $Q$ -switched

## 引 言

随着飞机载荷日益轻量化的要求, 机载激光测照辐射器在不断向小型化和轻量化发展。在冲击振动以及高低温等严苛的机载环境下, 其机械结构的微小形变, 都将影响到激光辐射器输出的光轴稳定性与能量稳定性<sup>[1]</sup>。常用的激光测照辐射器设计构型多为激光二极管 (laser diode, LD) 侧面抽运的高斯虚共焦非稳

定谐振腔构型<sup>[2]</sup>, 参考文献[3]~参考文献[9]中采用侧面抽运方式, 对小型激光测照器进行设计, 能够获得较为均匀的激光工作物质激励, 该型谐振腔在满足虚共焦条件下能够保证输出的激光具有良好的准直特性, 通过高斯膜斑尺寸来控制腔内模式实现高光束质量输出<sup>[3-9]</sup>。LD 端面抽运技术是将半导体激光器阵列发出的抽运光从端面注入激光工作物质, 其光光转化效率更高、集成度更好, 有利于实现激光测照器小型化, 同时应用基于正交直角棱镜的大基模尺寸稳定谐振腔技术, 能够在保证光束质量的同时, 获得高机械稳定性, 具有广阔的研究前景<sup>[10]</sup>。

目前, LUO 等人<sup>[11-12]</sup>研究了直角棱镜腔的偏振耦

作者简介: 万玮华 (1993-), 男, 工程师, 现主要从事固体激光器设计与应用的研究。

E-mail: wwhwanweihua@163.com

收稿日期: 2022-07-14; 收到修改稿日期: 2022-10-24

合输出特性,并采用双直角棱镜腔,研制了一台 20 Hz、60 mJ 的激光测照器。ZHANG 等人<sup>[13]</sup>利用半圆柱面 LD 侧面抽运结合直角棱镜谐振腔研制了重频 20 Hz、单脉冲能量 75 mJ、光轴漂移量小于 0.1 mrad、远场发散角 2.2 mrad 的激光器样机。LIU 等人利用侧面抽运的 porro 棱镜腔技术,研究了 1.57  $\mu\text{m}$  激光器获得 20 Hz 重频、单脉冲能量 86 mJ、发散角 5 mrad 的光参量振荡激光器样机<sup>[14-15]</sup>。LI 等人<sup>[16]</sup>对石英直角棱镜的相位补偿进行了理论研究,并验证了波片补偿 Porro 棱镜相位延迟的实际效果。

本文作者使用了一种峰值功率千瓦量级的 LD 端面抽运阵列对 Nd:YAG 晶体进行端面抽运,利用带曲率设计的正交直角棱镜,将谐振腔工作点调至大基模尺寸稳定谐振腔,并对比了正交偏振关门与特殊波片关门两种电光调  $Q$  关门方式,获得了重频 20 Hz、单脉冲能量 80 mJ 高光束质量激光实验输出。

## 1 基本理论

### 1.1 直角棱镜耦合输出端透过率分析

在双直角棱镜腔中,光束经过直角棱镜后都会发生全内反射,其依靠耦合输出端的直角棱镜配合起偏器(偏振片或偏振分光棱镜)与波片来对激光的偏振态进行控制并耦合输出,耦合输出端的光学结构模型主要由直角棱镜、波片和偏振分光棱镜(polarization beam splitter, PBS)构成,如图 1 所示。

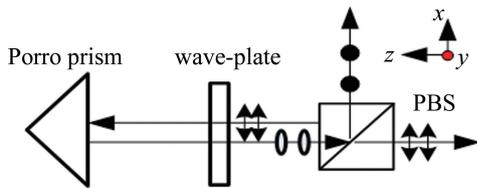


图 1 直角棱镜耦合输出端模型

Fig. 1 Coupling output model of Porro prism

在图 1 所示的坐标系下,沿着图中  $x$  方向上的  $p$  偏振光首先需要经过任意波片。图 1 所在空间的自然坐标系相对于波片的快慢轴坐标系会存在一个夹角  $\theta$  ( $\theta$  为波片快轴与图 1 水平方向上  $x$  轴的夹角)。该角度可看成是波片在旋转过程中与  $x$  方向的任意夹角,

$$\begin{cases} a = -[\cos^2\theta + \sin^2\theta\exp(i\varphi)]^2\exp(i2\varphi_x) + \sin^2\theta\cos^2\theta[1 - \exp(i\varphi)]^2\exp(i2\varphi_y) \\ b = -[\cos^2\theta + \sin^2\theta\exp(i\varphi)]\exp(i2\varphi_x)\sin\theta\cos\theta[1 - \exp(i\varphi)] + [\sin^2\theta + \cos^2\theta\exp(i\varphi)]\exp(i2\varphi_y)\sin\theta\cos\theta[1 - \exp(i\varphi)] \\ c = -[\cos^2\theta + \sin^2\theta\exp(i\varphi)]\exp(i2\varphi_x)\sin\theta\cos\theta[1 - \exp(i\varphi)] + [\sin^2\theta + \cos^2\theta\exp(i\varphi)]\exp(i2\varphi_y)\sin\theta\cos\theta[1 - \exp(i\varphi)] \\ d = [\sin^2\theta + \cos^2\theta\exp(i\varphi)]^2\exp(i2\varphi_y) - \sin^2\theta\cos^2\theta[1 - \exp(i\varphi)]^2\exp(i2\varphi_x) \end{cases} \quad (4)$$

因为波片内的快慢轴坐标的存在,偏振光透射波片时,需要先后进行两次坐标系变换,其中坐标变化矩阵

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}, \text{同时波片本身会产生附加相位 } \varphi_0. \text{ 该波片产生的快慢轴的相位延时延迟矩阵 } A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(i\varphi) \end{bmatrix}.$$

经上述分析,可得任意波片的琼斯矩阵为:

$$A = A_1 A_2 A_1 = \begin{bmatrix} \cos^2\theta + \sin^2\theta\exp(i\varphi) & \sin\theta\cos\theta[1 - \exp(i\varphi)] \\ \sin\theta\cos\theta[1 - \exp(i\varphi)] & \sin^2\theta + \cos^2\theta\exp(i\varphi) \end{bmatrix} \quad (1)$$

随后,入射光透过波片后还需要经过直角棱镜,直角棱镜对光束会起到两个作用,第 1 个是产生光束转向,其中转向矩阵  $B_1 = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ ,在直角棱镜内会发生两次全内反射,根据菲涅耳公式可知,全反射后的  $p$  偏振光与  $s$  偏振光会产生一定的相位差,该相位差主要由直角棱镜的材料所确定,实验选用直角棱镜的材料为 K9 玻璃,其在两个方向上产生的相位差<sup>[3]</sup>分别为  $\varphi_x = -0.4402\pi$ ,  $\varphi_y = -0.2201\pi$ 。因此直接棱镜内的直

角面单次反射的相移矩阵  $B_2 = \begin{bmatrix} \exp(i\varphi_x) & 0 \\ 0 & \exp(i\varphi_y) \end{bmatrix}$ 。

则直角棱镜经过两次全内反射的琼斯矩阵为:

$$B = B_1 B_2 B_1 = \begin{bmatrix} -\exp(i2\varphi_x) & 0 \\ 0 & \exp(i2\varphi_y) \end{bmatrix} \quad (2)$$

一束沿着  $x$  方向的  $p$  偏振光  $\begin{bmatrix} E_{x_0} \\ E_{y_0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$  经过上面

的光路后,入射到偏振分光棱镜输出时的琼斯矩阵为

$\begin{bmatrix} E_{x_1} \\ E_{y_1} \end{bmatrix}$ ,两者具有下述关系:

$$\begin{bmatrix} E_{x_1} \\ E_{y_1} \end{bmatrix} = D \begin{bmatrix} E_{x_0} \\ E_{y_0} \end{bmatrix} = ABA \begin{bmatrix} E_{x_0} \\ E_{y_0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,不同下标的  $E$  表示不同的电场强度分量;  $D = ABA$ ;  $a, b, c, d$  分别为:

计算时选用了目前常用的  $\lambda/4$  波片与半波片进行旋转调制,可以得到两种波片旋转下,  $s$  偏振光经过偏振分光棱镜耦合输出的透过率与快轴旋转角度  $\theta$  的关系。

图 2 中  $\lambda/4$  波片旋转  $0^\circ \sim 180^\circ$  可获得的最大耦合输出透过率约为 78%, 半波片可获得的最大耦合输出透过率约为 58%。实验中选择了半波片进行耦合输出透过率的控制, 上述构型转动波片等效于调节激光器半反镜的反射率。

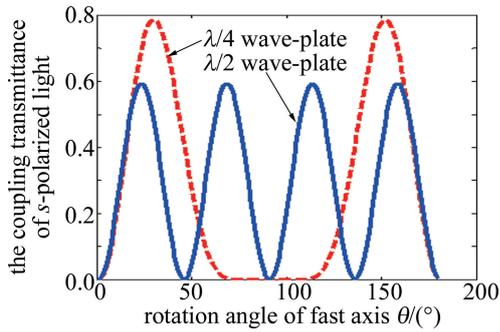


图 2  $s$  偏振光耦合透过率与波片旋转角度的关系

Fig. 2 Relationship between the coupling transmittance of  $s$ -polarized light and the rotation angle of wave-plate

## 1.2 偏振态控制与调 $Q$ 关门分析

调  $Q$  技术是在激光器中获得高峰值功率输出的有效技术途径, 在构成调  $Q$  的前提时, 需要使得谐振腔内具备调  $Q$  开门和关门两种状态, 电光调  $Q$  技术是基于谐振腔内的偏振控制而设计的, 采用加压调  $Q$ , 目前主要有两种构型方式: 一种是采用正交偏振片技术进行调  $Q$  关门; 另一种则是采用特殊波片进行腔内的关门。

正交偏振态关门时,  $p$  偏振光经过调  $Q$  晶体后被其后端正交放置的偏振分光棱镜反射出谐振腔, 谐振腔无法振荡, 而当调  $Q$  晶体施加半波电压时, 能够在谐振腔内边振荡边耦合输出; 特殊波片关门时, 需要根据直角棱镜的材料特性进行设计, 关门时需要旋转波片使得腔内处于关门状态, 由于图 3 中的直角棱镜与图 1 耦合输出端的直角棱镜为正交放置,  $x$  方向上的  $p$

偏振光入射时的琼斯矩阵为  $\begin{bmatrix} E_{x_0} \\ E_{y_0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ , 但是相对于

图 3 中的正交放置的直角棱镜的参考坐标系, 可以理解为入射的  $p$  偏振光旋转了  $90^\circ$ , 此时  $p$  偏振光入射时

的琼斯矩阵为  $\begin{bmatrix} E_{x_0'} \\ E_{y_0'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ 。

将调  $Q$  晶体看成是与  $x, y$  轴成  $45^\circ$  角的波片, 其

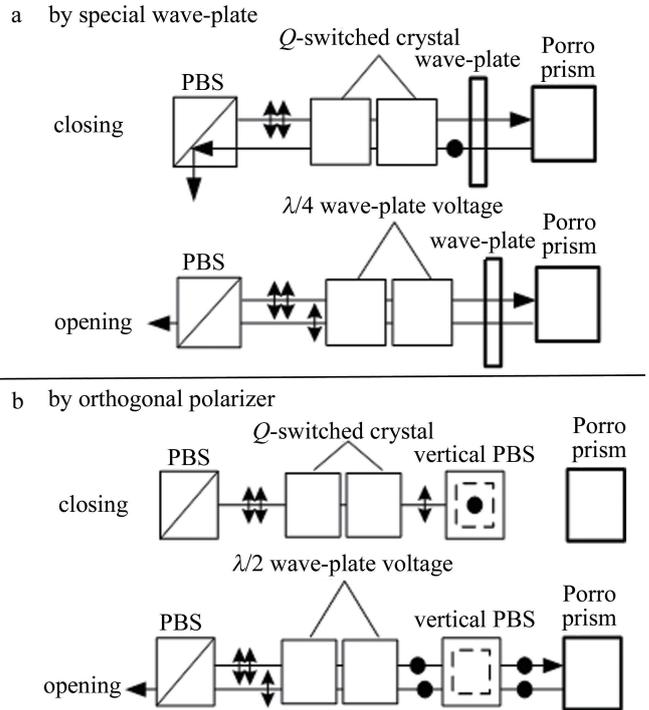


图 3 两种不同偏振态控制关门方式示意图

Fig. 3 Schematic diagram of control closed methods by two different polarization state

相位延迟与施加的电压有关, 设其琼斯矩阵为  $\mathbf{K}$ :

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} e & f \\ g & h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1 + \exp(i\delta k)}{2} & \frac{1 - \exp(i\delta k)}{2} \\ \frac{1 - \exp(i\delta k)}{2} & \frac{1 + \exp(i\delta k)}{2} \end{bmatrix} \xrightarrow[f=g]{e=h} \begin{bmatrix} e & f \\ f & e \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中,  $e, f, g, h$  是 2 阶矩阵  $\mathbf{K}$  中的各个参数;  $\delta k$  是相位延迟量, 与其调  $Q$  晶体上施加的高压有关 (实验中采用了  $\lambda/4$  波电压)。于是根据图 3 中的关门状态变化, 可得到在该直角棱镜坐标系下, 入射光经过波片和直角棱镜组合的琼斯矩阵变化后偏振态的转变满足

$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \xrightarrow{\mathbf{D}} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ , 而经过调  $Q$  晶体、波片和直角棱镜组合

再次经过直角棱镜的偏振态的转变满足  $\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \xrightarrow{\mathbf{KDK}} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ 。

仿真中主要关注  $y$  方向的偏振态, 对应于其琼斯矩阵上  $x$  方向上的归一化的幅值。

调  $Q$  晶体不施加电压时,  $p$  偏振光经过  $\mathbf{D}$  变换后变成  $s$  偏振光; 当调  $Q$  晶体施加  $1/4$  波电压,  $p$  偏振光经过  $\mathbf{KDK}$  变换后变成  $p$  偏振光。所选择的直角棱镜的材料不同, 维持关门状态时所用到的波片不同, 如图 4 所示。针对常用的 K9 玻璃制作的直角棱镜, 选用

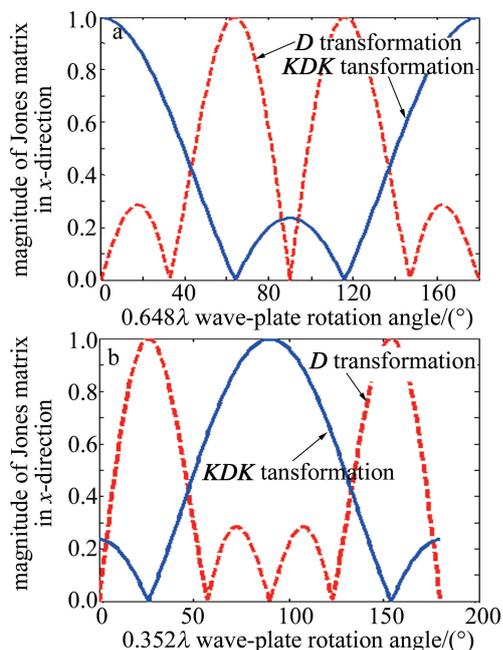


图 4 两种波片实现调 Q 关门状态

Fig. 4 Simulation results of two kinds of wave-plates to realize the Q-switched closed state

0.648λ 波片或 0.352λ 波片能够保证其关门状态。

### 1.3 直角棱镜腔型分析

为了控制激光输出光束质量,获得高光束质量,小发散角的激光输出,在构型上需要将直角棱镜的透光面加工成曲面来进行腔型控制。图 5 为激光器光路原理图。图中, KTP (kalium titanyl phosphate) 为磷酸钛氧钾, LDA (laser diode array) 为激光二极管阵列。

在光路构型上进行了波片关门(见图 5a)和正交偏振关门(见图 5b)两种状态的对比实验,两种构型选用了相同的 LD 端面抽运系统,其中抽运源为多巴条状的阵列,耦合系统能将抽运光耦合至 Nd:YAG 激光棒中,并通过分光镜实现抽运光路的折转,使得抽运光

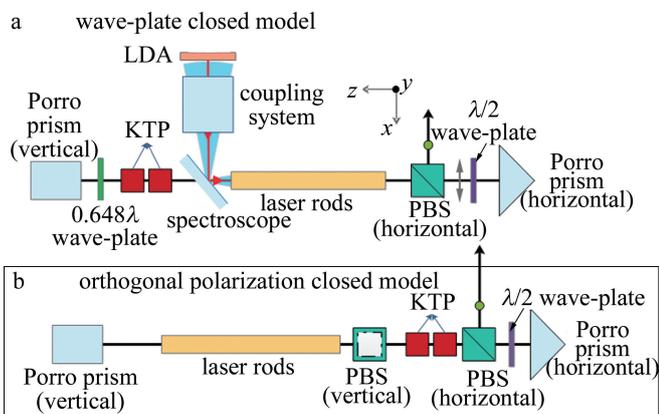


图 5 激光器光路原理图

Fig. 5 Schematic diagram of laser light path

光路与振荡激光光路相互垂直。带有曲率设计的直角棱镜在腔型设计分析时,一般根据厚透镜矩阵将其等效成一个厚透镜。

图 6 所示为该型谐振腔的循环矩阵。其中 E 和 T 为带曲率设计的直角棱镜等效厚透镜, F 为凸镜,  $L_1$ 、 $L_2$  表示距离。上述模型需要将谐振腔的参量因子控制在 0.99 左右,来实现大基膜稳定谐振腔设计。但是由于该类谐振腔处于临界腔附近,热不灵敏性差,抽运功率的变化引起激光器的热焦距扰动时,会使得谐振腔稳定性参数变小(参数变小时会影响到基模的光场分布,进而影响到激光输出光束质量)或沦为非稳腔,这些扰动对维持好光束性能是不利的,因此需要将端面抽运激光棒的热焦距准确测量出来,并保持固定的抽运功率进行抽运,根据腔型的曲率匹配和设计,可以得到谐振腔内各个位置处的基模光束分布图。

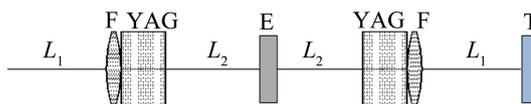


图 6 谐振腔循环矩阵组成

Fig. 6 Circular matrix composition of the resonator

图 7 中横坐标距离与图 6 中循环矩阵相互对应,说明光需要经过  $L_1$  的距离、YAG 的长度距离、 $L_2$  的距离、再一次经过  $L_2$  的距离、YAG 的长度距离和  $L_1$  的距离,是光在谐振腔内往返一次的循环。从图 7 可知,谐振腔内激光棒附近的基模光斑直径约为 1.6 mm,而设计的激光棒的直径为 5 mm,实际多阶模束腰的直径要少于该值;根据高阶模公式,预测该谐振腔可起振 4 阶次横模。

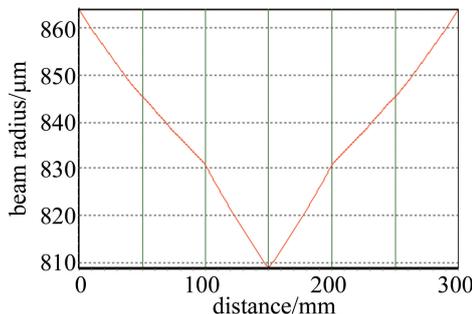


图 7 谐振腔内基模光场分布

Fig. 7 Distribution of TEM<sub>00</sub> mode light field in resonator

## 2 结果与分析

### 2.1 激光器能量与效率分析

利用激光器电源驱动 LD 阵列,其工作重频为 1 Hz/20 Hz,放电脉宽为 200 μs,采用 NOVA-II 型能量

计测量波片关门时的 LD 端面抽运激光器的输出性能,激光器输出的能量与转化效率(包含激光器的动静比与光光效率)情况如图 8 所示。

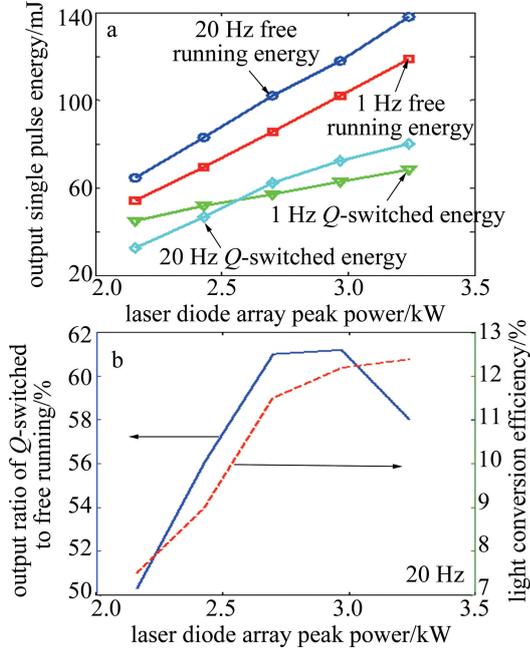


图 8 波片关门下激光输出能量与效率曲线

Fig. 8 Laser output energy and efficiency under wave-plate closed state

在 20 Hz 的条件下,LD 端面抽运的结构存在一个热焦距建立和稳定的过程,经过该过程后才能够满足大基模尺寸稳定谐振腔的条件,在 20 Hz 的条件下容易获得更高的基模能量提取,该重频下激光获得的最

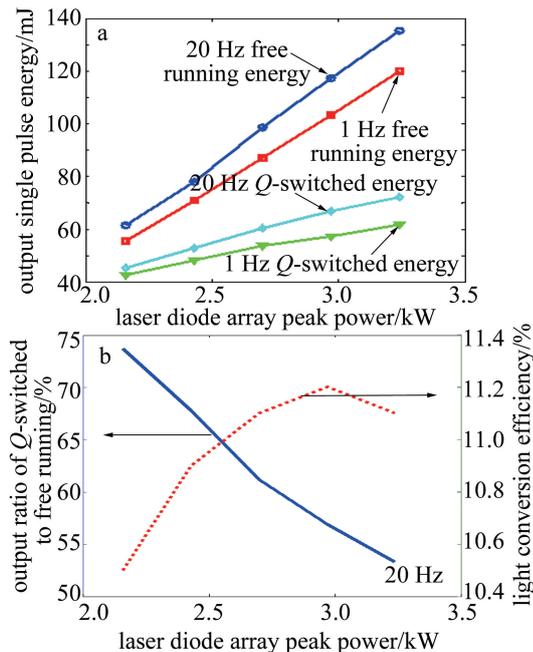


图 9 正交偏振关门下激光输出能量与效率曲线

Fig. 9 Laser output energy and efficiency under orthogonal polarization closed state

大单脉冲能量为 80 mJ,光光转化效率能达到 12.4%, LD 端面抽运的最大动静比约为 61%。

更换成正交偏振开关进行调 Q 关门后获得激光输出的性能曲线如图 9 所示。

在两种关门状态下,试验的腔型一致,但正交偏振关门的方式需要在光路中多增加一个 PBS,该关门方式的腔长略长,两种情况下的静态能量相仿,但是采用正交偏振进行调 Q 关门时,其动态输出的斜率效率和能量明显要低于波片关门的情况,此时相同抽运注入下能够获得的最大能量约为 72.2 mJ,最大的光光转化效率约为 11%。

## 2.2 激光器光束质量分析

实验时利用光束质量分析仪对两种关门情况下的激光输出光束质量进行了测量和对比,其中利用正交偏振调 Q 进行关门时所获得的光束质量输出结果如图 10 所示。

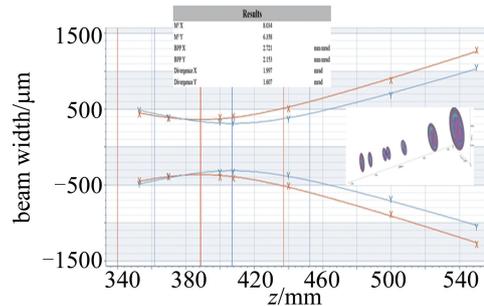


图 10 正交偏振关门下激光输出光束质量

Fig. 10 Laser output beam quality under orthogonal polarization closed state

通过图 10 可以看到,两个方向光束质量并不相同,其中水平  $x$  方向上的光束质量  $M_x^2 \approx 8$ , 竖直  $y$  方向的光束质量  $M_y^2 \approx 6.4$ , 两个方向的发散角分别为 1.99 mrad 和 1.6 mrad。

利用同样的装置测试 0.648 μm 波片进行调 Q 关门的光束质量结果如图 11 所示。两个方向上光场依然不对称,波片关门的总体效果要比正交偏振关门的效果要更好,该构型的腔长相对较短,更加匹配大基模尺

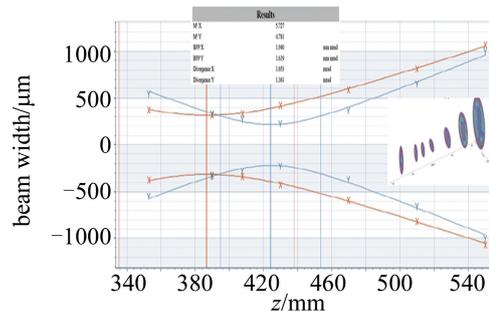


图 11 波片关门下激光输出光束质量

Fig. 11 Laser output beam quality under wave-plate closed state

寸稳定谐振的条件,其中,水平  $x$  方向上的光束质量  $M_x^2 \approx 5.7$ , 竖直  $y$  方向的光束质量  $M_y^2 \approx 4.8$ , 两个方向的发散角分别为 1.65 mrad 和 1.36 mrad, 通过套孔法实测的激光发散角约为 1.5 mrad; 根据理论计算公式, 激光器的光束质量理论值约为 5.5, 理论结果与实测的  $M^2$  结果相仿。

### 3 结 论

本文中研究了一种 LD 端面抽运的正交直角棱镜腔激光器, 通过理论与实验对比了正交偏振调  $Q$  关门和特殊波片关门两种技术途径, 均能获得较好的激光性能输出结果。利用 0.648  $\mu\text{m}$  波片作用于 K9 材料的直角棱镜进行调  $Q$  关门, 验证了理论仿真与实验相仿, 该设计能够获得良好的关门状态; 通过带曲率设计的正交直角棱镜腔, 在满足大基模尺寸谐振腔条件下, 能够获得重频 20 Hz、单脉冲能量 80 mJ、光束质量  $M_x^2 \approx 5.7$ 、 $M_y^2 \approx 4.8$  的高光束质量的激光输出, 该性能指标能够满足常规机载小型化激光测照的使用要求。本文中的技术内容对机载小型化激光测照系统激光辐射器的设计与研制具有一定的参考与借鉴作用。

### 参 考 文 献

- [1] GENG Y Y, XU G Sh, XIE G J, *et al.* Simulation analysis of the instability of the emission axis of the airborne laser finder illuminator [J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(5): 640-645 (in Chinese).  
耿园园, 徐光烁, 谢桂娟, 等. 机载激光测照器发射光轴不稳定性仿真分析[J]. *激光与红外*, 2021, 51(5): 640-645.
- [2] LÜ B D. Propagation and control of high-power laser [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999: 65-68 (in Chinese).  
吕百达. 强激光的传输与控制 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 65-68.
- [3] HUANG T, WANG K Q, LUO X, *et al.* No-temperature-controlled multi wavelength LD pumped rod shaped Nd:YAG solid-state laser [J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(1): 49-53 (in Chinese).  
黄涛, 王克强, 罗旭等. 无温控多波长 LD 抽运方棒状 Nd:YAG 固体激光器[J]. *激光与红外*, 2020, 50(1): 49-53.
- [4] GAO H, JIA K, YANG Ch, *et al.* Study on free-temperature-controlled lasers side-pumped by laser diodes [J]. *Laser Technology*, 2019, 43(1): 1-5 (in Chinese).  
高恒, 贾凯, 杨闯, 等. 激光二极管侧面抽运免温控激光器的研究 [J]. *激光技术*, 2019, 43(1): 1-5.
- [5] LIU X, CHENG Y, WAN Q, *et al.* High temperature laser diode pumped all solid state laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(7): 0701003 (in Chinese).  
刘旭, 程勇, 万强等. 高温二极管抽运全固体激光器 [J]. *中国激光*, 2016, 43(7): 0701003.
- [6] GAO H, LIU J M, YANG Ch, *et al.* Compact solid state lasers with high peak power used for remote laser range finders [J]. *Laser Technology*, 2019, 43(5): 597-600 (in Chinese).  
高恒, 刘佳铭, 杨闯, 等. 用于远程激光测距机的小体积高功率固体激光器 [J]. *激光技术*, 2019, 43(5): 597-600.
- [7] ZHAO G, LI J, PENG X J, *et al.* Compact repetitive diode pumped slab lasers without thermoelectric coolers [J]. *Laser Technology*, 2016, 40(5): 625-628 (in Chinese).  
赵刚, 李晶, 彭绪金, 等. 无热电恒温的小型重频二极管抽运板条激光器 [J]. *激光技术*, 2016, 40(5): 625-628.
- [8] LIU Y P, PENG X J, ZHAO G, *et al.* The analysis of thermal design and its simulation for air cooled YAG laser with the repetition of 50 Hz [J]. *Laser Technology*, 2021, 45(6): 735-739 (in Chinese).  
刘亚萍, 彭绪金, 赵刚, 等. 重频 50Hz 风冷 YAG 固体激光器热设计及仿真分析 [J]. *激光技术*, 2021, 45(6): 735-739.
- [9] LI Y, TENG Y P, HAO P Y. Miniature high energy symmetrically pumped conductive cooling laser [J]. *Laser Technology*, 2019, 43(1): 115-118 (in Chinese).  
李毅, 滕云鹏, 郝培育. 小型化高能量对称抽运热传导激光器 [J]. *激光技术*, 2019, 43(1): 115-118.
- [10] XIONG B, YU C L, ZHU Zh H, *et al.* Research on 200 mJ semiconductor end pumped MOPA laser [J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(3): 489-492 (in Chinese).  
熊波, 郁彩亮, 褚召华, 等. 200 mJ 半导体端面抽运 MOPA 激光器研究 [J]. *应用光学*, 2019, 40(3): 489-492.
- [11] LUO X, WANG P F, LI J X, *et al.* Anti-detuning laser with high optical axis stability [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(9): 91401 (in Chinese).  
罗旭, 王鹏飞, 李久熹, 等. 抗失谐高光轴稳定度激光器 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(9): 91401.
- [12] LUO X, WANG P F. Research on polarization coupling output characteristics of Porro prism cavity [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(10): 1244-1249 (in Chinese).  
罗旭, 王鹏飞. 直角棱镜腔偏振耦合输出特性研究 [J]. *激光与红外*, 2016, 46(10): 1244-1249.
- [13] ZHANG J, LU Ch Y, ZHANG X, *et al.* Laser-diode pumped right-angle prism cavity electro-optic Q-switch solid state laser [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(7): 617-620 (in Chinese).  
张晶, 卢常勇, 张玺, 等. LD 抽运直角棱镜腔电光调 Q 固体激光器 [J]. *激光与红外*, 2007, 37(7): 617-620.
- [14] LIU X, LU Ch Y, CHENG Y, *et al.* Laser diode pumped optical parametric oscillator laser with orthogonal Porro prism resonator [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(9): 2257-2261 (in Chinese).  
刘旭, 卢常勇, 程勇, 等. 激光二极管抽运正交波罗棱镜腔光学参量振荡激光器 [J]. *中国激光*, 2009, 36(9): 2257-2261.
- [15] LIU X, CHENG Y, WANG Sh Y, *et al.* Application of prism resonator in 1.57  $\mu\text{m}$  eye-safe OPO laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(s2): 351-356 (in Chinese).  
刘旭, 程勇, 王淑云, 等. 棱镜腔技术在 1.57  $\mu\text{m}$  人眼安全 OPO 激光器的应用 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(s2): 351-356.
- [16] LI Zh T, ZHAO Y M, LI Z H, *et al.* Design and analysis of phase delay of porro prism and compensation wave-plate [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(21): 2101004 (in Chinese).  
李之通, 赵一鸣, 李祚涵, 等. Porro 棱镜相位延迟及其补偿波片的设计分析 [J]. *中国激光*, 2021, 48(21): 2101004.