

文章编号: 0258-7025(2009)08-2019-04

# 离轴棱镜对的光线传输特性

朱广志 朱 晓 朱长虹 齐丽君

(华中科技大学光电子科学与工程研究院, 湖北 武汉 430074)

**摘要** 采用几何光学的方法分析了离轴棱镜对在不同离轴偏移量的情况下光线的传输特性。通过光线追踪技术建立了离轴棱镜对内光线传输的数值模型,得到离轴偏移量  $d$  与棱镜斜边  $L$  的数值关系。讨论了 3 种情况下棱镜对间光线传输次数、传输方向和分布特性。结果表明,当  $d=L/2n(n=1,2,3\cdots)$  时,光线在棱镜对内等间距的传输便于增益的均匀提取,更有利于光线在板条状增益介质中的多程传输与放大。

**关键词** 几何光学; 直角棱镜; 多程传输; 离轴棱镜对; 板条激光器

中图分类号 O435.1; TN012 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093608.2019

## Ray Transmission Characteristics of Off-Axis Prism-Pair

Zhu Guangzhi Zhu Xiao Zhu Changhong Qi Lijun

(College of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract** The ray transmission characteristics of off-axis prism-pair are analyzed using geometrical optics method at different offset. The numerical model of off-axis prism-pair is built by ray tracing. The numerical relationship between the offset  $d$  and hypotenuse  $L$  of the off-axis prism-pair is obtained. The transmission direction, the number of ray transmission and the distribution of ray in the off-axis prism-pair are discussed at three different cases. The results show that the rays transmitting in the off-axis prism-pair have equal distance space distribution pattern when  $d=L/2n(n=1,2,3\cdots)$  so it is much more benefit to obtain uniform gain for each pass of rays and to realize multi-pass and amplification of slab-shaped gain medium.

**Key words** geometrical optics; right-angled prism; multi-pass; off-axis prism-pair; slab laser

## 1 引 言

直角棱镜具有自准直和抗失调的光学特性,其回归反射( $180^\circ$ 反射)的功能使光线在其内部经过两次全内反射后,实现出射光线与入射光线平行传输<sup>[1]</sup>。该特性在激光器设计和激光测量领域受到了越来越广泛的关注<sup>[2~4]</sup>。刘旭等<sup>[5~7]</sup>利用角锥棱镜实现抗失调、高稳定性谐振腔的设计。Qitao Lü等<sup>[8]</sup>在 1990 年报道了一种利用两个离轴的直角棱镜设计的新型板条谐振腔,实现大的填充因子、降低被抽运光束中模的阶数,获得高转换效率、高光束质

量的激光输出。侯霞等<sup>[9]</sup>提出了折返式的谐振腔结构,提高了激光增益区利用效率,改善了输出激光的光束质量。因此,对于板条状的激光介质或非线性光学晶体,离轴的直角棱镜对结构可以方便地实现光线的多程传输和放大<sup>[10]</sup>。

然而,上述研究仅简单地利用了直角棱镜或离轴直角棱镜对一次折叠光路的方案进行谐振腔设计,并未对该结构中光线的传输特性进行详细的分析。本文采用几何光学的方法对离轴直角棱镜对的光线传输特性进行全面的分析和计算,建立了离轴棱镜对中光线传输的数学模型。根据得到的离轴偏

收稿日期: 2008-09-05; 收到修改稿日期: 2008-10-16

基金项目: 华中科技大学研究生科技创新基金项目(HF-05-02-2007-230)资助课题。

作者简介: 朱广志(1977—),男,博士研究生,主要从事固体激光器及其非线性频率变换技术的研究。

E-mail: zgzxb@sohu.com

导师简介: 朱 晓(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事固体激光技术及其应用方面的研究。

E-mail: zx@hust.edu.cn

移量和棱镜斜边的关系,分析了3种情况下离轴棱镜对中光线的传输特性,探讨了光线在棱镜对间的分布特性。

## 2 理论分析

离轴直角棱镜对的结构及坐标系如图1所示,其中棱镜1和棱镜2完全相同,且对称放置。两棱镜的轴向偏移量为 $d$ ,棱镜的斜边长度为 $L$ 。其中 $y_I-x_I$ 直角坐标系是以棱镜1的顶点为原点, $x$ 轴垂直于棱镜1的斜边; $y_{II}-x_{II}$ 直角坐标系以棱镜2的顶点为原点, $x$ 轴垂直于棱镜2的斜边。光线从图1中A点平行于 $x$ 轴入射,经离轴棱镜对多次反射后从B点出射。由于直角棱镜回归反射的特性,在两棱镜中间传输的光线相互平行。

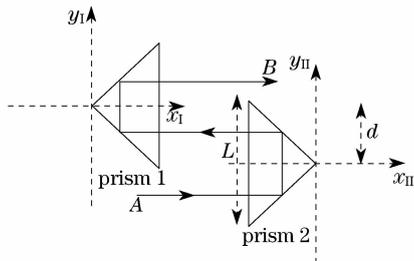


图1 离轴棱镜对的结构及坐标示意图

Fig. 1 Structure sketch of off-axis prism pair and coordinates

由图1可见棱镜对中间所约束平行光线的纵坐标反映了光线传输的布局 and 相互关系。因此为了清晰地描述光线在棱镜对中间传输的过程,仅需对平行传输光线的纵坐标进行分析与变换。

由于离轴直角棱镜对的轴向偏移量为 $d$ ,故两坐标系纵坐标的变换关系为

$$y_I = y_{II} - d, \quad (1)$$

假设入射点A在 $y_I-x_I$ 坐标系中的纵坐标为 $y_I = -D$ ,当光线沿 $x$ 轴方向入射到棱镜2中时,经坐标变换(从 $y_I-x_I$ 坐标系变换到 $y_{II}-x_{II}$ 坐标系),入射光线在 $y_{II}-x_{II}$ 坐标系的纵坐标将变为 $y_{II} = -D + d$ ;光线经棱镜2实现 $180^\circ$ 反射,并从棱镜2斜面输出,此时输出光线的纵坐标为 $y_{II} = -(-D + d) = D - d$ ;光线被反射后将垂直进入棱镜1内进行传输,再经坐标变换(从 $y_{II}-x_{II}$ 坐标系变换到 $y_I-x_I$ 坐标系),此时入射光线在 $y_I-x_I$ 坐标系中的纵坐标变为 $y_I = D - 2d$ ;光线在棱镜1中实现 $180^\circ$ 反射,并从棱镜2的斜面输出,此时输出光线的纵坐标变为 $y_I = -(D - 2d) = -D + 2d$ 。出射光线将再次进入棱镜2中进行传输,重复上述的变换过程,最终从棱镜

对中输出。

光线在棱镜对中经过 $n$ 次传输后,若从棱镜1的斜边出射,则光线的纵坐标为

$$y_I^n = -D + (2n)d, \quad (2)$$

若从棱镜2的斜边出射,则光线的纵坐标为

$$y_{II}^n = D - (2n + 1)d. \quad (3)$$

然而,光线经 $n$ 次传输后是从棱镜1的斜边出射还是从棱镜2的斜边出射,是由两棱镜轴向偏移量为 $d$ 的变化所决定的(棱镜的斜边长度 $L$ 为一常数)。

假设光线从棱镜1的下方入射,临界光线1为从棱镜1的 $P_{D1}$ 点入射的光线;临界光线2为从棱镜2的 $P_{D2}$ 点入射的光线。根据临界光线具体的空间位置对几种情况进行详细的讨论,具体分析如下:

1) 若临界光线1从 $P_{D1}$ 点进入棱镜对后,经多次反射最终传输到棱镜1或2的顶点;临界光线2从 $P_{D2}$ 点进入棱镜对后,经过多次反射也同时传输到了棱镜1或2的顶点。在临界光线1和临界光线2所约束区域的光线入射到棱镜对后,经多次反射必将从棱镜对的上方输出。

图2给出了满足上述条件的两个特例的结构示意图,其中离轴量 $d$ 与棱镜斜边 $L$ 的关系分别为 $d = L/2$ ,  $d = L/4$ 。

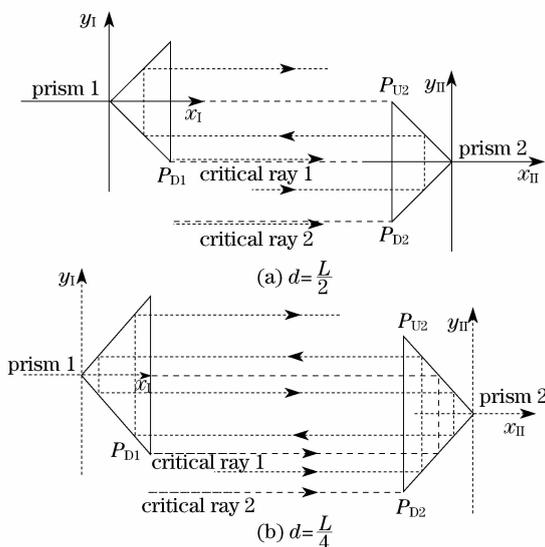


图2 当 $d = L/2n$ , ( $n = 1, 2, 3, \dots$ )时,光线在棱镜对中间传输的光路图

Fig. 2 Scheme of ray transmission in the off-axis prism pair when  $d = L/2n$ , ( $n = 1, 2, 3, \dots$ )

当满足上述条件时,临界光线1在 $y_I-x_I$ 坐标系内的纵坐标为

$$y_I^1 = -D_1 = -\frac{L}{2}, \quad (4)$$

式中,  $D_1$  为临界光线 1 距离棱镜 1 顶点的距离。

光线经过  $n$  次传输后, 若传输到棱镜 1 的顶点, 则(2)式等于 0,

$$y_{1i}^n = -D_1 + (2n)d = 0, \quad (5)$$

联立(4),(5)式, 可得棱镜对离轴量  $d$  与棱镜斜边  $L$  的关系式

$$d = \frac{L}{2 \times (2n)}, \quad (n = 1, 2, 3 \dots) \quad (6)$$

光线经过  $n$  次传输后, 若传输到棱镜 2 的顶点, 则(3)式等于 0,

$$y_{2i}^n = D_1 - (2n + 1)d = 0, \quad (7)$$

联立(4),(7)式, 可得棱镜对离轴量  $d$  与棱镜斜边  $L$  的关系式

$$d = \frac{L}{2 \times (2n + 1)}, \quad (n = 0, 1, 2 \dots). \quad (8)$$

综合(6),(8)式, 可见, 当  $d = L/2n$  ( $n = 1, 2, 3 \dots$ ) 时, 从棱镜对下方入射的光线经棱镜对多次反射后, 必将从棱镜对的上方输出, 其传输方向与入射的方向相同。出射的光线在  $y_{1i}-x_{1i}$  坐标系中的纵坐标为  $y_{1i}^n = -D_1 + (2n)d$ ; 在离轴棱镜对中间将有等间距分布的  $(L/d) + 1 = 2n + 1$ , ( $n = 1, 2, 3 \dots$ ) 条光线。

2) 若临界光线 1 从  $P_{D1}$  点进入棱镜对后, 经多次反射, 从临界光线 2 处输出, 则在临界光线 1 和临界光线 2 所约束区域的光线中必将存在第三条临界光线 3, 该光线经棱镜对多次反射后, 传输到棱镜 1 或 2 的顶点。

图 3 给出了满足上述条件的两个特例的结构示意图, 其中离轴量  $d$  与棱镜斜边  $L$  的关系分别为  $d = \frac{L}{3}$ ,  $d = \frac{L}{5}$ 。

当满足上述条件时, 临界光线 3 将临界光线 1 和临界光线 2 所约束的区域分成了两部分, 从临界光线 1 和临界光线 3 所约束区域入射的光线, 经棱镜对多次传输后, 必将从临界光线 2 和临界光线 3 所约束的区域输出, 且传输方向与入射相反。

此时临界光线 1 在  $y_{1i}-x_{1i}$  坐标系内的纵坐标如(4)式, 光线经过  $n$  次传输后, 到达  $P_{U2}$  点, 则

$$y_{1i}^n = -D_1 + (2n + 1)d = \frac{L}{2}, \quad (9)$$

联立(4),(9)式, 可得棱镜对离轴量  $d$  与棱镜斜边  $L$  的关系式

$$d = \frac{L}{(2n + 1)}, \quad (n = 1, 2, 3 \dots). \quad (10)$$

由临界光线 3 的特性, 若临界光线 3 传输到棱镜 1

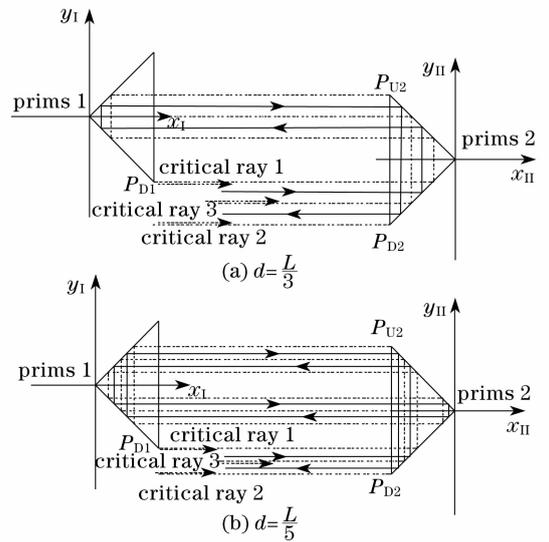


图 3 当  $d = L/(2n + 1)$ , ( $n = 1, 2, 3 \dots$ ) 时, 光线在棱镜对中传输的光路图

Fig. 3 Scheme of ray transmission in the off-axis prism pair when  $d = L/(2n + 1)$ , ( $n = 1, 2, 3 \dots$ )

的顶点, 其纵坐标为

$$y_{1i}^n = D_3 - (2n)d = 0, \quad (11)$$

式中,  $D_3$  为临界光线 3 距棱镜 1 顶点的距离。将(10)式代入(11)式可得

$$D_3 = \frac{2n}{2n + 1}L, \quad (n = 1, 3, 5 \dots). \quad (12)$$

若临界光线 3 经多次传输后到达棱镜 2 的顶点, 其纵坐标为

$$y_{2i}^n = D_3 - (2n - 1)d = 0, \quad (13)$$

将(10)式代入(13)式可得

$$D_3 = \frac{2n - 1}{2n + 1}L, \quad (n = 2, 4, 6 \dots). \quad (14)$$

综上所述, 当  $d = L/(2n + 1)$ , ( $n = 1, 2, 3 \dots$ ) 时, 从棱镜对下方入射的光线经棱镜对多次反射后, 仍将从棱镜对的下方输出, 其传输方向与入射的方向相反, 当  $D_3 = 2n/(2n + 1) \cdot L$ , ( $n = 1, 3, 5 \dots$ ) 或  $D_3 = (2n - 1)/(2n + 1) \cdot L$ , ( $n = 2, 4, 6 \dots$ ) 时, 其离轴棱镜对中间所传输的光线为  $(\frac{L}{d}) + 1 = 2n + 2$ , ( $n = 1, 2, 3 \dots$ ) 条, 光线不再等间距分布。

3) 当  $L/(2n + 1) < d < L/(2n)$ , ( $n = 1, 2, 3 \dots$ ) 时, 光线在棱镜对中间传输的情况变得比较复杂。如图 4 所示, 在  $n = 1$  时, 临界光线 1 为从棱镜 1 下边缘  $P_{D1}$  点入射的光线; 临界光线 2 为从棱镜 2 下边缘  $P_{D2}$  点入射的光线; 临界光线 3 为从棱镜下方区域入射, 进入棱镜对后经多次反射, 传输到棱镜 1 或 2 的顶点; 此时出现了临界光线 4, 该光线从棱

镜下方区域入射,进入棱镜对后经多次反射,从临界光线 2 处输出。

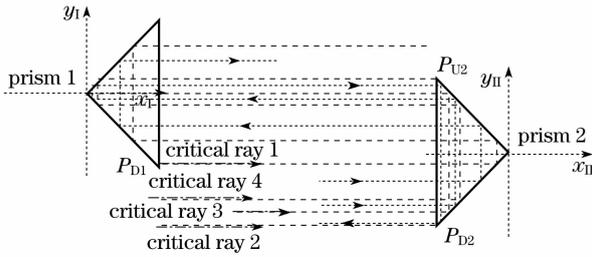


图 4 当  $L/(2n+1) < d < L/(2n)$ , ( $n=1$ ) 时,光线在棱镜对中传输的光路图

Fig. 4 Scheme of ray transmission in the off-axis prism pair when  $L/(2n+1) < d < L/(2n)$ , ( $n=1$ )

因此临界光线 1,2,4 将入射到棱镜对内部的光线划分为两个区域,在临界光线 1 和临界光线 4 所约束的区域,光线的传输特性与  $d = L/2n$ , ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) 的情形相同,入射的光线经棱镜对多次传输后,将从棱镜对的上方输出,其输出光线与入射光线具有相同的传输方向。光线在该区域传输的次数为  $(L/d) + 1 = 2n + 1$ , ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ), ( $d = L/2n$ )。临界光线 2 和临界光线 4 所约束的区域,光线的传输特性与  $d = L/(2n+1)$ , ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) 的情形相同,入射光线经棱镜对多次传输后,仍从该区域内输出,其输出光线与入射光线的传输方向相反。光线在该区域传输的次数为  $(L/d) + 1 = 2n + 2$ , ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ),  $d = L/(2n+1)$ 。

### 3 结 论

采用几何光学方法全面分析了离轴棱镜对中光线的传输和分布特性,给出了离轴偏移量和棱镜斜边在 3 种条件下光线在棱镜对内传输次数的数学表达式,并对其分布特性进行了分析。分析结果为板

条状激光器多程传输和放大结构的设计与应用提供了新的方法。

### 参 考 文 献

- Li Lin, Huang Yifan, Wang Yongtian *et al.*. Applied Optics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press. 2005. 89~98  
李林,黄一帆,王涌天等. 应用光学[M].北京:北京理工大学出版社,2005. 89~98
- Zheng Defeng, Wang Xiangzhao, Li Zhongliang *et al.*. Dynamic measurement of small angle with two prisms[J]. Chinese J. Lasers, 2007, **34**(9): 1255~1259  
郑德锋,王向朝,李中梁等. 一种使用双棱镜的动态小角度测量方法[J]. 中国激光, 2007, **34**(9): 1255~1259
- V. S. Srikanth. Corner cube prism resonator with polarized output: new configuration[C]. SPIE, 2005, **5708**: 303~310
- Liesl Burger, Andrew Forbes. A model of the transverse modes of stable and unstable porro-prism resonator using symmetry considerations[C]. SPIE, 2007, **6663**: 666305
- Liu Xu, Lu Changyong, Wang Xiaobing *et al.*. Passively Q-switched intracavity optical parametric oscillator with corner-cube resonator[J]. Chinese J. Lasers, 2007, **34**(4): 485~490  
刘旭,卢常勇,王小兵等. 角锥棱镜腔  $\text{Cr}^{3+}:\text{YAG}$  被动调 Q 内腔式光参量振荡器[J]. 中国激光, 2007, **34**(4): 485~490
- Lu Changyong, Li Li, Liu Xu *et al.*. Laser diode-pumped passively Q-switched laser with corner-cube resonator[J]. Acta Optica Sinica, 2007, **27**(7): 1228~1231  
卢常勇,李莉,刘旭等. 角锥棱镜腔激光二极管抽运被动调 Q 激光器[J]. 光学学报, 2007, **27**(7): 1228~1231
- Shaoqing Mao, Yong Cheng, Xiaobing Wang *et al.*. A kind of highly stabilized solid-state lasers with directional prism reflector [C]. SPIE, 1996, **3862**: 210~214
- Qitao Lü, Jochen Eicher. Off-axis prism resonator for improved beam quality of slab lasers [J]. Opt. Lett., 1990, **15**(23): 1357~1358
- Hou Xia, Lu Yutian, Hu Qiquan. Diode side-pumped enfolded cavity Nd: YAG lasers [J]. Acta Optica Sinica, 2004, **24**(10): 1349~1352  
侯霞,陆雨田,胡企铨. 折返式激光二极管侧抽运 Nd: YAG 激光器[J]. 光学学报, 2004, **24**(10): 1349~1352
- Lü Baida, Feng Guoying, Cai Bangwei *et al.*. Polarization properties of novel prism resonator for use in slab laser[J]. Acta Optica Sinica, 1994, **14**(11): 1127~1132  
吕百达,冯国英,蔡邦维等. 板条固体激光器用新型棱镜腔的偏振特性[J]. 光学学报, 1994, **14**(11): 1127~1132