

# 双向分束角对称的偏光分束镜设计与性能分析\*

史 萌 吴福全

(曲阜师范大学激光研究所, 山东曲阜 273165)

**摘 要** 为了获得分束角对称的偏光分束棱镜, 在双 Wollaston 棱镜结构的基础上, 通过合理设计棱镜左右两端晶体光轴的取向, 使棱镜整体呈中心切面对称; 在保证对正向入射的光对称分束的同时, 对反向入射光同样可以对称分束, 达到了双向对称分束的目的; 在此基础上给出了晶体光轴的旋转角  $\delta$  与棱镜结构角  $S$  以及与波长的关系; 并分析了对 633 nm 设计的棱镜用于其他波长时分束角的对称性. 结果表明: 在  $\pm 300$  nm 的光谱范围内, 分束角的不对称度均小于  $0.24^\circ$ .

**关键词** 双 Wollaston 棱镜; 对称分束; 旋转角; 结构角

**中图分类号** O436.3 **文献标识码** A

## 0 引言

在现代光学中, 偏光分束棱镜因其具有透过率高、抗光损伤阈值高等优点, 在光纤通信、激光调制、光信息处理等领域得到广泛应用<sup>[1,2]</sup>, 目前已有多种类型的偏光分束棱镜<sup>[3~5]</sup>, 其中三元结构的双 Wollaston 棱镜因其具有可获得大分束角的优点而倍受关注. 在许多激光测量技术和光学实验中, 要求棱镜的分束角要具有高度的对称性<sup>[6]</sup>, 而双 Wollaston 棱镜的分束角不具有高度的对称性<sup>[7~9]</sup>. 本文采用旋转棱镜晶体光轴取向的方法, 在保证棱镜整体结构对称的基础上, 使棱镜具有对双向入射的光均产生对称分束角的特性.

## 1 棱镜结构与光路分析

双 Wollaston 棱镜的结构如图 1. 棱镜整体由三块结构角  $S$  相同的单棱镜组合而成, 第一块与第三块单棱镜的晶体光轴方向在纸面内, 并且与入射界面平行; 第二块的晶体光轴垂直于纸面, 棱镜整体是关于垂直于纸面的中心切面 ( $O$  面) 对称的. 在纸面内对称地旋转入、出射端的两个晶体光轴, 晶体光轴与出射界面的夹角称之为旋转角  $\delta$ , 使棱镜的整体

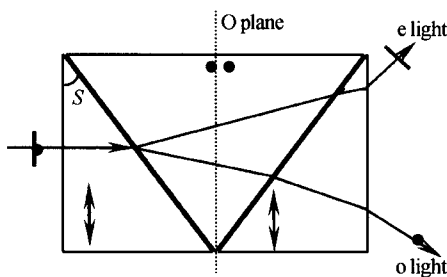


图 1 双 Wollaston 棱镜结构  
Fig. 1 The structure of Bi-Wollaston

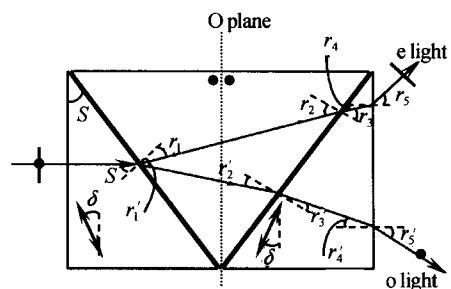


图 2 棱镜结构及分光光路  
Fig. 2 The structure of prism and beam path

依然保持关于中心切面 ( $O$  面) 对称 (如图 2), 如果这样能保证入射光线从一个方向入射棱镜时产生对称的分束角, 则从另一方向入射同样也能对称分束.

为了分析方便, 首先规定: 1)  $o, e$  光波均以入、出射端晶体中光的属性而论, 则向上偏折的为  $e$  光波, 在分界面所产生的的各角度不加上角标; 向下偏折的为  $o$  光波, 在分界面所产生的各角度加上角标; 2) 所标的各个角度均为正值, 只分析其大小; 3) 关于晶体光轴旋转的方向, 不妨先按照假设两个光轴相对于中心切面 ( $O$  面) 同时向外旋转, 在后面求出具体的值, 若  $\delta$  大于  $90^\circ$  则可认为是向内旋转.

$e$  光波所经过的各介质的折射率为: 空气  $\rightarrow$  第一块棱镜  $n'_e \rightarrow$  第二块棱镜  $n_o \rightarrow$  第三块棱镜  $n''_e \rightarrow$  空气, 且遵守如下关系式

$$\begin{cases} n'_e \sin S = n_o \sin r_1 \\ n_o \sin r_2 = n''_e \sin r_3 \\ n''_e \sin r_4 = \sin r_5 \end{cases} \quad (1)$$

式中  $n'_e = (n_o n_e) / [(n_o^2 \sin^2 \varphi + n_e^2 \cos^2 \varphi)^{1/2}]$ ,  $n''_e = (n_o n_e) / [(n_o^2 \sin^2 \varphi' + n_e^2 \cos^2 \varphi')^{1/2}]$ , 因为  $\varphi = \pi/2 - \delta$  为  $e$  光波法线与第一块晶体光轴的夹角,  $\varphi' = \pi/2 - \delta - r_4$  为  $e$  光波法线与第三块晶体光轴的夹角, 所以可得  $n'_e = (n_o n_e) / [(n_o^2 \cos^2 \delta + n_e^2 \sin^2 \delta)^{1/2}]$ ,  $n''_e = (n_o n_e) / [(n_o^2 \cos^2 (\delta + r_4) + n_e^2 \sin^2 (\delta + r_4))^{1/2}]$ .

$o$  光波所经过的各介质的折射率为: 空气  $\rightarrow$  第

一块棱镜  $n_o \rightarrow$  第二块棱镜  $n_e \rightarrow$  第三块棱镜  $n_o \rightarrow$  空气,且遵守如下的关系式

$$\begin{cases} n_o \sin S = n_e \sin r'_1 \\ n_e \sin r'_2 = n_o \sin r'_3 \\ n_o \sin r'_4 = \sin r'_5 \end{cases} \quad (2)$$

由图 2 中的三角关系可知

$$\begin{cases} r_1 + r_2 = 2S \\ r_3 - r_4 = S \\ r'_1 + r'_2 = 2S \\ r'_3 + r'_4 = S \end{cases} \quad (3)$$

要达到对称分束的目的,即  $r_5 = r'_5$ ,则应满足

$$n_e \sin r_4 = \sin r_5 = \sin r'_5 = n_o \sin r'_4 \quad (4)$$

根据式(1)~(4)及图 2 中的角度关系,可以得到

$$n'_e = \frac{n_o n_e}{(n_o^2 \cos^2 \delta + n_e^2 \sin^2 \delta)^{1/2}} \quad (5)$$

$$n''_e = \frac{n_o n_e}{(n_o^2 \sin^2 (\delta + r_4) + n_e^2 \cos^2 (\delta + r_4))^{1/2}} \quad (6)$$

$$r_4 = \sin^{-1} \left\{ \frac{n_o}{n_e} \sin \left[ 2S - \sin^{-1} \left( \frac{n_e}{n_o} \sin S \right) \right] \right\} - S \quad (7)$$

$$n_e \sin r_4 = n_o \sin \left\{ S - \sin^{-1} \left[ \frac{n_e}{n_o} \sin \left( 2S - \sin^{-1} \left( \frac{n_o}{n_e} \sin S \right) \right) \right] \right\} \quad (8)$$

方程(5)~(8)是进一步求解的基础.

下面从两个角度进行定性分析,验证这种设计思路的可行性.

1) 经过计算可知,对于原结构的双 Wollaston 棱镜两条出射光,e 光的偏折角度要大于 o 光的偏折角度,在旋转晶体光轴时,e 光的偏折角连续变小,而 o 光的偏折角不变,这样总会存在一个  $\delta$  使二者相等,从这个角度上说这种思路是可行的.

2) 方程(5)~(8)中的核心是方程(8), $n'_e, n''_e$  的物理意义规定了它们的取值范围是  $(n_e, n_o)$ ,式(5)~(8)解也就意味着在  $n'_e, n''_e$  的取值范围内,存在一个  $\delta$  使之满足式(8),即由式(8)变形得到的变量  $V = n''_e \sin r_4 - n_o \sin \{ S - \sin^{-1} [ \frac{n_e}{n_o} \sin ( 2S - \sin^{-1} ( \frac{n_o}{n_e} \sin S ) ) ] \}$  能够取到 0. 首先取  $S$  为  $\pi/6$ ,冰洲石晶体对波长为 633 nm 光的主折射率  $n_e = 1.48515, n_o = 1.65567$ . 以  $n'_e$  和  $n''_e$  为变量,做出  $V = V(n'_e, n''_e)$  的三维图如图 3,可以清晰地看出  $V$  能取到 0,所以从这个角度也能说明本设计的可行性.

取  $S = \pi/6, \lambda = 633 \text{ nm}$ ,由叠代的方法去逼近精确值得到  $\delta = 2.8752 = 164.74^\circ$ . 因为光轴是向外旋转的,而求出  $\delta$  大于  $90^\circ$ ,相当于光轴同时向内旋转  $15.26^\circ$ . 此时棱镜的分束角是  $22.40^\circ$ .

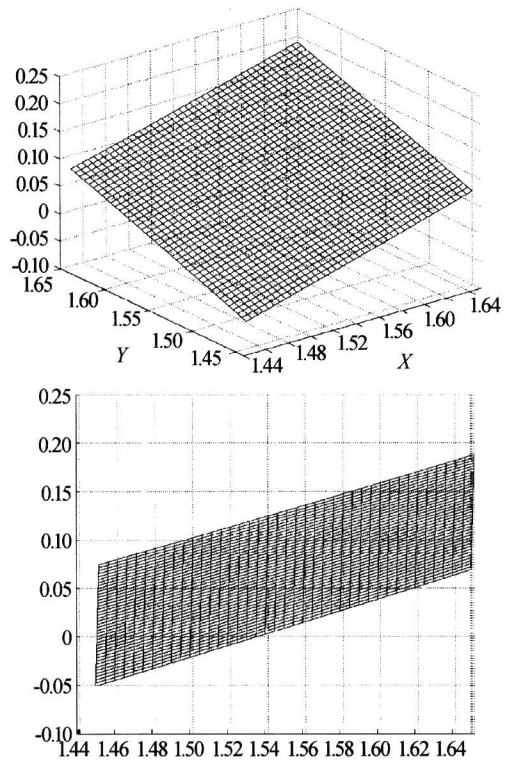


图 3  $V = V(n'_e, n''_e)$  的函数图  
Fig. 3 Functional image of  $V = V(n'_e, n''_e)$

## 2 晶体光轴的旋转角 $\delta$ 和分束角对称性的光谱特性

### 2.1 晶体光轴的旋转角 $\delta$

因为旋转角  $\delta$  与结构角  $S$  之间没有明确的显函数关系,只能取几个离散的点通过插值的方法来求它们的近似关系,通过选定几个  $S$  值算出对应的  $\delta$ ,作出  $\delta \sim S$  的关系曲线,如图 4. 由图中曲线可知, $\delta$  随着结构角  $S$  的增大而增大,也就是说,要获得较大的对称分束角,晶体光轴也需要旋转较大的角度.

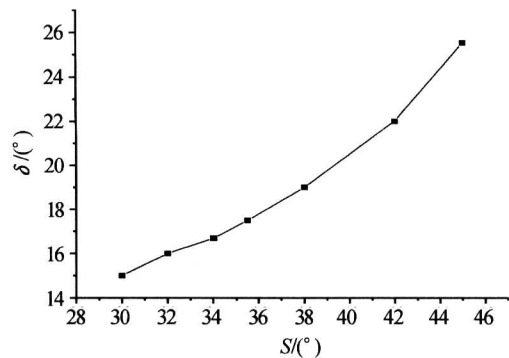
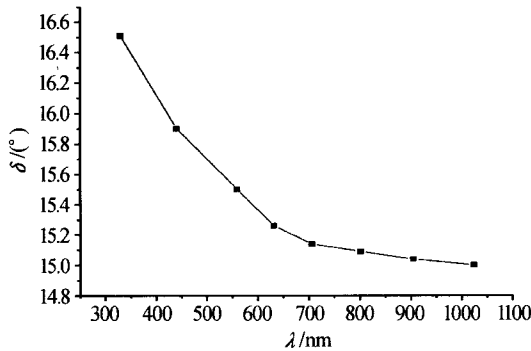


图 4  $\delta \sim S$  的关系曲线  
Fig. 4 The relation curve of  $\delta \sim S$

图 5 是取结构角  $S = 30^\circ$  时,在  $300 \sim 1024 \text{ nm}$  的光谱范围内,棱镜获得对称分束角其晶体光轴的旋转角随波长的变化曲线. 从图中曲线可看出:取定棱镜的结构角后,越趋向与长波长方向,晶体光轴

图 5  $\delta \sim \lambda$  的关系曲线Fig. 5 The relation curve of  $\delta \sim \lambda$ 

的旋转角越小.

## 2.2 分束角对称性的光谱特性

为了便于分析分束角对称性的光谱特性,将 e 光与 o 光通过棱镜后的偏折角  $r_s$  与  $r'_s$  之差的绝对值称为偏光分束镜的不对称度,记为  $R = |r_s - r'_s|$ . 仍以对 633 nm 设计的结构角为  $30^\circ$  的双 Wollaston 棱镜为例,其对称分束时晶体光轴的旋转角  $\delta = 15.26^\circ$ . 那么,当这样的棱镜用于其他波长时,通过式(5)~(8),将  $\lambda$  在 300~1024 nm 的光谱范围内的几个波长点计算出的分束角的不对称度的数值列于表 1.

表 1 在 300~1024nm 的光谱范围内分束角的不对称度

Wavelength/nm	330	441	560	633	706	801	905	1024
Degree of asymmetry/(°)	0.22	0.17	0.08	0	0.07	0.16	0.23	0.26

从表格中可看出随着波长远离 633 nm,棱镜分束角的不对称度是逐渐增大的,而增大的幅度在不断地减小.

## 3 结论

通过分析可见,采用对入射面内的两个光轴同时向中心切面旋转一定的角度的方法,可以既保持棱镜的对称结构,又实现了当光束无论从正向还是

反向入射棱镜时,通过棱镜后的 o, e 光的分束角均是对称的目的,即达到了双向对称分束的效果.

## 参考文献

- 1 朱化凤,宋连科,郑春红,等. 晶体偏光棱镜光强透射比研究. 光子学报,2004,33(2):204~207  
Zhu H F, Song L K, Zheng C H, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004,33(2):204~207
- 2 黄弼勤,杨立功,陈海星,等. 基于各向异性介质的偏振分束器. 光子学报,2004,33(2):208~211  
Huang B Q, Yang L G, Chen H X, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004,33(2):208~211
- 3 李景镇. 光学手册. 西安:陕西科学技术出版社,1986. 526~529  
Li J Z. *Optics Handbook*. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 1986. 526~529
- 4 Li G H, Wu F Q. The splitting angle asymmetric of beamsplitting polarization prism. *App Opt*, 1991,12(4):21~25
- 5 Li G H. Adjustable beamsplitting polarization prism. *Journal of Appl Opt*, 1982,2(1):60~62
- 6 王吉明,吴福全,孔伟金,等. 波片型光隔离器隔离性能的分析. 光子学报,2004,33(7):830~834  
Wang J M, Wu F Q, Kong W J, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004,33(7):830~834
- 7 李国华. 可调分束角棱镜光路分析. 曲阜师范大学学报, 1986,(1):46~48  
Li G H. *The transaction of Qufu Normal University*, 1986,(1):46~48
- 8 李国华,吴福全,于德洪. 可调分束角棱镜的分束角与入射角的关系. 曲阜师范大学学报,1991,(2):54~58  
Li G H. *The transaction of Qufu Normal University*, 1991,(2):54~58
- 9 李国华,吴福全,于德洪. 偏光分束棱镜分束角和对称性研究. 应用光学,1991,12(4):21~25  
Li G H. *Journal of Appl Opt*, 1991,12(4):21~25

## The Principle Design and Performance Analysis of Two-way Symmetric Splitting Angle Beamsplitting Prism

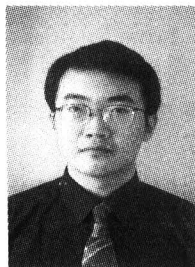
Shi Meng, Wu Fuquan

*Qufu Normal University Laser Rresearch Institute, Qufu 273165*

Received date: 2005-04-21

**Abstract** With the view of obtaining symmetric splitting angle prism, on the basis of Bi-, through designing the orientation of the crystal optic axis rationally, make the prism plane-symmetry about center tangent plane; Resulting in splitting beam symmetrically not only for positive-going light, but also reverse direction light. Namely, two-way symmetrically splitting. Futher studies on the relation between rotation angle of the axis and the structure angle of the prism and wavelength, and analyse the symmetry of the splitting angle when apply the prism designed for 633 nm to other wavelength, the results indicate: the asymmetry degree of splitting angle less than  $0.24^\circ$ , in the spectrum range of  $\pm 300$  nm.

**Keywords** Bi-Wollaston; Symmetric splitting; Rotation angle; Structure angle



**Shi Meng** was born in 1981. He received his B. S. degree in institute of Physics and Engineering of Qufu Normal University, now he is a master candidate in laser reseach institute of Qufu Normal University. His research field is in polarization device designation.