

文章编号: 1001-3806(2018)02-0249-05

一种 Wollaston 式偏光棱镜分束特性的研究

杨敬顺^{1,2}, 韩培高^{1,2*}, 闫玉甫^{1,2}, 吴福全^{1,2}, 郝殿中^{1,2}

(1. 曲阜师范大学 山东省激光偏光与信息技术重点实验室, 曲阜 273165; 2. 曲阜师范大学 物理工程学院 激光研究所, 曲阜 273165)

摘要: 为了对一种修正式对称分束 Wollaston 棱镜的分束特性进行系统分析, 利用折射定律和菲涅耳公式, 以 632.8nm 波长为例, 给出了出射光与水平方向的夹角随修正角、结构角之间的变化关系曲线、光强分束比随结构角的变化关系以及入射角对棱镜分束角和出射光束对称性的影响曲线。结果表明, 通过对出射端面的修正可以实现 Wollaston 棱镜的严格对称分束; o 光、e 光分束角主要取决于棱镜结构角, 受棱镜修正角影响较小; 光强分束比随结构角的增大变化幅度较小; 当光线以小角度入射时, 入射角主要影响棱镜分束角对称性; 入射角在 $-3^\circ \sim 3^\circ$ 之间变化时, 两出射光线的不对称度小于 6° , 可以保证较好的对称分束效果。该研究为该棱镜的设计和应用提供了理论指导。

关键词: 光学器件; 渥拉斯顿棱镜; 入射角; 结构角; 分束角; 分束比

中图分类号: O436.3 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2018.02.021

Analysis of beam-splitting characteristics of Wollaston-type polarizing prisms

YANG Jingshun^{1,2}, HAN Peigao^{1,2}, YAN Yufu^{1,2}, WU Fuquan^{1,2}, HAO Dianzhong^{1,2}

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Laser Polarization and Information Technology, Qufu Normal University, Qufu 273165, China; 2. Laser Institute, College of Physics and Engineering, Qufu Normal University, Qufu 273165, China)

Abstract: In order to analysis systematically the splitting characteristics of a Wollaston-type symmetric beam-splitting prism, by using refractive formula and Fresnel formula and taking 632.8nm for example, relationship curve among the angle of emergent light to the horizontal direction, deviation angle and structure angle, relationship curve between intensity splitting beam ratio and structure angle, relationship curve among incident angle, splitting beam angle of the prism and emerging light symmetry were gotten. The results show that, strict symmetric beam can be achieved through the correction of output face of Wollaston prism. Splitting angles of o light and e light mainly depend on the prism structure angle. The effect of deviation angle is smaller. The changing magnification of beam splitting ratio with the increase of structure angle is small. When the incident angle is small, it has main effect on the symmetry of prism splitting angle. When incident angle changes between -3° and $+3^\circ$, the asymmetry degree of two beam is less than 6° , which can guarantee good effect of symmetry beam splitting. The study provides a theoretical guidance for design and application of the prism.

Key words: optical devices; Wollaston prism; incident angle; structure angle; beam-splitting angle; beam-splitting ratio

引言

随着偏光技术以及激光应用的快速发展, 各种偏光分束器件得到了越来越广泛的应用, 其中 Wollaston 棱镜是最典型的也是目前应用和研究较广泛的偏光分束棱镜^[1-4]。由于 Wollaston 棱镜被分束的 o 光、e 光均

发生偏折, 具有较大的分束角^[5-7], 因此在航空、医疗以及环境监测等领域都有着重要应用^[8-12]。传统 Wollaston 棱镜由光轴相互正交的冰洲石晶体组成。研究表明, 传统 Wollaston 棱镜分束角并不具有完全的对称性, 且随着结构角的增大, 分束角的不对称性越来越明显^[13-15]。但在某些特殊的偏光技术应用中, 要求分束角严格对称^[16], 这是传统 Wollaston 棱镜所不能满足的。ZHANG 等人提出了一种修正式 Wollaston 对称分束棱镜^[17], 此棱镜不仅结构简单, 而且可以实现对称分束。本文中针对这种对称分束棱镜, 讨论了其出射的 o 光、e 光分束角与棱镜结构角和修正角的关系、光强分束比随结构角的变化以及入射角变化对棱镜分束

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11104160; 11274200)

作者简介: 杨敬顺 (1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光偏光技术方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: qfpgan@126.com

收稿日期: 2017-03-23; 收到修改稿日期: 2017-04-13

角和出射光对称性的影响,为该棱镜的设计和應用提供了理论指导。

1 Wollaston 式对称分束棱镜基本原理

Wollaston 式对称分束棱镜结构以及分光光路图如图 1 所示。图中,1、2、3 分别表示光线经过棱镜时的 3 个界面, S 为棱镜的结构角;双箭头以及圆点表示晶轴的方向; θ_1 和 θ_2 分别为第 2 块方解石晶体中 o 光和 e 光与水平方向的夹角; φ_1 和 φ_2 分别是 o 光和 e 光与水平方向的夹角。为了实现对称分束,在传统 Wollaston 棱镜结构的基础上,对棱镜的出射端面 3 进行角度为 $\Delta\varphi$ 的修正,使得 $\varphi_1 = \varphi_2$ 。这里,把 $\Delta\varphi$ 称为修正角, φ_1 和 φ_2 分别称为 o 光分束角和 e 光分束角。这种设计既保证了棱镜的对称分束,同时也保证了棱镜有较大的分束角。

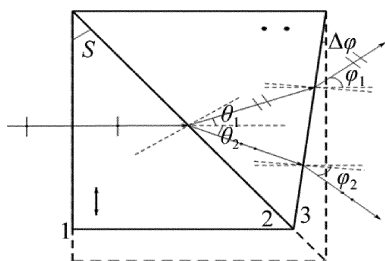


Fig. 1 Schematic of optical path of Wollaston-type symmetric beam-splitting prism

2 o 光、e 光分束角及修正角与结构角的关系

如图 1 所示,由于入射光垂直入射到界面 1,光轴和入射光垂直,因此 o 光、e 光将以不同的相速度沿入射光方向同向传播。其中,o 光和 e 光分别垂直于主截面(纸面)和平行于主截面振动。光线进入第 2 块晶体时,由于光轴方向垂直于纸面,因此在通过界面 2 后,第 1 块晶体中的 o 光、e 光将分别变为 e 光、o 光。最后,在界面 3 处,o 光、e 光分别以 $\varphi_1 + \Delta\varphi$ 和 $\varphi_2 - \Delta\varphi$ 的折射角出射。

根据折射定律,在修正面 3 处有:

$$\begin{cases} \varphi_1 = \arcsin[n_o \sin(\theta_1 + \Delta\varphi)] - \Delta\varphi \\ \varphi_2 = \arcsin[n_e \sin(\theta_2 - \Delta\varphi)] + \Delta\varphi \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$\begin{cases} \theta_1 = S - \arcsin\left(\frac{n_e}{n_o} \sin S\right) \\ \theta_2 = \arcsin\left(\frac{n_o}{n_e} \sin S\right) - S \end{cases} \quad (2)$$

式中, n_o 、 n_e 分别为 o 光和 e 光在晶体中的主折射率。

作者选取入射光波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, $n_o = 1.658$, $n_e = 1.486$ 。将(2)式分别代入(1)式可得到 o 光、e 光分束角关于结构角 S 和修正角 $\Delta\varphi$ 的关系,如图 2 所示。

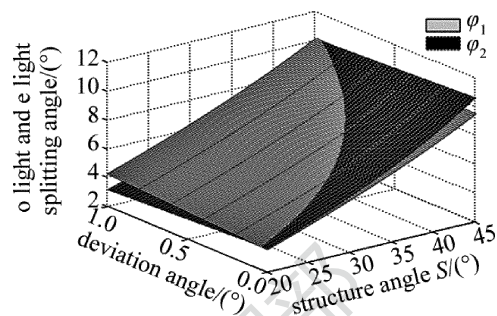


Fig. 2 Relationship among splitting angle of o light and e light, structure angle and deviation angle

由图 2 可知,当修正角 $\Delta\varphi = 0$ 时为传统 Wollaston 棱镜,此时 φ_2 和 φ_1 随棱镜结构角的增大而增大,且总有 $\varphi_2 > \varphi_1$ 。在棱镜结构角大于 20° 以后, φ_1 和 φ_2 的差值逐渐变大,棱镜的对称分束性能也越来越差。图 2 中两曲面重合曲线表示当实现对称分束,即 $\varphi_1 = \varphi_2$ 时,修正角随结构角的变化关系,可见当实现对称分束时,随着棱镜结构角增大,修正角也要增大。通常情况下一般选取 Wollaston 棱镜的结构角在 $20^\circ \sim 40^\circ$ 之间,相应的修正角在 $0.05^\circ \sim 0.97^\circ$ 之间变化。

3 光强分束比与结构角的关系

由图 1 可知,出射的 o 光和 e 光分别经过了界面 1、界面 2 和界面 3,把第 1 块棱镜中的 o 光称为第 1 束光,第 1 块棱镜中的 e 光称为第 2 束光。

其中第 1 束光振动方向垂直于入射面为 s 振动,根据菲涅耳公式,其在各界面的强度反射系数为:

$$R_{s,1} = \left(\frac{n - n_o}{n + n_o} \right)^2 \quad (3)$$

$$R_{s,i} = \frac{\sin^2(A_i - B_i)}{\sin^2(A_i + B_i)} \quad (4)$$

式中,当 $i=2$ 时,第 1 束光在第 2 个界面对应的折射角和反射角分别为 $A_2 = \theta_{s,2}$, $B_2 = S$;当 $i=3$ 时,第 1 束光在第 3 个界面对应的折射角和反射角分别为 $A_3 = \varphi_2 - \Delta\varphi$, $B_3 = \theta_2 - \Delta\varphi$; $\theta_{s,2}$ 和 n 分别为第 1 束光在界面 2 处的折射角和空气折射率。

设入射自然光光强 I , Wollaston 式对称分束棱镜的 e 光透射光强为:

$$I_e = \frac{I}{2} (1 - R_{s,1}) (1 - R_{s,2}) (1 - R_{s,3}) \quad (5)$$

对于第 2 束光其振动方向在入射面内为 p 振动,同理可得:

$$I_o = \frac{I}{2} (1 - R_{p,1}) (1 - R_{p,2}) (1 - R_{p,3}) \quad (6)$$

$$R_{p,1} = \left(\frac{n_e - n}{n + n_e} \right)^2 \quad (7)$$

$$R_{p,i} = \frac{\tan^2(C_i - D_i)}{\tan^2(C_i + D_i)} \quad (8)$$

式中,当 $i=2$ 时,第 2 束光在第 2 个界面对应的反射角和折射角分别为 $C_2 = S, D_2 = \theta_{p,2}$; 当 $i=3$ 时,第 2 束光在第 3 个界面对应的反射角和折射角分别为 $C_3 = \theta_1 + \Delta\varphi, D_3 = \varphi_1 + \Delta\varphi$; $\theta_{p,2}$ 为第 2 束光通过界面 2 的折射角。

结合折射公式可得 e 光、o 光的光强分束比 $F = I_e/I_o$, F 随结构角变化的曲线如图 3 所示。由图可见: 在实现对称分束时,棱镜的光强分束比在 0.98 以上,且分束比随结构角的变化幅度不明显。

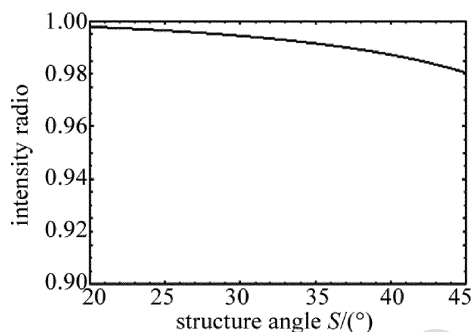


Fig. 3 Relationship between intensity ratio and structure angle

4 出射光对称性与入射角和结构角的关系

4.1 e 光分束角

图 4 中 S 是棱镜结构角, α, β 分别为光线在界面 1 处的入射角和 o 光折射角, i_2, γ 为 o 光在界面 2 处的入射角和折射角, $i_3, \varphi_2 - \Delta\varphi$ 为 e 光在出射端面 3 处的入射角和折射角。当第 1 束光线入射到棱镜后,在界面 1、界面 2、界面 3 处,利用折射定律可得到下列关系式:

$$\begin{cases} n \sin \alpha = n_o \sin \beta \\ i_2 = S + \beta \\ i_3 = \gamma - S - \Delta\varphi \\ n_o \sin i_2 = n_e \sin \gamma \\ n_e \sin i_3 = n \sin (\varphi_2 - \Delta\varphi) \end{cases} \quad (9)$$

联立(9)式,可得到第 1 束光即出射光 e 光分束角 φ_2 与结构角 S 和入射角 α 的关系。

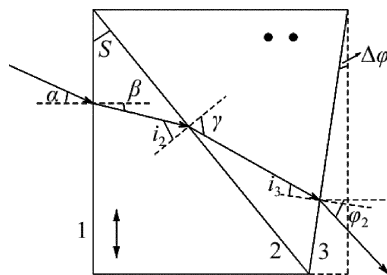


Fig. 4 Optical path of the first light beam under non-vertical incidence

4.2 o 光分束角

如图 5 所示建立空间坐标系,以第 1 块晶体的光轴方向为 y 轴正方向,以第 2 块晶体光轴方向为 x 轴正方向, z 轴沿水平方向。其中 α 为光线入射角; e_k, e_s 分别代表 e 光波波矢方向单位矢量和 e 光线方向单位矢量; θ_k 为 e 光波波矢方向与界面 1 法线的夹角; $\theta_{k,s}$ 为离散角,即 e 光波波矢 e_k 和 e 光线 e_s 的夹角; $\theta_{2,e}, \theta_{2,o}$ 分别为 e 光波在界面 2 处的入射角和折射角; $\theta_{3,o}, \varphi_1 + \Delta\varphi$ 分别为 o 光在出射端面 3 处的入射角和折射角。

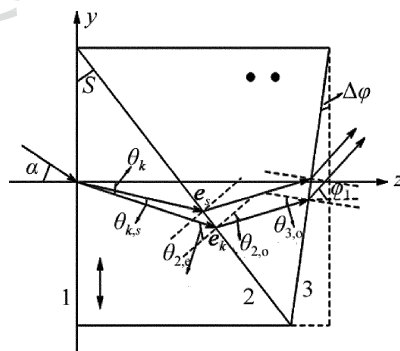


Fig. 5 Optical path of the second light beam under non-vertical incidence

由于第 1 块晶体中的主截面和入射面重合,此时 e 光波和 e 光线都在主截面内^[18]。方解石为负单轴晶体,因此 e 光线较其波法线远离光轴^[19-20]。若 $\hat{e}_x, \hat{e}_y, \hat{e}_z$ 分别代表 x, y, z 方向的单位矢量,则光轴方向可表示为:

$$e_p = \hat{e}_y \quad (10)$$

e 光波矢可表示为:

$$e_k = -\sin \theta_k \hat{e}_y + \cos \theta_k \hat{e}_z \quad (11)$$

对于 e 光,其折射率大小与波矢量和光轴夹角 $\theta_{k,p}$ 有关,即:

$$n_e' = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \sin^2 \theta_{k,p} + n_e^2 \cos^2 \theta_{k,p}}} \quad (12)$$

在界面 1 处根据折射定律有:

$$n \sin \alpha = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \sin^2 \theta_{k,p} + n_e^2 \cos^2 \theta_{k,p}}} \sin \theta_k \quad (13)$$

联立(10)式、(11)式可得:

$$\cos \theta_{k,p} = \mathbf{e}_k \cdot \mathbf{e}_p = -\sin \theta_k \quad (14)$$

将(14)式代入(13)式中,可得:

$$\tan \theta_k = \frac{n_o \cdot n \sin \alpha}{n_e \sqrt{n_o^2 - n^2 \sin^2 \alpha}} \quad (15)$$

由图 5 可知,e 光波在界面 2 处和界面 3 处的入射角分别为 $\theta_{2,e} = \theta_k + S$ 和 $\theta_{3,o} = S - \theta_{2,o} + \Delta\varphi$,在界面 2 和界面 3 处,由折射定律可得:

$$n_e' \sin \theta_{2,e} = n_o \sin \theta_{2,o} \quad (16)$$

$$n_o \sin \theta_{3,o} = n \sin(\varphi_1 + \Delta\varphi) \quad (17)$$

结合(14)式~(17)式,可得 o 光分束角 φ_1 与结构角 S 和入射角 α 的关系。

4.3 棱镜分束特性与结构角和入射角的关系

定义 $m = |\varphi_1 - \varphi_2|$ 为出射光束的不对称度, $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$ 为棱镜分束角,则 m 越大表示棱镜对称分束性能越差, φ 越大表示棱镜分束性能越好。结合(12)式~(17)式,可得棱镜分束角 φ 、出射光线不对称度 m 随结构角 S 和入射角 α 的变化关系,如图 6 所示。

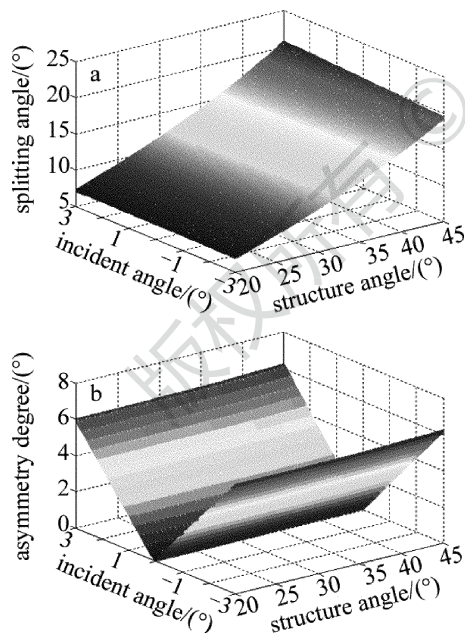


Fig. 6 a—relationship among splitting angle, structure angle and incident angle b—relationship among asymmetry degree, structure angle and incident angle

由图 6 可知:修正式 Wollaston 棱镜分束角随棱镜结构角的增大而增大,但随入射角的变化不明显。当棱镜结构角 $S = 30^\circ$,光线入射角从 $-3^\circ \sim +3^\circ$ 变化时,棱镜分束角变化约为 0.01° ,可见入射角的轻微变

动对分束角的影响可以忽略;相反,棱镜两出射光线的不对称度 m 受入射角变化影响较大,但随结构角的变化很小。可以看出,光线分别以正角度和负角度入射时,不对称度的变化近似关于入射角为零时对称,当入射角在 $-3^\circ \sim +3^\circ$ 之间变化时,两出射光线的不对称度小于 6° 。

5 结 论

基于折射定律和非涅耳公式,对一种修正式 Wollaston 对称分束棱镜的分束特性进行了研究。理论分析表明:棱镜出射的 o 光、e 光与水平方向夹角主要取决于棱镜结构角,受棱镜修正角影响较小;当棱镜结构角在 $20^\circ \sim 45^\circ$ 之间时,相应的修正角在 $0.05^\circ \sim 0.97^\circ$ 之间变化,棱镜的光强分束比保持在 0.98 以上,且分束比随结构角的变化幅度很小;以小角度入射时,入射角主要影响出射光束对称性,当入射角在 $-3^\circ \sim 3^\circ$ 之间变化时,两出射光线的不对称度小于 6° ,可以保证较好的对称分束效果。

参 考 文 献

- [1] YAO H T, LI G H, PENG H D, *et al.* The splitting angle and light intensity ratio of Wollaston prism within its viewing field angle[J]. Journal of Qufu Normal University, 2008, 34(2): 51-54 (in Chinese).
- [2] MA L L, SONG L K, WU F Q. Design of parallel and symmetric beam splitting prism based on Wollaston prism[J]. Optical Technique, 2003, 29(5): 602-603 (in Chinese).
- [3] ZHU H F, SONG L K, WANG X M. Study about splitting intensity ratio of a prism with variable beam splitting angle[J]. Optical Technique, 2003, 29(5): 614-616 (in Chinese).
- [4] ZHU H F, HAN R F, GUO W T, *et al.* Analysis of optical properties of Wollaston-type parallel-splitting prism[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(9): 1118-1122 (in Chinese).
- [5] ZHAO K H, ZHONG X H. Optics(II) [M]. Beijing: Peking University Press, 1984: 182-183 (in Chinese).
- [6] DENG H Y, WU F Q, TANG H J. The spectral properties of the splitting angle for Wollaston prism[J]. Laser Journal, 2005, 26(4): 42-43 (in Chinese).
- [7] ZHANG Ch M. Interference imaging spectroscopy[M]. Beijing: Science Press, 2010: 47-49 (in Chinese).
- [8] ZHANG Ch M, ZHAO B Ch, XIANG L B, *et al.* Wide-field-of-view polarization interference imaging spectrometer [J]. Applied Optics, 2004, 43(33): 6090-6094.
- [9] LIU J, JIN W Q, WANG Y H, *et al.* Design of simultaneous imaging polarimetry with double separate Wollaston prism[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0511001 (in Chinese).
- [10] LIN X, ZHOU F, LI H, *et al.* Static Fourier-transform spectrometer based on Wollaston prism[J]. Optik—International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(14): 3482-3484.
- [11] KUDENOV M W, MISKIEWICZ M, SANDERS N, *et al.* Achromatic Wollaston prism beam splitter using polarization gratings[J].

- Optics Letters, 2016, 41(19):4461-4463.
- [12] WU H Y, ZHANG Ch M, ZHAO B Ch. Theoretical analysis on extending the field-of-view of the imaging spectrometer based on combined Wollaston prisms[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(2): 930-935(in Chinese).
- [13] HUANG J Y, WU F Q, LI G H. Symmetry of beam splitting angle for uniaxial crystal prism[J]. Laser Technology, 1996, 20(2): 104-107(in Chinese).
- [14] HUANG J Y, WU F Q. The study about design and measure of uniaxial crystal prism with excellent symmetry of the beam splitting angle[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 1995, 6(4): 211-215(in Chinese).
- [15] LI G H, WU F Q, YU D H. Study of asymmetry of beam splitting angle for polarization beam splitting prism[J]. Journal of Applied Optics, 1991, 12(4): 21-25(in Chinese).
- [16] MENG F H, SONG L K, KONG F Zh, *et al.* A new symmetric beam-splitting polarization prism[J]. Laser Technology, 2006, 30(6): 670-672(in Chinese).
- [17] ZHANG X, WU F Q, PENG H D, *et al.* Symmetric beam splitting prism based on Wollaston prism[J]. Laser Journal, 2008, 29(1): 21-22(in Chinese).
- [18] SHEN W M, SHAO Zh X. Dispersion between ordinary ray and extraordinary ray in uniaxial crystals for any orientation of optical axis[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(6):765-768(in Chinese).
- [19] WU L, ZHANG Ch M, YUAN Y, *et al.* Exact calculation of the lateral displacement and optical path difference of savart polariscopes[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(7):886-889(in Chinese).
- [20] LIAO Y B. Polarization optics[M]. Beijing: Science Press, 2003: 71-79(in Chinese).