

doi:10.3788/gzxb20134209.1118

Wollaston 式平行分束偏光棱镜的光学特性分析

朱化凤, 韩瑞芳, 郭文婷, 焦志勇

(中国石油大学 理学院, 山东 青岛 266580)

摘要:根据折射定律结合棱镜的结构特点, 推导出了 Wollaston 式平行分束偏光棱镜所对应的切割角应满足的关系. 利用菲涅尔公式和薄膜的光强透射理论, 推导出棱镜的光强透射比、光强分束比和两出射光束的平行度表达式. 通过 Matlab 数值模拟, 研究并实验测量了棱镜的光强透射比、光强分束比和出射光平行度随入射角或入射波长的变化关系. 结果表明: 出射光束的平行度与实验结果符合得非常好, 光强透射比规律与理论结果一致. Wollaston 式平行分束偏光棱镜的光强透射比和光强分束比随入射角有微小的起伏变化, 当入射光束的入射角在 $-3^\circ \sim 3^\circ$ 的范围内入射或波长在 $(400 \sim 1\ 100)\text{nm}$ 范围内变化时, 两光束之间的夹角不超过 0.42° , 平行度稳定性较好.

关键词: Wollaston 棱镜; 切割角; 光强透射比; 光强分束比; 平行出射

中图分类号: O436.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)09-1118-5

Analysis of Optical Properties of Wollaston-type Parallel-splitting Prism

ZHU Hua-feng, HAN Rui-fang, GUO Wen-ting, JIAO Zhi-yong

(College of Science, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China)

Abstract: Based on the structure of the prism, the cut angle of Wollaston-type parallel-splitting polarizing prism is derived by using refraction law. The intensity transmittance, the splitting ratio and the parallel degree of the two output beams are deduced by using Fresnel formula and intensity transmittance theory of thin film. The variation relationships of law of intensity transmittance, splitting ratio and the parallel degree of the two output beams with incidence angle or incident wavelength are simulated under the Matlab environment. Experimental results of the intensity transmittance and the parallel degree varying with incident angle are obtained. The parallel degree is in good coincidence with the theoretical one and the law of intensity transmittance agrees with the theoretical one. Both theoretical and experimental results show that the intensity transmittance and the intensity splitting ratio of the Wollaston-type parallel-splitting polarizing prism fluctuate slightly with the incident angle and the incident wavelength. The included angle of the two beams is not more than 0.42° and maintains a good parallelism when the incident angle is in the range of $(-3 \sim 3)^\circ$ or the wavelength in range of $400 \sim 1\ 100\text{nm}$.

Key words: Wollaston prism; Cutting angle; Intensity transmission; Intensity splitting ratio; Parallel exit

0 引言

随着现代光学的快速发展, 偏振器件和偏光技术的应用范围越来越广泛, 对器件性能和种类的要求也越来越多. Wollaston 棱镜是被广泛应用的偏振分束棱镜, 能产生两束彼此分开的、振动方向互相

垂直的线偏振光. 它由两个直角棱镜组成, 并且有着分束角大, 光谱透射范围宽, 且基本对称分布等优点^[1], 因此引起了很多科研工作者的广泛关注.

随着应用范围的扩展, 为了满足应用的需求, 人们根据不同的需要对传统 Wollaston 棱镜做不同形式的改进. 文献[2]通过修正 Wollaston 棱镜的出射

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金(Nos. 14CX02021A, 20121174)、山东省自然科学基金项目(No. ZR2012DL12)和瞬态光学与光子技术国家重点实验室开放基金(No. SKLST201204)资助

第一作者: 朱化凤(1977-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为光学显微成像及偏振光学工程等. Email: zhuhf@upc.edu.cn

收稿日期: 2013-01-25; **录用日期:** 2013-05-02

端面,实现了 Wollaston 棱镜对入射光束的对称分束;文献[3]设计了双 Wollaston 棱镜,使两光束的分束角大大扩展.文献[4]对 Wollaston 棱镜分束角进行了研究;文献[5]在 Wollaston 棱镜的设计方面取得了一定的成果,并应用在了飞机、显微镜等领域.平行分束偏光镜^[6-7]是偏光分束棱镜的一种,它出射的两束平面偏振光传播方向相互平行,能够应用于激光调制、偏振状态传输,以及偏振干涉等技术.利用 Wollaston 棱镜与两个三角形棱镜组合实现平行分束^[7],其不足之处是结构不够稳定.文献[8]提出了设计 Wollaston 式平行分束偏光棱镜.光强透射比、光强分束比^[9-10]一直是衡量棱镜性能的重要参量,但对该类型棱镜光学特性的研究较少.

本文从 Wollaston 棱镜的基本结构出发,结合折射定律、多光束干涉理论和菲涅耳公式分析了如何得到平行出射的偏振光束,研究了 Wollaston 式平行分束偏光棱镜的光强透射特性,如光强透射比、光强分束比等,重点研究了两光束的平行度随入射角和波长等因素的变化关系.

1 Wollaston 式平行分束偏光棱镜的结构

Wollaston 式平行分束棱镜的结构如图 1.当一束强度为 I_0 的自然光垂直入射到 Wollaston 棱镜时,光束在棱镜中被分为传播速度不同的 o 光(寻常光)和 e 光(非寻常光),由于胶合面的光洁度非常高,因此要考虑在平行介质膜中发生多光束干涉.垂直入射时,在第二块晶体中形成分离的两束光,再经过出射面 3 和 4 的折射之后变为平行光束.当光束在如图 1 所示的主截面内入射时,光矢量垂直于主截面振动的光束分量称为光束的 s 分量,平行于主截面振动的光束分量称为光束的 p 分量. s 分量和 p 分量所对应的入射光强分别为 $I_0/2$.

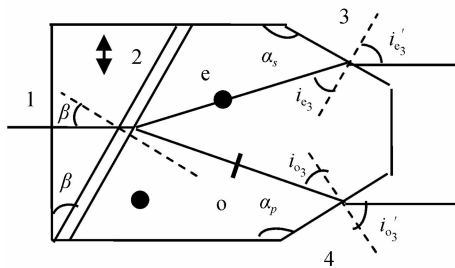


图 1 光束在 Wollaston 式平行分束偏光棱镜中的光路
Fig. 1 Schematic of optical path in a parallel-splitting Wollaston prism

1.1 s 分量的切割角 α_s 与其它切割角之间的关系

如图 2(a)所示,由光的折射定律得

$$n_o \sin \beta = n \sin i'_{e_1} \quad (1)$$

$$n \sin i'_{e_1} = n_e \sin i'_{e_2} \quad (2)$$

由图 1 得

$$n_e \sin i'_{e_3} = \sin i'_{e_3} \quad (3)$$

式中 n_o 和 n_e 分别为寻常光与非寻常光在方解石中的主折射率, n 为平行介质膜的折射率.

由几何角关系得

$$i'_{e_2} - \beta = i'_{e_3} - i_{e_3} \quad (4)$$

$$\alpha_s = i'_{e_3} + 90^\circ \quad (5)$$

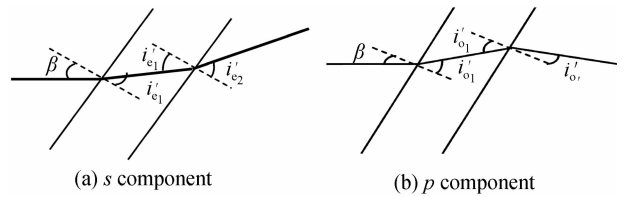


图 2 s 和 p 分量在平行胶合层中的光路

Fig. 2 Optical path of s and p components in parallel cementing layer

联立式(1)~(5)可得 i'_{e_3} 和 α_s .

例如:取(舍去了前两个条件) $\beta = 35^\circ$, $n_o = 1.658$, $n_e = 1.486$, $n = 1.55$,可解得

$$i'_{e_3} = 10.1892^\circ, \alpha_s = 100.1892^\circ$$

1.2 p 分量的切割角 α_p 与其它切割角之间的关系

如图 2(b)所示,由光的折射定律得

$$n'_e \sin \beta = n \sin i'_{o_1} \quad (6)$$

$$n \sin i'_{o_1} = n_o \sin i'_{o_2} \quad (7)$$

$$n_o \sin i'_{o_3} = \sin i'_{o_3} \quad (8)$$

式中 n'_e 为非寻常光在方解石中任意方向上的折射率^[12].

$$n'_e = n_e \sqrt{1 + \frac{(n_o + n_e) \sin^2 i_0}{n_o n_e}} \quad (9)$$

由几何角关系得

$$\beta - i'_{o_2} = i'_{o_3} - i_{o_3} \quad (10)$$

$$\alpha_p = i'_{o_3} + 90^\circ \quad (11)$$

联立式(6)~(11)可得 i'_{o_3} 和 α_p

例如:取 $\beta = 35^\circ$, $n_o = 1.658$, $n_e = 1.486$, $n = 1.55$,可解得: $i'_{o_3} = 14.4690^\circ$, $\alpha_p = 104.4690^\circ$

2 Wollaston 式平行分束棱镜的光强透射比和光强分束比

2.1 通过入射面 1 后 p 分量和 s 分量的光强透射比

设入射端面 1 的入射角为 i_0 , p 分量的折射角为 i_{p_1} , s 分量的折射角为 i_{s_1} ,由光的折射定律得

$$\sin i_0 = n'_e \sin i_{p_1}$$

$$\sin i_0 = n_o \sin i_{s_1}$$

当 $i_0 \neq 0$ 时,由菲涅耳公式^[13]以及式(9)得 s 和 p 分量的光强透射比^[13]为

$$T_{p_1} = \frac{4n'_e \cos i_0 \cos i_{p_1}}{(n'_e \cos i_0 + \cos i_{p_1})^2} \quad (12)$$

$$T_{s_1} = \frac{4n_o \cos i_o \cos i_{s_1}}{(\cos i_o + n_o \cos i_{s_1})^2} \quad (13)$$

当 $i_o = 0$ 时,由菲涅耳公式以及式(9)得 s 和 p 分量的光强透射比为

$$T_{p_1} = \frac{4n'_e \cos i_o \cos i_{p_1}}{(n'_e \cos i_o + \cos i_{p_1})^2} = \frac{4n'_e}{(n'_e + 1)^2}$$

$$T_{s_1} = \frac{4n_o \cos i_o \cos i_{s_1}}{(\cos i_o + n_o \cos i_{s_1})^2} = \frac{4n_o}{(1 + n_o)^2}$$

2.2 p 分量和 s 分量在平行介质膜上的光强透射比

由介质膜上下对应介质的折射率不同时,光强透射比^[14]及式(6)、(7)可得, p 分量的光强透射比为

$$T_{p_2} = \frac{(1 - r_{2p}^2)(1 - r_{2p}'^2)}{1 + r_{2p}^2 r_{2p}'^2 + 2r_{2p} r_{2p}' \cos \delta_{p_2}} \quad (14)$$

式中 r_{2p} 、 r_{2p}' ^[16]、 δ_{p_2} 分别为 p 分量在平行介质膜上下表面的振幅反射率及光程差,其表达式为

$$r_{2p} = \frac{n \cos \beta - n'_e \cos i'_{o_1}}{n \cos \beta + n'_e \cos i'_{o_1}} \quad (15)$$

$$r_{2p}' = \frac{n_o \cos i'_{o_1} - n \cos i'_{o_2}}{n_o \cos i'_{o_1} + n \cos i'_{o_2}} \quad (16)$$

$$\delta_{p_2} = \frac{4\pi}{\lambda} h n \cos i'_{o_1} \quad (17)$$

式中 h 为平行介质膜的厚度, λ 为入射光束的波长;同理得

$$T_{s_2} = \frac{(1 - r_{2s}^2)(1 - r_{2s}'^2)}{1 + r_{2s}^2 r_{2s}'^2 + 2r_{2s} r_{2s}' \cos \delta_{s_2}} \quad (18)$$

式中 r_{2s} 、 r_{2s}' 、 δ_{s_2} 分别为 s 分量在平行介质膜上下表面的振幅反射率及光程差,其表达式为

$$r_{2s} = \frac{n \cos \beta - n_o \cos i'_{e_1}}{n \cos \beta + n_o \cos i'_{e_1}} \quad (19)$$

$$r_{2s}' = \frac{n_e \cos i'_{e_1} - n \cos i'_{e_2}}{n_e \cos i'_{e_1} + n \cos i'_{e_2}} \quad (20)$$

$$\delta_{s_2} = \frac{4\pi}{\lambda} h n \cos i'_{e_1} \quad (21)$$

2.3 p 分量和 s 分量在出射面的光强透射比

由菲涅耳公式及式(3)、(8), p 分量和 s 分量在出射面的光强透射比为

$$T_{p_3} = \frac{\sin(2i_{o_3}) \sin(2i'_{o_3})}{\sin^2(i_{o_3} + i'_{o_3}) \cos^2(i_{o_3} - i'_{o_3})} \quad (22)$$

$$T_{s_3} = \frac{\sin(2i_{e_3}) \sin(2i'_{e_3})}{\sin^2(i_{e_3} + i'_{e_3}) \cos^2(i_{e_3} - i'_{e_3})} \quad (23)$$

综上分析得,一束自然光垂直入射到 Wollaston 棱镜后 p 分量和 s 分量的光强透射比为

$$T_p = T_{p_1} T_{p_2} T_{p_3} = \frac{4n'_e}{(n'_e + 1)^2} \cdot$$

$$\frac{(1 - r_{2p}^2)(1 - r_{2p}'^2)}{1 + r_{2p}^2 r_{2p}'^2 + 2r_{2p} r_{2p}' \cos \delta_{p_2}} \cdot \frac{\sin(2i_{o_3}) \sin(2i'_{o_3})}{\sin^2(i_{o_3} + i'_{o_3}) \cos^2(i_{o_3} - i'_{o_3})} \quad (24)$$

$$T_s = T_{s_1} T_{s_2} T_{s_3} = \frac{4n_o}{(n_o + 1)^2} \cdot \frac{(1 - r_{2s}^2)(1 - r_{2s}'^2)}{1 + r_{2s}^2 r_{2s}'^2 + 2r_{2s} r_{2s}' \cos \delta_{s_2}} \cdot \frac{\sin(2i_{e_3}) \sin(2i'_{e_3})}{\sin^2(i_{e_3} + i'_{e_3}) \cos^2(i_{e_3} - i'_{e_3})} \quad (25)$$

一束光强为 I_o 的自然光通过 Wollaston 棱镜后 p 分量和 s 分量的透射光强分别为

$$I_e = I_o T_p / 2 \quad (26)$$

$$I_o = I_o T_s / 2 \quad (27)$$

即可得到自然光通过 Wollaston 棱镜后的光强分束比为

$$M = I_e / I_o = T_p / T_s \quad (28)$$

2.4 T_p 、 T_s 、 M 随入射角 i_o 的变化情况

取 $h = 20 \mu\text{m}$,入射光波长 $\lambda = 589.3 \text{ nm}$,方解石中对应 o 光的折射率 $n_o = 1.658$, e 光折射率 $n_e = 1.486$,平行介质膜的折射率 $n = 1.55$,结构角 β 取 35° .图 3 给出了入射角在 $[-3^\circ, 3^\circ]$ 范围内变化时,光强透射比 T_p 、 T_s 随入射角的变化关系.由图 3 可知, p 分量和 s 分量光强透射比随入射角呈现一定的起伏变化,其变化范围约在 $0.76 \sim 0.86$ 之间,变化周期约在 2° 左右,但 s 分量的光强透射比随入射角的变化周期略比 p 分量的小一点.图 4 给出了入射角在 $[-3^\circ, 3^\circ]$ 范围内变化时,光强分束比 M 随入射角的变化关系.由图 4 可知,光强分束比呈现上下起伏变化,但变化范围并不大,在 1 处上下浮动.

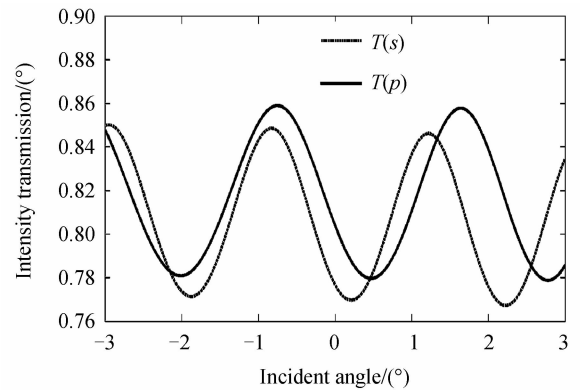


图 3 p 、 s 分量的光强透射比随入射角的变化关系
Fig. 3 The intensity transmittance of p and s components with the variation of incidence angle

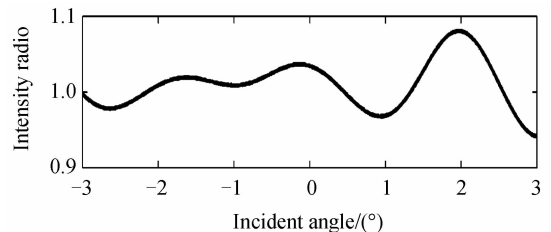


图 4 光强分束比随入射角的变化关系
Fig. 4 Curve of the beam splitting ratio with the variation of incidence angle

综上,图 3 和图 4 说明入射角 $[-3^\circ, 3^\circ]$ 范围内变化时, s 分量和 p 分量的光强透射比和光强分束比从数值上来讲变化并不大。

3 入射角对出射光束平行度的影响

3.1 入射角对 s 分量出射角变化的影响

在入射端面 1 的入射角为 i_0 , 则有

$$\sin i_0 = n_o \sin i_{e_0} \quad (29)$$

在平行介质膜中有

$$n_o \sin (i_{e_0} + \beta) = n \sin i'_{e_1} \quad (30)$$

$$n \sin i'_{e_1} = n_e \sin i'_{e_2} \quad (31)$$

由式(30)和(31)得

$$n_e \sin i'_{e_2} = n_o \sin (i_{e_0} + \beta) \quad (32)$$

在出射端面 3 上有

$$n_e \sin i_{e_3} = \sin i''_{e_3} \quad (33)$$

由几何关系得

$$i_{e_3} = \alpha_s + \beta - i'_{e_2} - \pi/2 \quad (34)$$

s 分量的出射角变化量

$$\delta_s = i''_{e_3} - i'_{e_3} \quad (35)$$

3.2 入射角对 p 分量出射角变化度的影响

在入射端面 1 上有

$$\sin i_0 = n'_e \sin i_{o_0} \quad (36)$$

在平行介质膜中有

$$n'_e \sin (\beta + i_{o_0}) = n \sin (i'_{o_1}) \quad (37)$$

$$n \sin (i'_{o_1}) = n_o \sin (i'_{e_2}) \quad (38)$$

由式(37)和(38)得

$$n_o \sin i'_{e_2} = n'_e \sin (\beta + i_{o_0}) \quad (39)$$

在出射端面 4 上有

$$n_o \sin i_{o_3} = \sin i''_{o_3} \quad (40)$$

由几何关系得

$$i_{o_3} = \alpha_p + \beta - i'_{o_2} - \pi/2 \quad (41)$$

p 分量的出射角变化量为

$$\delta_p = i''_{o_3} - i'_{o_3} \quad (42)$$

综上得出射两光束的夹角(这里也称平行度)为

$$\Delta = \delta_p + \delta_s \quad (43)$$

两光束的夹角绝对值越小,说明两光束平行性越好。

4 T_p 、 T_s 、 M 和 Δ 随 i_0 的变化关系以及 Δ 随 λ 的变化关系

4.1 T_p 、 T_s 、 M 和 Δ 随 i_0 的变化关系

取入射角 i_0 为 0 , $h = 20 \mu\text{m}$, 入射光波长 $\lambda = 589.3 \text{ nm}$, 结构角取 $\beta = 35^\circ$, 方解石中对应的 o 光的折射率 $n_o = 1.658$, e 光的折射率 $n_e = 1.486$, 平行介质膜的折射率 $n = 1.55$, 确定切割角 α_s 和 α_p , 然后利用得到的 α_s 和 α_p 数值分析出射光平行度随入射

角 i_0 和波长的变化关系以及此时 T_p 、 T_s 、 M 随 i_0 的变化关系. 图 5 给出的是当入射角在 $-3^\circ \sim 3^\circ$ 的范围内变化时, δ_s 、 δ_p 和两光束的平行度 Δ 随入射角 i_0 的变化关系曲线. 由图 5 可见 s 分量和 p 分量出射角度变化量 δ_s 和 δ_p 都随入射角 i_0 作近似的线性变化, δ_s 随入射角的增大而减小, δ_p 随入射角的增大而增大, 但 s 分量和 p 分量两出射光束之间的夹角在 0° 附近变化非常小, 这说明入射角 $[-3^\circ, 3^\circ]$ 范围内变化时, s 分量和 p 分量出射角仍然可以看作是平行的. 图 5 中分立的值为实验得到的两光束之间的夹角, 由此可见实验结果与理论结果基本相符. 图 6 给出的是光强透射比和光强分束比随入射角的变化关系曲线. 从图 6 可以得到此时 T_p 、 T_s 仍随入射角 i_0 成波动变化, 并且 s 分量的光强透射比随入射角的变化周期略比 p 分量的小一点. 图 6 中点化线部分即为实验结果, 由图 6 可知实验结果在测量光强透射比和光强分束比时仍然呈现出波动性的变化, 但理论和实验差别较大, 主要原因是要获得与理

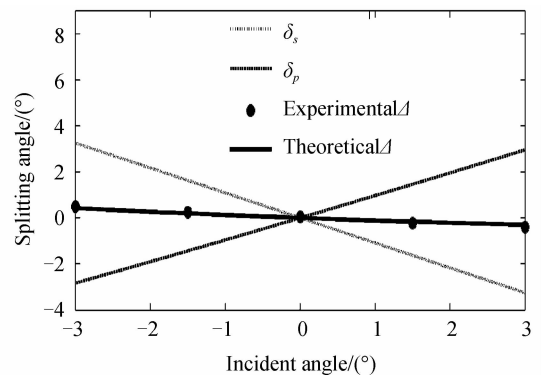


图 5 s 和 p 分量两出射光束之间的夹角随入射角的变化关系曲线

Fig. 5 The p and s components' included angle of the two outgoing beams with the variation of incidence angle

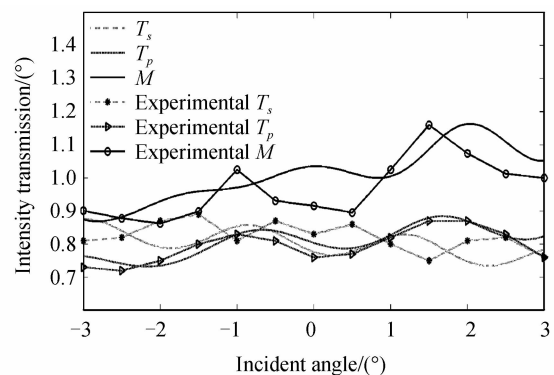


图 6 T_p 、 T_s 、 M 随入射角的变化关系曲线

Fig. 6 T_p 、 T_s 、 M with the variation of incidence angle

论模拟厚度一致的胶合层难度是非常大的,微小的变化就可以引起光束的光强透射比随入射角发生较大变化。

4.2 出射光的平行度随波长的变化关系

Wollaston 棱镜一般由方解石晶体构成,方解

石晶体的色散方程为修正的塞氏方程^[13]

$$n_o^2 = 2.6926 + \frac{0.0192}{\lambda^2 - 0.0195} - 0.0143\lambda^2 \quad (44)$$

$$n_e^2 = 2.1846 + \frac{0.0085}{\lambda^2 - 0.0143} - 0.0023\lambda^2 \quad (45)$$

将式(44)和(45)代入式(29)~(43),令 $i_0 = 0^\circ$, 平行介质膜的折射率 $n = 1.55$, 波长的取值范围为 $400 \sim 1100$ nm 时, s 和 p 分量的夹角随波长的变化关系曲线如图 7.

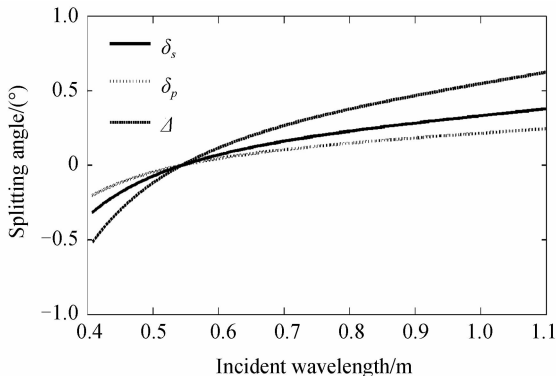


图 7 s 和 p 分量两出射光束之间的夹角随波长的变化关系曲线

Fig. 7 The included angle of the two outgoing beams with the variation of wavelength

由图 7 可见, s 分量和 p 分量出射角度变化量 δ_s 和 δ_p 都随波长的增大而增大, 但 s 分量和 p 分量两出射光束之间的夹角在 0° 附近变化较小, 这说明波长在 $400 \sim 1100$ nm 范围内变化时, s 分量和 p 分量出射角仍然可以看作是平行的.

5 结论

本文基于折射定律、角的几何关系和多光束干涉理论得出 Wollaston 棱镜平行出射时的切割角以及光强透射比和光强分束比. 结果表明: 通过改变 Wollaston 棱镜的切割角可以改变出射角的夹角. 正入射对应的切割角确定的情况下, 以小角度入射时, s 分量和 p 分量的光强透射比和光强分束比变化范围不大, 光强透射比随入射角作周期性变化. 当波长在 $400 \sim 1100$ nm 范围内的光束正入射时, 两出射光夹角基本不变, 可认为仍然保持平行.

参考文献

- [1] 姚启钧. 光学教程[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2008: 233-234.
- [2] ZHANG Xu, WU Fu-quan, PENG Han-dong, *et al.* Symmetric beam splitting prism based on wollaston prism[J]. *Laser Journal*, 2008, **29**(1): 21-22.
张旭, 吴福全, 彭捍东, 等. Wollaston 式对称分束偏光棱镜[J]. 激光杂志, 2008, **29**(1): 21-22.
- [3] ZHU Hua-feng, Nan Yu-jie, YUN Mao-jin, *et al.* Precise analysis of the splitting ratio of double Wollaston prism[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **36**(2): 06232002-1-6.
朱化凤, 南玉杰, 云茂金, 等. 双 Wollaston 棱镜光强分束比精确分析研究[J]. 光学学报, 2012, **36**(2): 06232002-1-6.
- [4] ZHAO Shuang, WU Fu-quan, WANG Hai-feng, *et al.* Influence of temperature on the divergence angles of calcite Wollaston prism by positive and negative incidence[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6): 1255-1258.
赵爽, 吴福全, 王海峰, 等. 正反方向入射冰洲石 Wollaston 棱镜分束角的温度效应[J]. 光子学报, 2008, **37**(6): 1255-1258.
- [5] MONTAROU C C, GAYLORD, THOMAS K, *et al.* Analysis and design of modified Wollaston prisms[J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(31): 6604-6616.
- [6] XUE Dong, WU Fu-quan, LI Hong-xia, *et al.* The matrix representation and application of parallel beam splitter[J]. *Journal of QuFu Normal University*, 2003, **29**(3): 50-52.
薛冬, 吴福全, 李红霞, 等. 平行分束偏光镜的矩阵表示及其应用[J]. 曲阜师范大学学报, 2003, **29**(3): 50-52.
- [7] MA Li-li, WU Fu-quan, SU Fu-fang, *et al.* Composite parallel splitting prism with tunable shear difference [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(2): 0216002-1-5.
马丽丽, 吴福全, 苏富芳, 等. 复合式剪切差可调谐平行分束偏光镜[J]. 中国激光, 2012, **39**(2): 0216002-1-5.
- [8] MA Li-li, SONG Lian-ke, WU Fu-quan, *et al.* Design of parallel and symmetric beam splitting prism based on Wollaston prism[J]. *Optical Technique*, 2003, **29**(5): 602-604.
马丽丽, 宋连科, 吴福全, 等. Wollaston 式平行分束与对称分束偏光棱镜设计[J]. 光学技术, 2003, **29**(5): 602-604.
- [9] DENG Hong-yan, WU Fu-quan, ZHENG Meng-meng, *et al.* Splitting intensity ratio of three-element Wollaston prism[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(7): 1331-1334.
邓红艳, 吴福全, 郑萌萌, 等. 双 Wollaston 棱镜光强分束比研究[J]. 光子学报, 2007, **36**(7): 1331-1334.
- [10] ZHU Hua-feng, WANG Xiu-min, WANG Ning, *et al.* Character of Transmittance for light intensity transmittance of crystal polarizing splitting prisms[J]. *Qingdao University News*, 2012, **25**(1): 1-8.
朱化凤, 王秀民, 王宁, 等. 晶体偏光分束棱镜的光强透射特性理论研究[J]. 青岛大学学报, 2012, **25**(1): 1-8.
- [11] KONG Wei-jin, WU Fu-quan, HAO Dian-zhong, *et al.* The design and test of narrow wavelength thin film polarizing beam splitting prism[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11): 32-35.
孔伟金, 吴福全, 郝殿中, 等. 窄带薄膜偏光分束镜的研制及其性能测试[J]. 光子学报, 2004, **33**(11): 32-35.
- [12] 梁铨廷. 物理光学[M]. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2011: 24-29.
- [13] 季家镛. 高等光学教程[M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2007: 62-65, 132-139.