

双沃拉斯顿棱镜光强分束比精确分析

朱化凤¹ 南玉杰¹ 云茂金² 王秀民¹ 宋连科³ 王 宁¹ 李代林¹

¹ 中国石油大学(华东)理学院, 山东 青岛 266580

² 青岛大学物理学院, 山东 青岛 266071; ³ 山东省激光偏光与信息技术重点实验室, 山东 曲阜 273165

摘要 利用折射定律, 介质膜两侧折射率不同时多光束干涉理论和菲涅耳公式, 精确推导了双沃拉斯顿棱镜的光强分束比的具体表达式。以公式为基础, 通过 Matlab 软件数值模拟作图分析光强分束比随入射角、入射波长和结构角的变化关系曲线。结果表明: 在棱镜为介质胶合型时, 光强分束比随入射角和入射波长的变化很小, 光强分束比基本为 1; 棱镜为空气胶合型时, 光强分束比随入射角, 结构角和波长的变化很大。两种情况下, 光强分束比随各参量的变化基本呈周期性变化。

关键词 光学器件; 双沃拉斯顿棱镜; o 光; e 光; 光强分束比; 菲涅耳公式

中图分类号 O436.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201232.0623002

Precise Analysis of the Intensity Splitting Ratio of Double Wollaston Prism

Zhu Huafeng¹ Nan Yujie¹ Yun Maojin² Wang Xiumin¹ Song Lianke³

Wang Ning¹ Li Dailin¹

¹ College of Science, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China

² College of Physics Science, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China

³ Shandong Provincial Key Laboratory of Laser Polarization and Information Technology, Qufu, Shandong 273165, China

Abstract The exact expression about the intensity splitting ratio of double Wollaston prism is given based on reflection law, multiple-beam interference and Fresnel formula. The effect of the incident angle, the wavelength of incidence and the cut angle on the splitting ratio is given by Matlab software simulation, which results in the fact that the influence of incident angle, wavelength and cut angle on the intensity splitting ratio is negligible for glue spaced prism, and tremendous for air spaced types. The intensity splitting ratio varies periodically with these parameters for both types prism.

Key words optical devices; double Wollaston prism; o light; e light; intensity splitting ratio; Fresnel formula

OCIS codes 230.1360; 230.5480; 260.1440

1 引 言

利用晶体的双折射现象制成的各种偏光分束镜, 因其优异的起偏、分束等性能而被广泛应用于现代光学、光电子应用技术^[1,2]、高性能的精密光学成像系统^[3]和激光干涉测量系统^[4]等。沃拉斯顿棱镜是最为常见的偏光分束器件之一。它能够使透过它的一束光分解成振动方向互相垂直的 o 光(寻常光)和 e 光(非寻常光), 产生较大的分束角。由两块三

角形方解石晶体和一块梯形方解石晶体组合而成的双沃拉斯顿棱镜, 因其可以减弱像畸变和横向色差效应, 近年来引起了科研工作者的广泛关注^[5,6]。光强分束比^[7]、透射率是衡量沃拉斯顿棱镜的重要参数, 因而研究双沃拉斯顿棱镜的光强分束比会对某些领域有重大的指导意义。文献[8]从理论上分析了光学胶折射率对沃拉斯顿棱镜透射光光强分束比、总透射率的影响。文献[9,10]对 90°分束偏光

收稿日期: 2011-11-14; 收到修改稿日期: 2011-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(10904080, 40704021)、山东省自然科学基金(Y2008A34, ZR2010DQ0150)和中央高校基本科研业务费专项资金(12CX06089A)资助课题。

作者简介: 朱化凤(1977—), 女, 博士, 副教授, 主要从事激光偏光技术和光学超分辨等方面的研究。

E-mail: zhuhf@upc.edu.cn

镜和双沃拉斯顿棱镜的光强分束比进行了研究。但是通过双沃拉斯顿棱镜的 o 光和 e 光,考虑空气薄膜上下的折射率不同时,光强透射率和光强分束比的具体表达式还未见报道。本文将在折射定律、多光束干涉和非涅耳公式的基础上,理论分析光强分束比的具体表达式,并作图分析光强分束比随入射角、入射波长和结构角的变化规律。

2 一束自然光透过双沃拉斯顿棱镜后 p 分量和 s 分量的光强透射率

双沃拉斯顿棱镜的结构和一束自然光通过双沃拉斯顿棱镜后的光路,如图 1 所示。

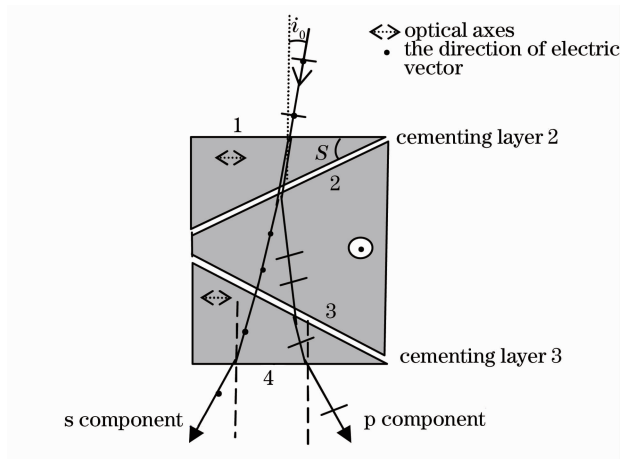


图 1 光束的 s 分量和 p 分量在沃拉斯顿棱镜中的光路图

Fig. 1 Schematic diagram of optical path of s component and p component of the beam in a Wollaston prism

当一束强度为 I_0 单色自然光以角度 i_0 入射到沃拉斯顿棱镜,光束在棱镜的第一块晶体中分为传播速度不同的 o 光和 e 光,到达第二块晶体中时,第一块晶体中的 o 光(e 光)变为第二块晶体中的 e 光(o 光),折射率发生相应的变化。当光束穿过平行介质膜时,在空气薄膜上发生透射时,需考虑多光束干涉效应。当光束在如图 1 所示的横截面(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 p 分量。s 分量和 p 分量所对应的入射光强各为 $I_0/2$ 。

2.1 通过双沃拉斯顿棱镜后 p 分量的光强透射率

1) p 分量在入射面 1 的透射率

设 p 分量在入射面 1 的折射角为 i_{p1} ,由光的折射定律得

$$\sin i_0 = n'_e \sin i_{p1}, \quad (1)$$

式中 n'_e 为非常光在晶体中的折射率^[11]

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

式中 n_o 和 n_e 分别表示方解石晶体的主折射率,在如图 1 所示的主截面内,当入射光线处于晶体表面的法线的右侧时,入射角取正,从左侧入射时,入射角取负。

由菲涅耳公式, p 分量对应的光强透射率 T_{p1} ^[12] 为

$$T_{p1} = \frac{4n'_e \cos i_0 \cos i_{p1}}{(n'_e \cos i_0 + \cos i_{p1})^2}. \quad (3)$$

2) p 分量在胶合层 2 和 3 上的光强透射率

p 分量在胶合层 2 和 3 的光路,如图 2 所示。由几何关系知,在胶合层 2 的上表面的光波法线的入射角为 $(S + i_{p1})$, S 为棱镜结构角,设其折射角为 i_{p2} ,则在胶合层的下表面的入射角为 i_{p2} ,设其出射角为 i'_{p2} ,根据折射定律,在上下表面分别有

$$n'_e \sin(S + i_{p1}) = n \sin i_{p2} = n_o \sin i'_{p2}, \quad (4)$$

式中 n 为胶合面介质的折射率,由介质膜上下对应介质的折射率不同时,光强透射率可得^[13], p 分量的光强透射率为

$$T_{p2} = \frac{(1 - r_{2p}^2)(1 - r'_{2p})}{1 + r_{2p}^2 r'_{2p} + 2r_{2p} r'_{2p} \cos \delta_{p2}}, \quad (5)$$

式中 r_{2p} , r'_{2p} , δ_{p2} 分别为 p 分量在胶合层 2 上下表面的振幅反射率及光程差,其表达式为

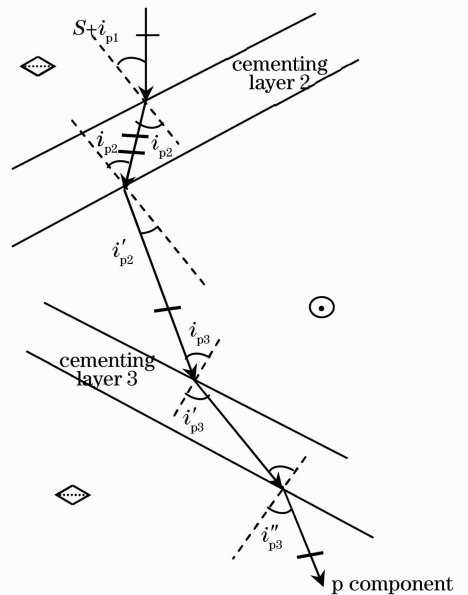


图 2 p 分量在胶合层透射的光路图

Fig. 2 Schematic diagram of p component transmission through the cementing layers in prism

$$r_{2p} = \frac{n \cos(S + i_{p1}) - n'_e \cos i_{p2}}{n \cos(S + i_{p1}) + n'_e \cos i_{p2}}, \quad (6)$$

$$r'_{2p} = \frac{n_o \cos i_{p2} - n \cos i'_{p2}}{n_o \cos i_{p2} + n \cos i'_{p2}}, \quad (7)$$

$$\delta_{p2} = \frac{4\pi h_1 n \cos i_{p2}}{\lambda}. \quad (8)$$

光束的 p 分量从胶合层 3 出射时,又变为 e 光,光对应的折射率又变为 n''_e 。设在胶合层 3 的上表面的入射角为 i_{p3} ,设其折射到胶合层内的折射角为 i'_{p3} ,从胶合层 3 出射角为 i''_{p3} ,根据光路的几何关系和折射定律得

$$i_{p3} = 2S - i'_{p2}, \quad (9)$$

$$n_o \sin i_{p3} = n \sin i'_{p3} = n''_e \sin i''_{p3}, \quad (10)$$

式中

$$n''_e = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \cos^2(S - i''_{p3}) + n_e^2 \sin^2(S - i''_{p3})}}, \quad (11)$$

与求 p 分量在胶合层 2 光强透射率相同,可得 p 分量在胶合层 3 光强透射率为

$$T_{p3} = \frac{(1 - r_{3p}^2)(1 - r'^2_{3p})}{1 + r_{3p}^2 r'^2_{3p} + 2r_{3p} r'_{3p} \cos \delta_{p3}}, \quad (12)$$

式中 r_{3p} , r'_{3p} 和 δ_{p3} 分别为 p 分量在胶合层 3 上下表面的振幅反射率及光程差,它们分别表示为

$$r_{3p} = \frac{n \cos i_{p3} - n_o \cos i'_{p3}}{n \cos i_{p3} + n_o \cos i'_{p3}}, \quad (13)$$

$$r'_{3p} = \frac{n''_e \cos i'_{p3} - n \cos i''_{p3}}{n''_e \cos i'_{p3} + n \cos i''_{p3}}, \quad (14)$$

$$\delta_{p3} = \frac{4\pi h_2 n \cos i'_{p3}}{\lambda}. \quad (15)$$

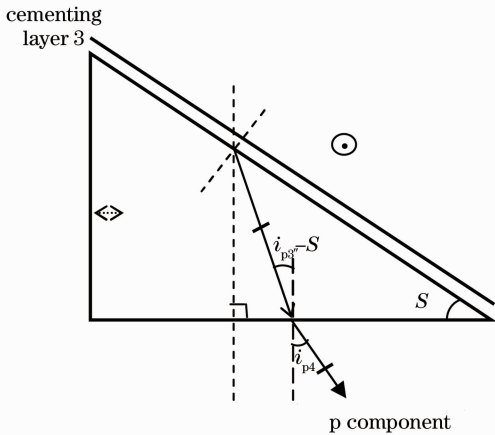


图 3 光束的 p 分量在出射面对应的光路图

Fig. 3 Optical path of p component of the beam on the output face

3) p 分量在出射面的光强透射率

在出射面, p 分量对应入射角为 $i''_{p3} - S$, 设出射

角为 i_{p4} , 如图 3 所示, 根据折射定律得

$$n''_e \sin(i''_{p3} - S) = \sin i_{p4}. \quad (16)$$

根据菲涅耳定律, p 分量在出射面的光强透射率为

$$T_{p4} = \frac{\sin 2(i''_{p3} - S) \sin 2i_{p4}}{\sin^2(i''_{p3} - S + i_{p4}) \cos^2(i''_{p3} - S - i_{p4})}. \quad (17)$$

由以上分析可知, 一束自然光通过双沃拉斯顿棱镜后 p 分量的光强透射率为

$$T_p = T_{p1} T_{p2} T_{p3} T_{p4} = \frac{4n'_e \cos i_0 \cos i_{p1}}{(n'_e \cos i_0 + \cos i_{p1})^2} \cdot \frac{(1 - r_{2p}^2)(1 - r'^2_{2p})}{1 + r_{2p}^2 r'^2_{2p} + 2r_{2p} r'_{2p} \cos \delta_{p2}} \cdot \frac{(1 - r_{3p}^2)(1 - r'^2_{3p})}{1 + r_{3p}^2 r'^2_{3p} + 2r_{3p} r'_{3p} \cos \delta_{p3}} \cdot \frac{\sin 2(i''_{p3} - S) \sin 2i_{p4}}{\sin^2(i''_{p3} - S + i_{p4}) \cos^2(i''_{p3} - S - i_{p4})}. \quad (18)$$

2.2 通过双沃拉斯顿棱镜后 s 分量的光强透射率

利用与求通过双沃拉斯顿棱镜后 p 分量的光强透射率相同的方法, 可得

$$\begin{cases} \sin i_0 = n_o \sin i_{s1} \\ n_o \sin(S + i_{s1}) = n \sin i_{s2} = n_e \sin i'_{s2} \\ n_e \sin i_{s3} = n \sin i'_{s3} = n_o \sin i''_{s3} \\ n_o \sin(S - i''_{s3}) = \sin i_{s4} \end{cases}, \quad (19)$$

式中 i_{s1} 为 s 分量在入射面 1 的折射角, $S + i_{s1}$, i_{s2} 为 s 分量在胶合层 2 的上表面的光波法线的入射角和折射角, 同时 i_{s2} 也是 s 分量在胶合层 2 的下表面的入射角, i'_{s2} 为其出射角, i_{s3} , i'_{s3} , i''_{s3} 分别为 s 分量在胶合层 3 的上表面的入射角, 折射到胶合层内的折射角, 从胶合层 3 的出射角。 $S - i''_{s3}$, i_{s4} 为 s 分量在出射面的入射角和出射角,

$$i_{s3} = 2S - i'_{s2}. \quad (20)$$

同理可得, 一束自然光通过双沃拉斯顿棱镜后 s 分量的光强透射率为

$$T_s = T_{s1} T_{s2} T_{s3} T_{s4} = \frac{4n_o \cos i_0 \cos i_{s1}}{(\cos i_0 + n_o \cos i_{s1})^2} \cdot \frac{(1 - r_{2s}^2)(1 - r'^2_{2s})}{1 + r_{2s}^2 r'^2_{2s} + 2r_{2s} r'_{2s} \cos \delta_{s2}} \cdot \frac{(1 - r_{3s}^2)(1 - r'^2_{3s})}{1 + r_{3s}^2 r'^2_{3s} + 2r_{3s} r'_{3s} \cos \delta_{s3}} \cdot \frac{\sin 2(S - i''_{s3}) \cdot \sin 2i_{s4}}{\sin^2(S - i''_{s3} + i_{s4})}. \quad (21)$$

综上所述, 一束光强为 I_0 的自然光通过双沃拉斯顿棱镜后 p 分量和 s 分量的透射光强分别为

$$I_e = \frac{I_0}{2} T_p, \quad (22)$$

$$I_o = \frac{I_0}{2} T_s, \quad (23)$$

即可得到自然光通过双沃拉斯顿棱镜后的光强分束

比为

$$M = I_e/I_o = T_p/T_s. \quad (24)$$

3 数值模拟分析

对(24)式求解出的光强分束比 M 进行数值模拟分析。取胶合层间隙 $h = 20 \mu\text{m}$, 入射光波长 $\lambda = 589.3 \text{ nm}$, 对应的 o 光的折射率 $n_o = 1.658$, e 光的折射率 $n_e = 1.484$ 。如果胶合层为空气, 对应的折射率取 $n = 1$ (空气胶合型), 图 4(a)~(c) 分别给出了当结构角分别取 $S = 20^\circ, S = 25^\circ, S = 30^\circ$, 入射角在 $(-5^\circ, 5^\circ)$ 范围内变化时, M 随入射角变化的曲线图。图 5 对应的是相同情况下, 胶合介质的折射率

取 $n = 1.55$ (介质胶合型) 时的 M 随入射角的变化关系曲线。由图 4 和图 5 可见, 任何情况下, 随着入射角在垂直入射附近连续变化时, M 都呈现出周期性的变化。总体而言, 周期的大小随着结构角的增大而减小, 振幅随着结构角的增大而增大。胶合型棱镜的光强透射率在周期性变化的同时, 其周期性变化的振荡中心总体呈上升趋势。但对这些变化, 胶合层型比介质胶合型要表现的剧烈的多。比如, $S = 30^\circ$ 时, 在 $(-5^\circ, 5^\circ)$ 范围内, 胶合层型对应的光强透射率在 $(0.6 \sim 3.5)$ 之间变化, 而介质胶合型的变化范围则为 $(1.048 \sim 1.0625)$ 。

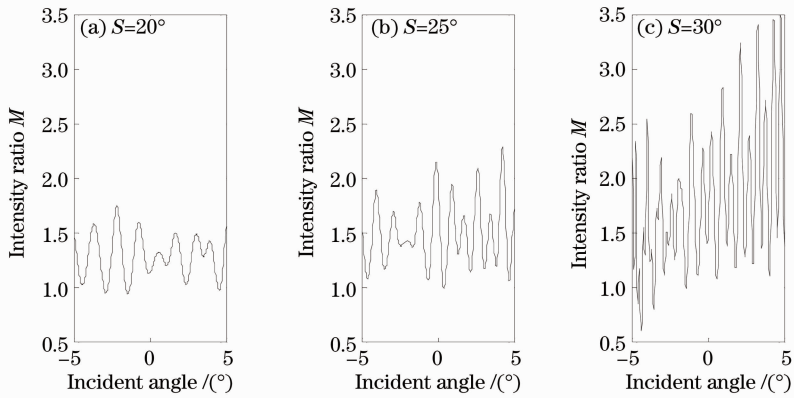


图 4 光强分束比随入射角的变化关系曲线 ($n = 1$)

Fig. 4 Intensity splitting ratio versus incident angle with $n = 1$

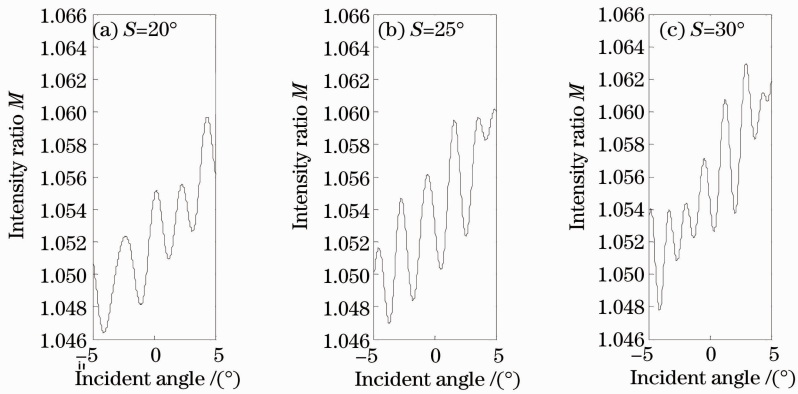


图 5 光强分束比随入射角的变化关系曲线 ($n = 1.55$)

Fig. 5 Intensity splitting ratio versus incident angle with $n = 1.55$

构成双沃拉斯顿棱镜的材料一般是方解石晶体, 描述方解石色散特性的公式为修正的塞德尔方程, 公式中的有关参数由实验数据确定。修正的塞德尔方程^[14]对于寻常光和非常光可以分别表示为

$$\begin{cases} n_o^2 = 2.6926 + \frac{0.0192}{\lambda^2 - 0.0195} - 0.0143\lambda^2 \\ n_e^2 = 2.1846 + \frac{0.0085}{\lambda^2 - 0.0143} - 0.0023\lambda^2 \end{cases}, \quad (25)$$

将(25)式中的 n_o, n_e 代入(1)~(24)式, 令 $h = 20 \mu\text{m}, n = 1$ 时, 结构角分别取 $S = 20^\circ, S = 25^\circ, S = 30^\circ$, 波长的取值范围为 $400 \sim 1100 \text{ nm}$ 时, M 随波长变化的曲线分别如图 6(a)~(c) 所示。图 7 对应的是相同情况下, 胶合介质的折射率取 $n = 1.55$ 时的 M 随波长的变化关系曲线。由图 6 和图 7 可见, M 随波长的变化也基本呈现周期性变化, 振幅的大小

是随波长变化的,但振幅变化的周期要比 M 随波长的变化周期要大得多。因此谱线的形状类似于“拍”。

对于空气胶合型棱镜,还有一个明显的特点:在结构角相同的情况下,入射波长越长, M 的变化周期延长,振幅的周期性变化的周期也延长。在相同波长附近,随着结构角的增大, M 随波长的变化周期逐渐变长,振幅的变化周期要缩短,但振幅大小总体来看也随着结构角的增大而增大。空气胶合型棱镜的 M 周期性变化的中心基本保持不变,而介质胶

合型棱镜的 M 周期性变化的中心随着波长的增加在逐渐降低。

总体看来仍然有:介质胶合型比胶合层型棱镜的 M 变化的幅度要小的多,变化的周期要小得多。

图 8 给出了正入射 ($i_0 = 0$) 时,当结构角在 $20^\circ \sim 40^\circ$ 范围内变化的过程中, M 随结构角变化的关系曲线。图 8(a) 对应 $n = 1$,图 8(b) 对应 $n = 1.55$ 。

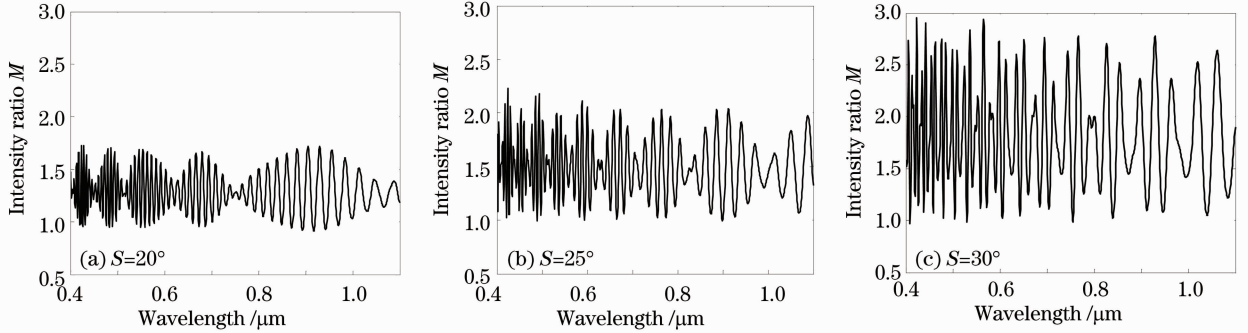


图 6 光强分束比随波长的变化关系曲线 ($n=1$)

Fig. 6 Intensity splitting ratio versus wavelength with $n=1$

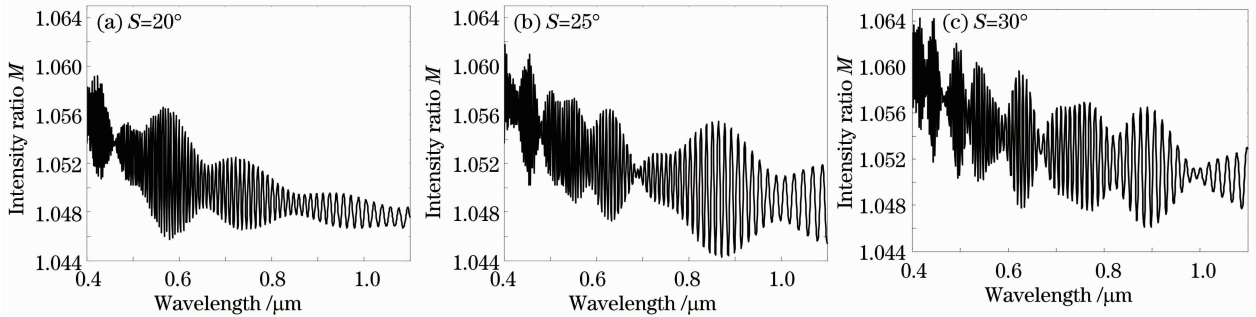


图 7 光强分束比随波长的变化关系曲线 ($n=1.55$)

Fig. 7 Intensity splitting ratio versus wavelength with $n=1.55$

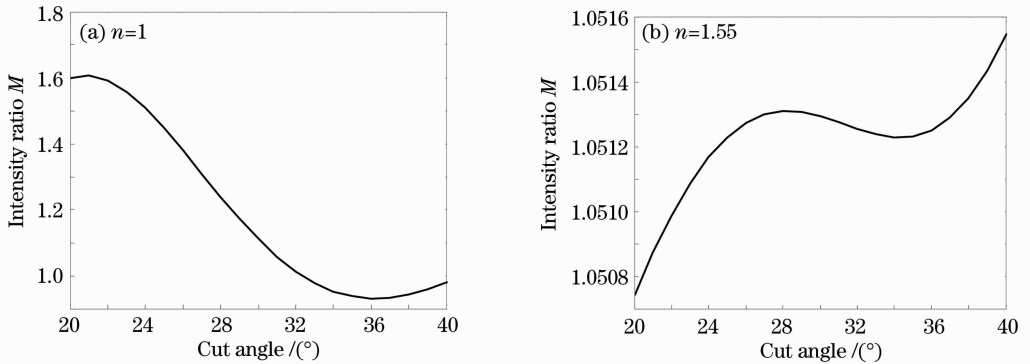


图 8 光强分束比随结构角的变化关系曲线

Fig. 8 Intensity splitting ratio versus the cut angle

由图 8 可知, $n=1$ 时,在讨论的结构角范围内, M 有时候大于 1 有时候小于 1,变化范围较大 ($M =$

$0.93 \sim 1.61$), $n=1.55$ 时, M 基本没有变化 ($M \approx 1.05$)。

总之,当入射角、波长和结构角在一定范围内变

化时,介质胶合型的棱镜引起光强分束比的变化很小,基本为 1,即从棱镜出射的两光束呈等光强分配。但空气胶合型棱镜的光强分束比则会受到这些因素的很大影响,这使得对棱镜的加工过程(要求棱镜的结构角满足使光强分束比为 1 的条件)和棱镜在光路中的调整,都提出了非常高的要求。

4 结 论

目前对偏光棱镜的分析基本不考虑胶合层的多光束反射对光强的影响,得到光强分束比对入射角、波长等参数是非周期性变化的结论^[9],即使考虑棱镜胶合层中多光束干涉的影响,讨论对象也是诸如格兰-泰勒棱镜这样的结合层上下介质的折射率也是相同的情况^[15,16],本文考虑胶合层上下方解石晶体由于光轴的方向不同而引起的光束折射率的不同对胶合层透射率的影响,利用折射定律和菲涅耳公式,推导了双沃拉斯顿棱镜的光强分束比的详细表达式。通过 Matlab 软件数值模拟作图分析光强分束比随入射角、入射波长、结构角的变化关系曲线。结果表明当棱镜为介质胶合型时,光强分束比随入射角,入射波长和结构角的变化很小,可以看做是等分束。空气隙胶合型棱镜尽管可以提高抗光损伤阈值,但光强分束比随入射条件和加工精度的影响太大,致使在使用过程中不能保证稳定的光强分束比,所以一般对棱镜采用介质胶合会使其光束性能更加稳定。通过本文的分析,还可以看到,如果采用空气胶合棱镜,对特定的棱镜可以通过适当地调整入射角的大小来调节光强分束比,一般结构角较大的棱镜对入射角的变化更为敏感,不容易调节,可以通过在设计的过程中适当减小结构角来降低光强分束比对入射角的敏感性,从而提高调节精度。

双沃拉斯顿棱镜一般是由天然的冰洲石晶体加工而成,不同矿源的冰洲石晶体对同一波长的光吸收也有一定差异,因此本文的讨论没有考虑冰洲石晶体材料的吸收对光强分束比的影响。如何设计出既能有稳定的光强分束比,又能具有良好的抗光损伤阈值的棱镜是下一步将要研究的问题。

参 考 文 献

- 1 Ma Yangwu, Huang Lin. Analysis of Wollaston polarizer in imaging systems[J]. *Laser Technology*, 1996, **20**(2): 68~72
马养武,黄霖. 成像系统中的沃拉斯顿偏振器研究[J]. *激光技术*, 1996, **20**(2): 68~72
- 2 Yu Yingjie, Li Pengsheng, Oiang Xifu *et al.*. An analysis of the adjustment for optical path in a heterodyne interferometer[J].

- Opto-Electronic Engineering*, 2000, **27**(1): 44~47
于瀛洁,李鹏生,强锡富等. 外差干涉仪中光路调整的分析[J]. *光电工程*, 2000, **27**(1): 44~47
- 3 Dan Komisarek, Karl Reichard, Dan Merdes *et al.*. High-performance non-scanning Fourier-transform spectrometer that uses a Wollaston prism array[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(20): 3983~3988
- 4 C. Simon Maria. Wollaston prism with large split angle[J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(3): 369~376
- 5 Li Guohua, Xiao Shengan, Li Jizhong *et al.*. Study on phase retardation of a Wollaston prism in convergent light[J]. *Chinese J. Lasers*, 1992, **19**(7): 512~516
李国华,肖胜安,李继仲等. Wollaston 用于汇聚光束中的相位延迟研究[J]. *中国激光*, 1992, **19**(7): 512~516
- 6 Zhao Pei, Wu Fuquan, Hao Dianzhong *et al.*. Development of the Wollaston prism antireflection film[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(12): 1703~1705
赵培,吴福全,郝殿中等. 沃拉斯顿棱镜增透膜的研制[J]. *中国激光*, 2005, **32**(12): 1703~1705
- 7 Wang Wei, Wu Fuquan, Fu Fufang. Research of splitting angle and splitting intensity ratio of OE double escape prism[J]. *Laser Technology*, 2003, **27**(6): 560~562
王伟,吴福全,苏富芳. OE 双输出棱镜的分束角和光强分束比研究[J]. *激光技术*, 2003, **27**(6): 560~562
- 8 Wang Haifeng, Wu Fuquan, Hao Dianzhong *et al.*. Influence of the refractive index of cement on Wollaston prism's transmitting performance[J]. *Laser Technology*, 2007, **31**(6): 668~670
王海峰,吴福全,郝殿中等. 光学胶折射率对沃拉斯顿棱镜透射性能的影响[J]. *激光技术*, 2007, **31**(6): 668~670
- 9 Wu Fuquan, Huang Jiayin, Feng Taizhong *et al.*. Research on beam splitting intensity ratio of 90° polarization beam split prism [J]. *Laser Technology*, 1994, **18**(5): 310~312
吴福全,黄家寅,封太忠等. 90°分束偏光镜光强分束比研究[J]. *激光技术*, 1994, **18**(5): 310~312
- 10 Deng Hongyan, Wu Fuquan, Zheng Mengmeng. Splitting intensity ratio of three-element wollaston prism [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(7): 1331~1333
邓红艳,吴福全,郑萌萌. 双沃拉斯顿棱镜光强分束比研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(7): 1331~1333
- 11 Kong Weijin, Wu Fuquan, Hao Dianzhong *et al.*. The design and test of narrow wavelength thin Film polarizing beam splitting prism[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11): 1373~1376
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): 1373~1376
- 12 Liang Quanting. *Physical Optics(The 3rd version)* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011. 26~28
梁铨廷. *物理光学(第三版)*[M]. 北京:电子工业出版社, 2011. 26~28
- 13 Ji Jiarong. *Course Advanced Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2007. 132~139
季家谔. *高等光学教程*[M]. 北京:科学出版社, 2007. 132~139
- 14 Chen Xiyuan, Shan Ming. Dispersion formula of calcite. [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(5): 38~42
陈西园,单明. 方解石晶体色散方程的研究[J]. *光电工程*, 2007, **34**(5): 38~42
- 15 Zhu Huafeng, Song Lianke, Chen Jianwen *et al.*. Modified formula of Malus' law for Glan Taylor polarizing prisms [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **245**(1-6): 1~9
- 16 Zhu Huafeng, Song Lianke, Wu Fuquan *et al.*. Cause of "minute fluctuation" on the transmission curve of Taylor polarizing prism [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1): 41~44
朱化凤,宋连科,吴福全等. 泰勒检偏棱镜透射率随旋转角周期“抖动”的理论分析[J]. *中国激光*, 2004, **31**(1): 41~44