

文章编号: 1001-3806(2008)02-0151-03

反射型单元结构对称分束偏光棱镜的设计

倪志波¹, 宋连科^{1*}, 刘建苹², 郑萌萌^{1,2}

(1. 曲阜师范大学 激光研究所, 曲阜 273165; 2 曲阜师范大学 物理系, 曲阜 273165)

摘要: 为了设计一种单元结构的反射型等分束角偏光棱镜, 根据各向异性晶体中光的全反射理论及实际使用要求, 从理论上对这种单元反射型棱镜的结构进行了分析, 找到了一个使棱镜实现等角分束的结构角, 并以此结构角为基础, 分析得到了棱镜的分束角不对称度随光波入射角及入射波长的变化关系。结果表明, 利用此理论结果设计的单元结构反射型偏光镜, 其分束角不对称度随入射角和入射波长的变化不大, 满足使用要求。

关键词: 光学器件; 偏光棱镜; 分束角; 结构角; 不对称度; 折射率

中图分类号: O436.3 **文献标识码:** A

The design and performance analysis of modular structural reflected polarizing prism of equal splitting angle

NI Zhi-bo¹, SONG Lian-ke¹, LIU Jian-ping², ZHENG Meng-meng^{1,2}

(1. Institute of Laser Research, Qufu Normal University, Qufu 273165, China; 2. Department of Physics, Qufu Normal University, Qufu 273165, China)

Abstract In order to design a modular structural reflected polarizing prism which has an equal splitting angle, the construction of the prism was analyzed in theory by combining the reflecting principle in anisotropic crystal and practical application, and a structure angle was found which can make the splitting angle equal. Based on the angle, two aspects of the prism were calculated, i.e. the relationship between the degree of asymmetry and the incidence angle of light wave and the relationship between the degree of asymmetry and incident wavelength. The results show although the degree of asymmetry has a small fluctuation, the design proposal is still successful.

Key words optical devices; polarizing prism; splitting angle; structural angle; degree of asymmetry; refractive index

引 言

反射型对称分束偏光棱镜^[1]是在上世纪 80 年代才被人们注意的一种偏光棱镜, 它满足于光学工程技术中的特殊需要。其基本设计思路是根据双折射晶体表面的全反射原理, 使入射光分束、转向并起偏, 集起偏、分束与光传播变向于一身。根据对目前掌握资料分析, 此类棱镜达到分束变向并不难, 但要达到分束角对称设计难度较大。当前采用的设计方案基本都是靠二元结构来实现光的对称分束, 这类设计不仅降低了光强透射比^[2], 而且还会引起出射光的扰动^[3]。因此, 尽量简化设计, 直至能够应用单元结构方式实现, 无论是对器件总体性能的稳定性, 还是降低器件成本都将是非常有意义的事情。

作者简介: 倪志波 (1981-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光偏光理论的研究及器件设计。

* 通讯联系人。E-mail: lksong@qfnu.edu.cn

收稿日期: 2006-12-01; 收到修改稿日期: 2007-03-12

1 棱镜设计

基本的单元结构反射型对称分束偏光棱镜的结构如图 1 所示, 双箭头方向代表晶体的光轴方向, 棱镜的

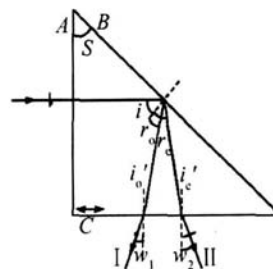


Fig 1 Structure of prism

结构角为 S_0 。一束光强为 I_0 的单色自然光垂直入射到该棱镜上, 在第 2 表面 B 上的入射角为 i , 经全反射后被分成 o 光 e 光两束光并发生转向, 反射角分别为 r_o, r_e 。根据 e 光束在棱镜中传播的几何关系^[4]可得:

$$n_o \sin S = n_e' \sin r_e \quad (1)$$

式中, $r_e = 90^\circ - (S - i_e')$, i_e' 是 e 光在第 3 表面 C 上的入射角, n_e' 表示 e 光经反射面反射后的折射率, 数学

表达式为^[5]:

$$n_e' = \frac{n_o n_e}{n_o^2 \sin^2 \varphi + n_e'^2 \cos^2 \varphi} \quad (2)$$

φ 是光波法线^[6]与光轴之间的夹角, 此处 $\varphi = 90^\circ - i_e'$ 。把(2)式及 φ, r_e 的表达式代入(1)式, 经整理可得:

$$\tan i_e' = \frac{n_o^2 \sin^2 S - n_e'^2 \cos^2 S}{n_e'^2 \sin 2S} \quad (3)$$

$$i_e' = \arctan \left[\frac{n_o^2 \sin^2 S - n_e'^2 \cos^2 S}{n_e'^2 \sin 2S} \right] \quad (4)$$

对于 o 光有:

$$i_o' = 90^\circ - 2S \quad (5)$$

i_o' 表示 o 光的在第 3 表面 C 上的入射角。当 α, e 两束光从 C 表面出射时, 其折射角 w_1, w_2 应分别满足以下关系:

$$\begin{cases} n_o \sin i_o' = \sin w_1 \\ n_e' \sin i_e' = \sin w_2 \end{cases} \quad (6)$$

由(6)式可以得到 α, e 两光束的折射角, 即:

$$\begin{cases} w_1 = \arcsin(n_o \sin i_o') \\ w_2 = \arcsin(n_e' \sin i_e') \end{cases} \quad (7)$$

取 633nm 波长下冰洲石晶体的折射率 ($n_o = 1.65835$, $n_e = 1.4864$), 将(1)式、(2)式、(4)式、(5)式、(7)式联立, 得到 α, e 两束光分束角与棱镜的结构角的对应关系, 如图 2 曲线所示。曲线 A 和 B 分别表示 α, e 两

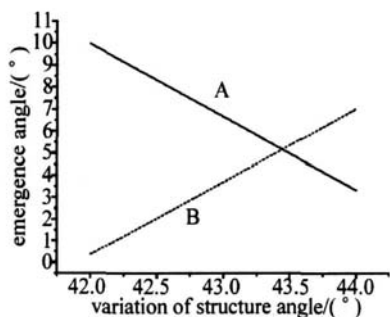


Fig 2 The relationship between emergence angle and structure angle

束光的折射角 w_1, w_2 随结构角的变化关系。从图中可以看出, 当棱镜结构角取为 43.44° 时, α, e 两束光的出射角 $w_1 = w_2 = 5.17^\circ$, 实现了对称分束的目的。

2 分束角不对称度随入射角的变化关系

定义光 o 和 e 光两束光的折射角 w_1, w_2 之间的差值与理论计算得到的等分束角 w 的比值, 称为分束角的不对称度^[7], 用字母 R 表示。用数学公式可表示为:

$$R = \frac{w_1 - w_2}{w} \quad (8)$$

以波长为 633nm 的平面单色自然光垂直入射到棱镜上为前提, 得到了反射型单元结构等分束角偏光棱镜的最佳结构角约为 43.44° , 此时 $R = 0$ 。下面

分析入射光波与棱镜表面法线成一定夹角入射时, 出射角度变化情况。

假设单色自然光以角度 i_{in} 入射到棱镜上, 光在进入晶体后被分成 α, e 两束光, 其折射角分别为 i_o, i_e 。因为 e 光光路的分析要比 o 光光路的分析复杂得多, 所以下面以 e 光为例进行分析。e 光波的传播光路见图 3。在

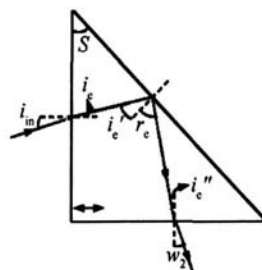


Fig 3 Path of e light

入射截面 A 上, 根据折射定律^[8]有:

$$\sin i_{in} = n_e' \sin i_e \quad (9)$$

式中, n_e' 表示 e 光斜入射晶体后被 B 表面反射前的折射率, 可由(2)式求得 ($\varphi = i_e$)。将(2)式代入(9)式, 并整理得:

$$n_e^2 \sin^2 i_{in} \cot i_e = n_o^2 n_e^2 - n_o^2 \sin i_{in} \quad (10)$$

即:

$$i_e = \arccos \left[\frac{n_o^2 n_e^2 - n_o^2 \sin i_{in}}{n_e^2 \sin^2 i_{in}} \right] \quad (11)$$

在 B 表面上, e 光满足反射定律:

$$n_e' \sin i_e' = n_e'' \sin r_e \quad (12)$$

式中, n_e'' 表示 e 光被 B 表面反射后的折射率^[9], 可由(2)式求得 (其中 $\varphi = 90^\circ - i_e''$), $r_e = S + i_e''$, i_e'' 表示 e 光在出射表面 C 上的入射角。联立(2)式、(12)式, 并整理得:

$$\begin{aligned} (n_o^2 n_e^2 \sin^2 S - n_o^2 n_e'^2 \sin^2 i_e') \tan^2 i_e'' + n_o^2 n_e^2 \sin 2S \tan i_e'' + \\ (n_o^2 n_e^2 \cos^2 S - n_e^2 n_e'^2 \sin^2 i_e') = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

(13) 式是关于 $\tan i_e''$ 的一元二次方程, 解此方程得:

$$i_e'' = \arctan \left[\frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \right] \quad (14)$$

式中, $A = n_o^2 n_e^2 \sin^2 S - n_o^2 n_e'^2 \sin^2 i_e'$, $B = n_o^2 n_e^2 \sin 2S$, $C = n_o^2 n_e^2 \cos^2 S - n_e^2 n_e'^2 \sin^2 i_e'$ 。

e 光在棱镜出射面 C 上的折射角 w_2 可表示为:

$$w_2 = \arcsin(n_e'' \sin i_e'') \quad (15)$$

根据 i_e'' 的物理意义可以判断出, (15) 式只能取正号。

对 o 光而言, $i_o'' = 90^\circ - 2S + i_o$, 所以 o 光在 C 表面的折射角可表示为:

$$w_1 = \arcsin[n_o \sin(90^\circ - 2S + i_o)] \quad (16)$$

图 4 是入射角 i_e 从 $-0.5^\circ \sim 0.5^\circ$ 变化时, 分束角的不对称度随入射角度的变化情况。从图中可以看出:

(1) 入射角在该范围内变化时, 分束角不对称度受到

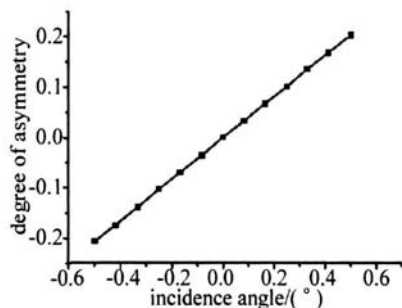


Fig 4 The relationship between incidence angle and splitting angle asymmetric degree

的影响是比较大的, 最大值大约为 22%。故棱镜在使用过程中应尽量调整光束的入射角使其垂直入射; (2) 分束角不对称度曲线的斜率基本上是一个常数, 即光束倾斜入射时, 分束角不对称度绝对值的大小主要由入射角的大小决定, 而与入射角方位关系不大。

3 分束角不对称度随波长的变化关系

当棱镜用于一定波长范围内时, 根据冰洲石晶体材料折射率的色散关系^[10], 并利用 (4) 式、(5) 式、(7) 式可得分束角的不对称度随波长的变化关系 (见图 5)。

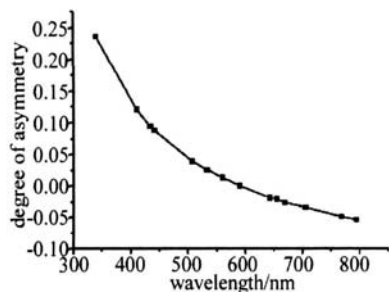


Fig 5 The relationship between wavelength and splitting angle asymmetric degree

从图中可以看到: 当波长在 340nm ~ 795nm 的范围内变化时, 分束角不对称度绝对值的最大值为 23% 左右; 如果只考虑可见光范围, 其绝对值的最大值约为 13%。

图 6 是反射型单元结构对称分束偏光棱镜中 α_e 、 α_o

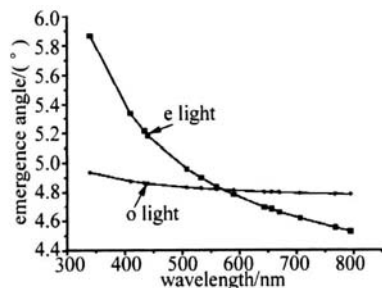


Fig 6 The relationship between emergence angle and wavelength

两光束出射角随波长的变化关系。从图中曲线可以看出: 当波长在 340nm ~ 795nm 范围内变化时, α_o 光出射角的变化范围基本上在 0.1° 以内, 而 α_e 光出射角的变化范围在 1.5° 左右, α_e 光出射角的变化范围要远大于

α_o 光出射角的变化范围。通过比较图 5 和图 6 可以看出分束角不对称度随波长的变化主要是由 α_e 光出射角随波长的变化而引起的。

4 结构角加工误差对分束角不对称度的影响

根据第 1 节中的计算, 可得棱镜分束角不对称度随结构角的变化关系, 如图 7 所示。从图中可以看出,

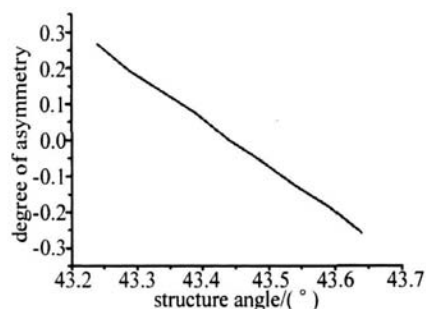


Fig 7 The relationship between degree of asymmetry and machining tolerance

当棱镜的结构角从 43.24° 到 43.64° 间变化时, 分束角不对称度可以达到 25% 左右, 比棱镜分束角不对称度受入射角和入射波长的影响都要大, 因此, 在加工的过程中要特别注意棱镜结构角加工的精度。假设垂直入射到棱镜上的是波长为 633nm 的单色自然光, 若要将棱镜的分束角不对称度控制在 5% 以内, 则结构角的加工精度必须控制在 $2.5'$ 以内, 这一精度在实际加工过程中是完全可以实现的。

5 结 论

通过以上分析可以看出, 只要控制结构角, 单元结构式反射型对称分束角偏光棱镜是可以实现的。此种设计可以通过控制结构角, 并且在垂直入射情况下达到对称分束之目的。虽然其分束角对称性随入射角的偏离无法避免, 但是好在这种偏差并不大, 而且有规律性, 在实际使用中只要严格控制入射光角度, 完全可以达到应用要求。入射光波长对分束角对称性有一定的影响, 通过以上的分析看, 可以利用其非线性变化关系指导设计, 通过适当改变结构角, 使分束角对称性变化关系在整个波段内尽量一致。

参 考 文 献

- [1] ZHAO M Sh, LI G H. Double element birefractant polarization beam-splitting prism [J]. Laser Journal 1992, 13(1): 39-43 (in Chinese).
- [2] ZHAO P, WU F Q. Development of the Wollaston prism antireflection film [J]. Chinese Journal of Lasers 2005, 32(12): 1073-1075 (in Chinese).
- [3] ZHU H F, SONG L K. Cause of "minute fluctuation" on the transmission curve of Taylor polarizing prism [J]. Chinese Journal of Lasers 2004, 31(1): 41-44 (in Chinese).

(下转第 156 页)

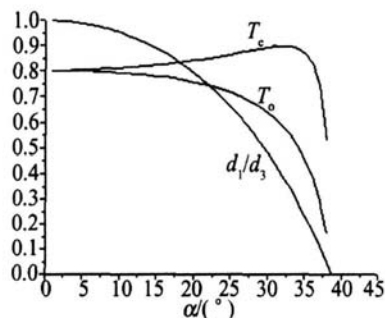


Fig 5 The changes of d_1/d_3 and T with α ($n = 1.6$)

适当的 α 值, 使两束光具有较高的透射比且相差不大, 同时剪切差达到一个理想的值。选取 $d_3/d_1 = 2$ 则 $\alpha = 29.5^\circ$, $T_c = 89\%$, $T_o = 65\%$, $\theta = 52^\circ$, 转角 $A = 45^\circ$, 剪切差可达 2.4mm。此时两束光光强相差不大, 均具有较高透射比。(2) 当设计为单光束输出时, 取 $d_3/d_1 = 3$ $\alpha = 33.2^\circ$, $T_c = 89.3\%$, $T_o = 54.3\%$, $\theta = 52^\circ$, 转角 $A = 56^\circ$, 剪切差可达到 3.6mm。此时, 光路剪切差非常理想。(3) 当 $\alpha = 38.4^\circ$ 时, 转角 $A = 90^\circ$, 此时光的透射比较低, 只有 30% 左右, 但 $d_3/d_1 \approx 45$ 能应用在一些微光探测实验中。

4 误差分析

实验测试的误差主要来自两个方面, 一个是材料的研磨误差, 另一个是组合角度的定标误差^[8-9]。

首先, 对于材料的研磨而言, 现在已经有了很精密的测量技术, 但仍存在一定的误差, 实际测试器件的研磨工艺精度也只能达到 $2'$ 。

其次, 各组合部分在胶合过程中组合角度的定标存在一定的误差, 现在的工艺水平能达到 2% 的误差范围内已经很不错了。而目前折射率的测量水平也只能精确到 0.01。

另外, 在实验过程中存在仪器调节精度和操作的误差因素^[10]。故得到的测量值与理论值有一定的误差。

5 结 论

通过对设计理论的分析 and 设计实例的讨论知道, 此新的设计具有高透射比、剪切差大、制作价格低廉和设计可选择性强的优点。器件在使用时光路会有相应的转向, 这会在一定程度上减小光路搭建的直线长度, 节约实验平台的使用空间。但是, 在各器件的组合固定时应注意明确各角度的值, 其大小均可由上述设计理论得出。就目前的研磨和定标水平而言, 完全可以制造出上述设计理论下的高质量成品, 所以, 此设计是可行的, 在激光偏光领域将会有广泛的使用空间。

参 考 文 献

- [1] LI G H. Optics [M]. Jinan: Educational Press of Shandong, 1991: 404-442 (in Chinese).
- [2] GAO H O, PEI Q K. The design of Glan-Taylor prism [J]. Laser Technology, 1994, 18(3): 185-189 (in Chinese).
- [3] JIN G F, LI J Zh. Study of laser measurement [M]. Beijing: Science Press, 1998: 219-222 (in Chinese).
- [4] LI J Zh. Handbook of optics [M]. Jinan: Science Technology Publishing House of Shandong, 1986: 582 (in Chinese).
- [5] BORN M, WOLF E. Optical principle [M]. Beijing: Science Press, 1978: 61-64 (in Chinese).
- [6] TANG H J, WU G Q, DENG H Y. Transmittance comparison of Glan-Taylor prism and Glan-Foucault prism [J]. Laser Technology, 2006, 30(2): 215-217 (in Chinese).
- [7] LI H, SONG L K, LI G H. Orientation effect on phase retardation of compound binary zero order waveplate [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(12): 1438-1441 (in Chinese).
- [8] WANG N, LI G H. A simple way of determining the phase delay angle of waveplate [J]. Journal of Qufu Normal University (Natural Science Edition), 2001, 27(6): 47-49 (in Chinese).
- [9] ZHENG Ch H, SONG L K. Optimizational design scheme for three-in-one composite achromatic $\lambda/4$ waveplate [J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(6): 662-664 (in Chinese).
- [10] SONG L K, LI G H. Design of the three-element combination achromatic retarder made of mica and quartz [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2000, 11(1): 51-53 (in Chinese).
- [4] BORN M, WOLF E. Principle of optics [M]. Beijing: Science Press, 1978: 58-59 (in Chinese).
- [5] LIAO Y B. Polarization optics [M]. Beijing: Science Press, 2003: 93 (in Chinese).
- [6] SONG Zh, LIU L R. Reflection and transmission of extraordinary beam at uniaxial crystal surfaces [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(12): 1701-1704 (in Chinese).
- [7] WANG W, WU F Q, SU F F. A modified symmetric splitting angle prism [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2003, 14(9): 913-916 (in Chinese).
- [8] LI J Zh. Optics hand book [M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 1986: 500 (in Chinese).
- [9] TANG H J, WU F Q, DENG H Y. Transmittance comparison of Glan-Taylor prism and Glan-Foucault prism [J]. Laser Technology, 2006, 30(2): 215-217 (in Chinese).
- [10] REN Sh F, WU F Q, ZHAO P, et al. Ternary parallel beam splitter combined of ice and glass [J]. Laser Technology, 2006, 30(3): 311-312 (in Chinese).

(上接第 153 页)