

## 格兰-泰勒棱镜消光比分析

李春艳<sup>1,2</sup>, 吴易明<sup>1</sup>, 高立民<sup>1</sup>, 陆卫国<sup>1,2</sup>, 王卫峰<sup>1</sup>

- (1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 利用折射定律和菲涅耳公式, 采用光线追迹的方法, 推导了格兰-泰勒棱镜的透过率与发散光束入射的方位角、入射角及棱镜结构角之间的计算公式, 并指出与棱镜消光比的关系。通过 Matlab 仿真, 分析了全方位角范围内, 棱镜的消光比特性以及消光比随入射角和结构角的变化关系。仿真结果发现, 在垂直棱镜光轴的方位上, 消光比不受入射角大小的影响, 且消光比随棱镜结构角的增大而变差。理论计算结果与实际系统出现的问题相符, 验证了理论公式的正确性, 解释了工程项目出现的问题, 对格兰-泰勒棱镜的设计与应用具有一定的指导意义。

**关键词:** 格兰-泰勒棱镜; 消光比; 透过率; 方位角

**中图分类号:** O436.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)01-0173-05

## Analysis of extinction ratio of a Glan-Taylor prism

Li Chunyan<sup>1,2</sup>, Wu Yiming<sup>1</sup>, Gao Limin<sup>1</sup>, Lu Weiguo<sup>1,2</sup>, Wang Weifeng<sup>1</sup>

- (1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The calculation formula of Glan-Taylor prism's transmittance between emanative lights' azimuth, incident angle and structure angle of prism was obtained by using refraction law and Fresnel formula as well as the ray-tracing method. The relationship between the extinction ratio and transmittance was indicated. By computer simulation of Matlab, the characteristic of extinction ratio in the whole azimuth was analyzed; the extinction ratio's transformation relationship along with incident angle and structure angle was investigated. From simulation results, we discover that the extinction ratio is unacted on the incident angle when the angle is in the vertical azimuth of prism's optical axis. And the ratio becomes bad with increasing of the structure angle. The theoretical results are in good agreement with problems appeared from practical system which verifies its correctness, and it explains the problem in project item. The work of this article has great guiding significance in the design and use of Glan-Taylor prism.

**Key words:** Glan-Taylor prism; extinction ratio; transmittance; azimuth angle

收稿日期: 2013-05-10; 修订日期: 2013-06-13

基金项目: 国防基金资助项目(JPPT-115-3-1360)

作者简介: 李春艳(1987-), 女, 博士生, 主要从事光学设计方面的工作。Email: yanerly@163.com

导师简介: 吴易明(1975-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事光电精密测量方面的工作。Email: wym34@opt.ac.cn

## 0 引言

随着激光技术和偏光应用技术的发展,棱镜型偏光器件得到了广泛应用,逐渐成为现代光学技术,如激光调制、光纤传输、偏光信息处理及偏光导航等领域不可或缺的光学元件,采用棱镜偏光镜是当前获取偏振光和改变偏振态最主要的手段。其中格兰-泰勒棱镜是偏光技术中的重要器件,广泛应用于精密测量仪器。这种棱镜采用冰洲石晶体设计而成,由于冰洲石晶体的光学性能好、光谱透射范围广、双折射率大,且棱镜采用空气隙胶合,可使消光比优于  $10^{-5}$ ,抗光损伤阈值高,使用光谱范围宽(280~2 800 nm)<sup>[1]</sup>。吴易明、董晓娜等人<sup>[2-3]</sup>提出采用调制偏振光用于远距离空间方位精密角度测量的原理,并介绍了具体实现方案,由于在实际应用中,作用距离较远,要求偏振信号光具有一定的覆盖范围,即光束有一定的发散角呈锥形出射,且要在整个棱镜出光面范围内实现精密角度测量。实际系统实验中发现,在出光面范围内平移信号接收系统时,系统测量结果的离散度分布有明显的规律性,在出射面中心沿与检偏器光轴垂直方向平移得到的测量结果离散度明显优于沿光轴方向。消光比是表征棱镜偏光镜光学特性的重要参数,棱镜消光比的好坏直接影响信号的信噪比,从而影响系统测量结果的离散度。随着偏光器件越来越多地被用于各种精密光学系统中,对消光比的要求也越来越高,所以研究棱镜偏光镜消光比的性能影响因素是使用者、制造者以及光学设计者最关心的问题。国内吴福全、朱化凤等人<sup>[4-9]</sup>对格兰-泰勒棱镜透射光强分布的研究在一定程度上说明了棱镜的消光比特性,但以上均是在偏振光正入射或在垂直或平行于棱镜光轴的平面内有一定小角度入射的情况下分析测量的,由于光束经过起偏之后是发散出射的,可知入射面与棱镜光轴主截面存在一定的方位夹角,因此有必要分析研究棱镜在整个光线入射方位角范围内的消光比特性。

文中通过采用光线追迹的方法,推导了光束非正入射时格兰-泰勒棱镜消光比的精确计算公式,运用 Matlab 软件对影响消光比的入射角、光线的方位角、棱镜结构角等因素进行了详细的分析,理论计算的数据与实验结果相符合,验证了理论计算的正确

性,解释了工程项目中存在的实际问题,该研究对偏光棱镜的应用具有重要的指导意义。

## 1 格兰-泰勒棱镜中的光路分析

消光比是指平面偏振光通过待测棱镜的最小和最大能量的比值。格兰-泰勒棱镜由两块直角形冰洲石晶体组成,两切割面间隔有等厚的空气隙,两块冰洲石晶体的光轴如图 1 中双箭头所示,光线入射到格兰-泰勒棱镜上,只有  $e$  光通过,因此只讨论  $e$  光在棱镜中的传播规律。如图 1 所示,选取坐标系  $y$  轴为主光束传播方向, $z$  轴沿晶体光轴方向,由几何光学原理可知, $y$  轴即为第一个入射面的法线方向,设  $i$  为入射光线与  $y$  轴的夹角即入射角, $\alpha$  为入射光线相对棱镜光轴的方位角,即光线在  $xoz$  面上的投影与  $z$  轴的夹角,在此坐标系下可知  $0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$ ;设  $\theta$  为  $e$  光波矢与  $z$  轴即光轴的夹角,光束与  $x$  轴的夹角  $j$  由公式  $\cos^2 i + \cos^2 \theta + \cos^2 j = 1$  决定,由图 1 可知,发散光束以入射角  $i$ 、方位角  $\alpha$  入射至棱镜表面时,由于坐标原点选在棱镜表面中心,则光束和棱镜关于  $yo z$  面对称,因此知道  $xoz$  右半平面的特性,即  $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$  即可推得整个方位角  $0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$  及平面的性能特征。

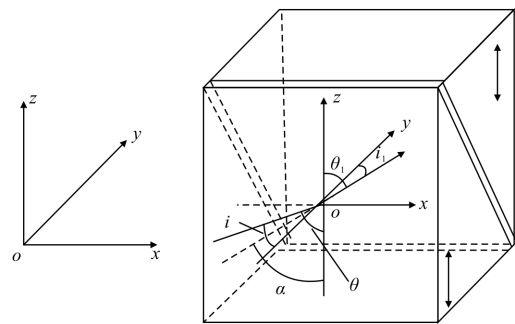


图 1 光线在格兰-泰勒棱镜中的传播

Fig.1 Optical path of Glan-Taylor prism

由菲涅耳原理得出:

$$\sin i = n_e(\theta_1) \sin i_1 \quad (1)$$

式中: $i_1$  为折射光线与  $y$  轴即法线的夹角; $\theta_1$  为折射光线与  $z$  轴即光轴的夹角; $n_e(\theta_1)$  为  $e$  光波折射率,

$$n_e(\theta_1) = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \sin^2 \theta_1 + n_e^2 \cos^2 \theta_1}} \quad (2)$$

由几何原理推导可得:

$$\frac{\cos\theta}{\cos(90^\circ-i)} = \frac{\cos\theta_1}{\cos(90^\circ-i_1)} = \cos\alpha \quad (3)$$

结合公式(1)、(2)、(3)得:

$$\theta_1 = \arctan \sqrt{\left(\frac{n_e}{\cos\theta}\right)^2 - \left(\frac{n_e}{n_o}\right)^2} \quad (4)$$

进而求出  $e$  光波折射率  $n_e(\theta_1)$ , 得出:

$$i_1 = \arcsin\left(\frac{\sin i}{n_e(\theta_1)}\right) \quad (5)$$

则经过第一个折射面  $e$  光的透过率  $T_1$  为:

$$T_1 = \frac{\sin(2i)\sin(2i_1)}{\sin^2(i+i_1)\cos^2(i-i_1)} \quad (6)$$

光束经过第二个折射面时, 由于入射面法线发生旋转, 如图 2 所示, 坐标系  $o-xyz$  绕  $x$  轴旋转  $S$  角成为  $o'-x'y'z'$ ,  $S$  为棱镜的结构角, 图 2 中,  $i_2, i_3, i_4, i_5, i_6, i_7$  分别为各折射面上的入射角和折射角。

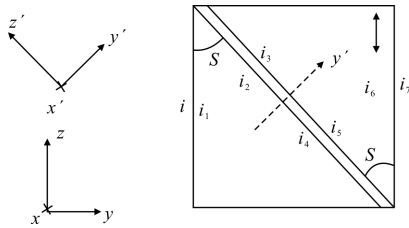


图 2 透射光路中的各个入射角和折射角

Fig.2 Incident and refraction angle in transmission beam

如图 3 所示, 光线入射至第二折射面时, 与  $y$  轴夹角为  $i_1$ , 与  $y'$  夹角为  $i_2$ , 与  $z$  轴夹角仍为  $\theta_1$ , 根据几何定理得出:

$$\begin{cases} \cos i_2 = \cos S \cos i_1 - \sin S \cos \alpha_1' \sqrt{1 - \cos^2 i_1} = \\ \cos S \cos i_1 - \sin S \cos \alpha_1' \sin i_1 = \\ \cos S \cos i_1 - \sin S \cos \theta_1 \\ n_e(\theta_1) \sin i_2 = \sin i_3 \end{cases} \quad (7)$$

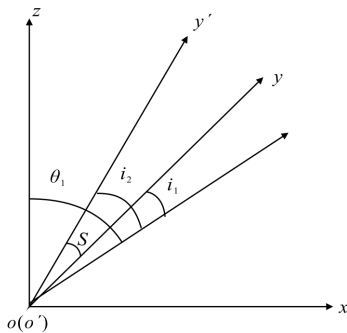


图 3 各角度关系

Fig.3 Relationship of angles

其中  $\alpha_1'$  为光线在  $xoz$  面上投影与  $z$  轴的夹角, 则在第二个折射面上  $e$  光的透过率  $T_2$  为:

$$T_2 = \frac{\sin(2i_2)\sin(2i_3)}{\sin^2(i_2+i_3)\cos^2(i_2-i_3)} \quad (8)$$

图 2 中, 两块直角棱镜切割面中间为等厚空气隙, 则两折射面平行, 因此

$$\begin{cases} i_3 = i_4 \\ \sin i_4 = n_e(\theta_2) \sin i_5 \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $i_3, i_4, i_5$  均为与  $y'$  轴的夹角;  $\theta_2$  为通过第三个折射面后光波与晶体光轴即  $z$  轴方向的夹角, 由于第二与第三折射面平行, 则

$$\begin{cases} \theta_2 = \theta_1 \\ i_5 = i_2 \end{cases} \quad (10)$$

由公式(9)、(10)可得透过率

$$T_3 = T_2 \quad (11)$$

$i_5$  为与  $y'$  轴的夹角, 光束传播至第四个出射面时, 入射角为  $i_6$ , 此时法线沿  $y$  轴.  $e$  光折射率为  $n_e(\theta_2) = n_e(\theta_1)$ , 由于第四折射面与第一折射面平行, 且使用同一个坐标系, 经过推算得:

$$\begin{cases} i_6 = i_1, i_7 = i \\ T_4 = T_1 \end{cases} \quad (12)$$

由公式(6)、(8)、(11)、(12)得总的透过率为:

$$T = T_1 T_2 T_3 T_4 \quad (13)$$

棱镜消光比计算公式为:

$$\rho = \frac{I_{\min}}{I_{\max}} \quad (14)$$

式中:  $I_{\min}$  为透射光强的极小值;  $I_{\max}$  为透射光强的极大值. 根据消光比的定义及偏光棱镜的工作原理可知, 在主消光方向可获得  $I_{\min}$ , 此时平面偏振光相对格兰-泰勒棱镜为  $o$  光, 在到达空气隙的界面处发生全反射, 理想情况下透过率为 0, 实际上由于各方面因素的影响, 主消光方向的透过率  $T_{\min}$  一般在  $10^{-6}$  左右, 而在垂直方向即主透射方向, 入射光相对棱镜为  $e$  光, 并按以上推导公式传播, 折射率与  $e$  光波矢和光轴的夹角有关, 根据(13)式可得出最大透过率, 进而得出消光比为:

$$\rho = \frac{T_{\min}}{T_{\max}} \quad (15)$$

## 2 入射光束的方位角 $\alpha$ 对消光比的影响

$e$  光波的折射率随其传播波矢和晶体光轴的夹角  $\theta$  变化, 当方位夹角  $\alpha$  改变时, 则  $\theta$  发生变化,  $e$  光波的传播路径也将发生变化, 进而影响其折射角和入射角, 透过率  $T$  也随  $\alpha$  改变, 由公式(13)、(15)可得出消光比  $\rho$  随  $\alpha$  的变化曲线如图 4 所示, 此时, 设入射角  $i=3^\circ$ ,  $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ , 结构角  $S$  设为  $38.75^\circ$ 。

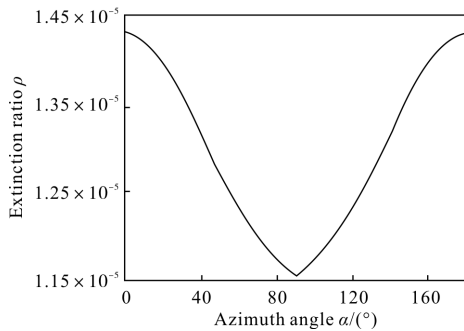


图 4 消光比  $\rho$  随方位角  $\alpha$  的变化关系

Fig.4 Relationship between extinction ratio  $\rho$  and azimuth angle  $\alpha$

由上图可以看出, 在  $\alpha=90^\circ$  时可获得最优消光比, 当  $\alpha$  偏离  $90^\circ$  时, 消光比均呈上升趋势, 由于选取坐标系时, 光束和棱镜关于  $yo$ z 面对称, 由以上仿真结果可推得  $180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$  时, 消光比曲线和图 4 相同, 同理推得  $\alpha=270^\circ$  时, 消光比最优, 偏离此位置, 消光比均变差。

## 3 入射角 $i$ 对消光比的影响

由于线偏振光经过起偏器后按一定角度发散传播, 与  $y$  轴夹角为发散角  $i$ , 由图 4 可知, 在  $\alpha$  为  $90^\circ$  时, 获得最优消光比, 因此设  $\alpha$  为  $90^\circ$ , 棱镜结构角  $S$  为  $38.75^\circ$ , 根据公式(13)、(15), 进行 Matlab 仿真得出消光比  $\rho$  随入射角  $i$  的变化曲线如图 5 所示。

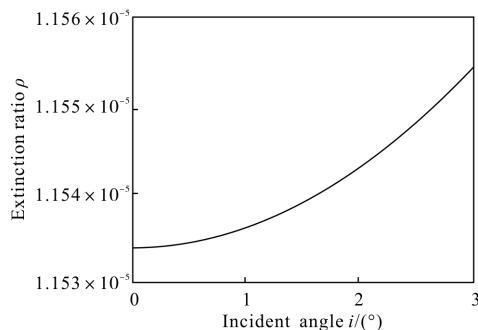


图 5 消光比  $\rho$  随入射角  $i$  的变化关系

Fig.5 Relationship between extinction ratio  $\rho$  and incident angle  $i$

由图 5 可知, 格兰-泰勒棱镜消光比受入射角  $i$  的影响较大, 并随  $i$  的增大曲线上升, 在发散角  $i$  较小时, 才能获得理想消光比。

## 4 结构角 $S$ 对消光比的影响

棱镜的结构角是指入射端面或出射端面与切割面的夹角。以上分析时选定结构角  $S=38.75^\circ$ , 由于实际加工过程中难以保证能够确切的达到  $38.75^\circ$ , 且在具体使用时, 一般要求棱镜具有一定的视场角, 且越大越好, 这样就要求棱镜结构角增大, 而要考虑到棱镜作为起偏镜时入射角要受到  $e$  光的全反射角 (对  $633 \text{ nm}$  为  $42.23^\circ$ ) 的限制,  $S$  应小于  $42.23^\circ$ , 因此加工时棱镜结构角会随实际需要而改变。为此考虑  $S$  在一定范围内格兰-泰勒棱镜消光比与结构角的关系, 设入射角  $i=0^\circ$ , 光束波矢与晶体光轴的方位夹角  $\theta=90^\circ$ , 由公式(13)、(15)得出棱镜消光比与结构角  $S$  的关系曲线如图 6 所示。

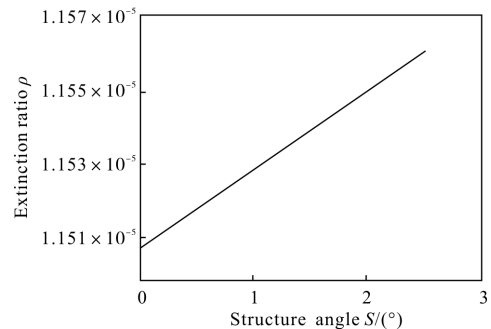


图 6 消光比  $\rho$  随结构角  $S$  的变化关系

Fig.6 Relationship between extinction ratio  $\rho$  and structure angle  $S$

通过分析图 6 的曲线特性, 可知格兰-泰勒棱镜的消光比随结构角的增大而变差, 要想获得最优消光比, 应缩小棱镜的结构角  $S$ , 考虑到格兰-泰勒棱镜作为起偏镜时入射角要受到  $o$  光的全反射角 (对  $633 \text{ nm}$  为  $37.16^\circ$ ) 的限制, 因此  $S$  应大于  $37.16^\circ$ 。

## 5 全孔径角范围内棱镜消光比的变化

由于光束是以一定发散角入射至格兰-泰勒棱镜, 因此在研究棱镜消光比时, 应考虑全视场角范围, 选定光束入射至格兰-泰勒棱镜时与  $y$  轴夹角为  $0^\circ \leq i \leq 3^\circ$ , 与  $z$  轴的夹角  $\alpha$  为  $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ , 结构角  $S=38.75^\circ$ , 通过公式(13)、(15)可得出消光比随入射角

$i$ 、 $\alpha$  的变化曲线, 如图 7 所示。

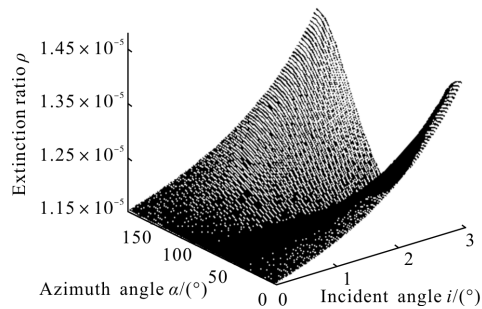


图 7 消光比  $\rho$  随方位角  $\alpha$ 、入射角  $i$  的变化关系

Fig.7 Change of extinction ratio  $\rho$  with azimuth  $\alpha$  and incident angle  $i$

通过分析图 7 可知, 在全发散角范围内,  $i$  较小时, 对棱镜消光比影响较小, 随着入射角  $i$  的增大, 棱镜的消光比随之变差, 且随着入射光束与  $z$  轴的方位夹角  $\alpha$  的增大, 消光比将偏离理想特性, 而在  $\alpha=90^\circ$  时, 消光比不随入射角  $i$  变化而保持恒定, 即在垂直  $z$  轴即光轴方向入射时, 消光比是稳定的。

通过以上分析, 可以知道格兰-泰勒棱镜的消光比与入射光的入射角、方位角、棱镜的结构角等参数有关, 并且在整个  $0^\circ\sim 360^\circ$  方位角范围内时, 具有周期性, 且消光比在两个特殊位置  $\alpha=90^\circ$ 、 $270^\circ$  时最优并保持恒定。可知理论计算结果与引言中提到的实际系统出现的问题相符, 二者的结果一致, 即在光束与棱镜光轴垂直的方向上, 消光比不受光束发散角的影响, 验证了理论分析的正确性。

## 6 结论

文中分析了发散光束入射至格兰-泰勒棱镜情况下棱镜消光比与全方位角的关系, 这是传统测量消光比特性所未考虑到的问题, 进一步分析了棱镜结构角所带来的影响, 通过比较仿真结果与实际系统出现的问题, 发现二者结果一致, 验证了理论分析的正确性, 并合理解释了实际系统存在的问题。随着

偏光器件在国防和民用领域应用的越来越广泛, 对其消光比的要求越来越高, 文中的工作对偏光棱镜的设计和具有重要的指导意义。

## 参考文献:

- [1] Li Hongxia, Wu Fuquan, Fan Jiyang, et al. The rotary vibration influence on the transmitted light intensity's perturbation of the Glan-Taylor prism [J]. *Journal of Qufu Normal University*, 2003, 29(2): 59-62. (in Chinese)
- [2] Wu Yiming, Gao Limin, Chen Liangyi. Precision measurement and transmission of azimuthal information based on polarization modulated light [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 525-529. (in Chinese)
- [3] Dong Xiaona, Gao Limin, Shen Xiaojun, et al. Passing azimuth vertically with the technique of magneto optic modulation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(11): 1389-1391. (in Chinese)  
董晓娜, 高立民, 申小军, 等. 利用磁光调制实现方位角垂直传递[J]. *光子学报*, 2001, 30(11): 1389-1391.
- [4] Ren Shufeng, Wu Fuquan, Zhao Pei. Analysis of effects of disalignmeng of the optical axis of crystal on the performance of Glan-Taylor prism [J]. *Journal of Qufu Normal University*, 2005, 31(1): 55-57. (in Chinese)
- [5] Zhu Huafeng, Song Lianke, Peng Handong, et al. Distribution of Transmitted Light of a Glan-Taylor Prism [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(12): 1881-1884. (in Chinese)
- [6] Zhao Tingsheng, Li Guohua, Peng Handong, et al. A novel design for Glan-Taylor prism without interference effect[J]. *Optoelectronics Letters*, 2007, 3(5): 0372-0375.
- [7] Tang Hengjing, Wu Fuquan, Deng Hongyan. Transmittance comparison of Glan-Taylor prism and Glan-Foucault prism [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(2): 215-217. (in Chinese)
- [8] Liao Yanbiao. *Polarization Optics*[M]. Beijing: Science Press, 2003: 71-99. (in Chinese)
- [9] Shi Shunxiang, Wang Xue'en, Liu Jinsong. *Physical Optics and Application Optics* [M]. Xi'an: Xidian University Housing Press, 2008: 26-40, 216-251. (in Chinese)