

doi:10.3788/gzxb20144312.1223001

偏振棱镜消光比参量精密测量方法

郝冲^{1,2}, 吴易明¹, 陆卫国¹, 肖茂森¹, 李春艳^{1,2}

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:为解决偏振棱镜消光比参量传统检测方法中,由于光线的非垂直入射和消光位置定位误差等因素的影响,导致不能精确测量的问题,以格兰-泰勒棱镜为例,通过对偏振光进行磁光调制以精确确定待测棱镜消光位置,并在消光位置附近多次小角度转动待测棱镜,以减小光线的非垂直入射对出射光强产生的非线性微扰。仿真和实验验证表明,该方法可以准确地得到消光光强与平行光强,得出消光比参量,满足测量准确度要求。

关键词:偏振光;偏振棱镜;磁光调制;消光比;间接调制

中图分类号:TH741.2;O436.3

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)12-1223001-5

The Research on Measuring the Extinction Ratio of Polarizing Prism Accurately

HAO Chong^{1,2}, WU Yi-ming¹, LU Wei-guo¹, XIAO Mao-sen¹, LI Chun-yan^{1,2}

(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 100039, China)

Abstract: In traditional method of testing the extinction rate of polarizing prism, as the incidence is not vertical and the position of extinction can't be located accurately, extinction ratio can be measured accurately neither. To solve this problem, taking Glan-Taylor prism for example, magneto-optic modulation was adopted to define the extinction place accurately, rotating the prism several times to decrease the nonlinear perturbation caused by oblique incidence. Simulation and experiment show that, the minimum and maximum light intensity can be gained, the extinction rate was also obtained and fulfilled the precision requirement.

Key words: Polarized light; Polarizing prism; Magneto-optic modulation; Extinction rate; Indirect modulation

OCIS Codes: 230.5440;230.5480;230.3810;350.4600

0 引言

在现代光学应用领域,偏光棱镜由于具有优良的光学性能,得到了广泛的应用。空气隙格兰型偏光棱镜以其高抗光损伤阈值、高消光比(优于 10^{-5})、高光强透射比和小光束偏移角(小于 $3'$)等优点在光通讯技术、信息处理技术和激光技术^[1]中有很广泛的应用。特别是消光比较大的格兰-泰勒棱镜(Glan-Taylor),它由晶体光轴相互平行的两块冰洲石直角棱镜组成,透射偏

振光保持与原入射光方向一致^[1-7]。

消光比是偏振棱镜非常重要的指标之一。在实际应用中,消光比参量越差,光强噪声对信号检测的影响越大,对系统性能劣化的影响也越严重,因而在使用之前有必要对偏振棱镜的消光比参量进行检测。已报道的测量方法有直接测量法、偏振干涉法^[2]等。传统的测量方法是通过直接测量最大和最小光强之比来求出消光比,但需要使用衰减器和频繁的调节光路,容易引起较大误差;偏振干涉法光路较为复杂,需要多次旋转

基金项目:陕西省科技计划基金项目(No. 2011kjxx27)资助

第一作者:郝冲(1989-),男,硕士研究生,主要研究方向为偏振光应用与检测。Email:haochong1223@126.com

导师(通讯作者):吴易明(1975-),男,研究员,博导,主要研究方向为光电精密测量。Email:wym34@opt.ac.cn

收稿日期:2014-03-17;录用日期:2014-07-24

<http://www.photon.ac.cn>

待测棱镜,测量结果易受人为因素影响.针对现有的消光比测量方法的缺点,本文提出了一种基于磁光调制与光源调制实现偏振棱镜消光比参量高准确度测量的新方法.该方法具有实现简单且较容易达到高准确度测量的特点.由于光线非垂直入射待测偏振棱镜引起出射光强的非线性扰动与消光位置的定位误差会对消光比参量的测量带来较大的影响.所以本文对两者进行了分析,并提出了改进方法,测量准确度可达到 10^{-6} .

1 消光比检测准确度影响因素分析

偏振棱镜的消光比定义为

$$\rho = T_2 / T_1 \quad (1)$$

式中, T_1 、 T_2 分别是待测偏振棱镜的透振方向与入射线偏振光的振动方向平行、垂直时的光强透射比,两者称为待测偏振棱镜的主透射比,且 $T_1 \gg T_2$. 通过旋转待测偏振棱镜到上述两个特定位置,得到 T_1 、 T_2 , 测试原理如图 1.

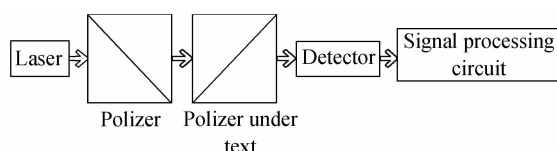


图 1 消光比测试仪原理

Fig. 1 Figure of extinction rate tester principle

当旋转待测偏振棱镜到消光位置,可以得到透射光强 I_2 , $T_2 = I_2 / I_0$; 再次旋转待测偏振棱镜到约 90° 时可以得到 I_1 , $T_1 = I_1 / I_0$. 此时

$$\rho = I_2 / I_1 \quad (2)$$

从待测偏振棱镜出射的光强与入射光强满足马吕斯定律: $I = I_0 \cos^2 \alpha$, I 为待测偏振棱镜的出射光强, I_0 为入射待测偏振棱镜的光强, α 为起偏器晶体光轴与待测偏振棱镜晶体光轴的夹角. 但是直接测量时,在接收器接收到的出射光强,会受到多因素的影响,如入射界面上入射角的非垂直入射,会引起待测偏振棱镜出射光强的非线性扰动及 I_1 , I_2 两个状态的定位误差均会引起消光比参量的测量误差.

1.1 光线非垂直入射引起的透射光强的非线性波动

格兰-泰勒棱镜的基本结构及与入射角的位置关系^[3-4,8]如图 2. n_1 、 n_2 分别为入射端面和切割斜面的法线,面 M 为 n_1 、 n_2 确定的棱镜横截面, φ' 为入射面沿顺时针旋转到 M 面的角度, i_0 、 i_1 为空气与棱镜界面处的入射角与折射角,且 i_0 在棱镜的半视场角范围内,有 $n \sin i_0 = n' \sin i_1$, n 为空气折射率, n' 为棱镜折射率. 在棱镜半视场角范围内,光束入射端和出射端光能反射比近似按照正入射来计. 根据文献[6],棱镜入射端面和出射端面光强透射率为 $T_e = 4n_e / (1 + n_e)^2$, $n_e = 1.48475$, 根据几何关系,可得棱镜切割斜面上的入射角 i 满足关系式

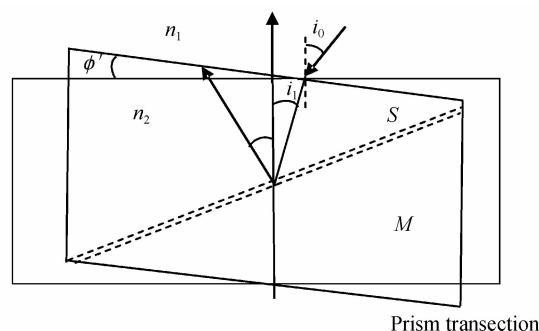


图 2 入射光与偏振棱镜的位置关系

Fig. 2 Positional relation between incident light and polarizing prism

$$i = s + \arctan(\tan i_1 \cdot \cos \varphi') \quad (3)$$

式中 S 为格兰-泰勒棱镜的结构角,一般为 38.75° . 由于在格兰-泰勒棱镜空气隙处的多光束等倾干涉^[3,7-8], 棱镜切割斜面上的光强透射系数 T_d 为

$$T_d = \frac{1}{1 + F \cdot \sin^2(\varphi/2)} \quad (4)$$

式中 $F = 4R / (1 - R)^2$, R 为 e 光在晶体 - 空气界面的光强反射比, $\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} nh \cos i$ 为厚度 h (一般为 $20 \mu\text{m}$) 的空气层出射的每相邻两束透射光之间的相位差. 所以棱镜的光强透射比^[7]为

$$T = T_e^2 \cdot T_d = T(i_0, \varphi') \quad (5)$$

最终光电接收器测得的透射光强为

$$I = I_0 \cdot T(i_0, \varphi') \cdot \cos^2 \alpha \quad (6)$$

消光比 ρ 为在 φ' 为 90° 时的透射光强 I_2 与 φ' 为 0° 时的透射光强 I_1 的比值,即得到消光比与入射角 i_0 的函数关系为

$$\rho = \frac{I_2}{I_1} = \frac{I_0 \cdot \cos^2(90^\circ + \delta\alpha) \cdot T(\varphi' = 90^\circ)}{I_0 \cdot \cos^2(0^\circ + \delta\alpha) \cdot T(\varphi' = 0^\circ)} = \rho(i_0) \quad (7)$$

图 3 是透射光强 I 与 i_0 、 φ' 的关系曲线. 图 4 是消光比 ρ 与入射角 i_0 的关系曲线. 由图 3 可以看出,在棱镜视场范围内,当 $i_0 \neq 0$ 时,透射光强曲线 2 个波峰出现了不等高现象. 而随着 i_0 的增大,当待测棱镜旋转一周时,棱镜透射光强曲线 2 个波峰的相对差值也逐渐增大,即非线性扰动越严重. 如图 4 所示,当入射角 $i_0 =$

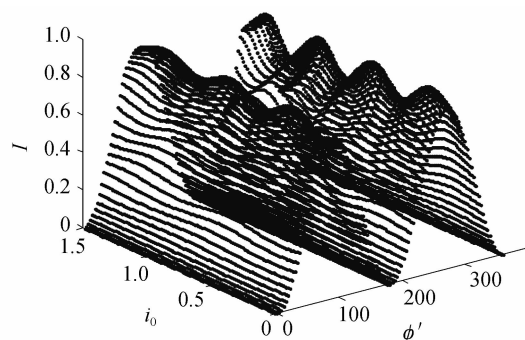


图 3 透射光强 I 与 i_0 、 φ' 的关系曲线

Fig. 3 Relation curve between the transmitted intensity and i_0 、 φ'

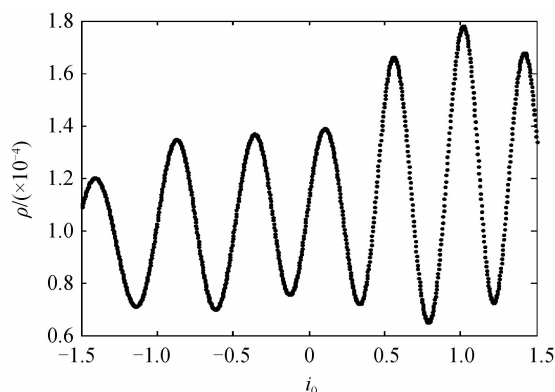


图4 消光比 ρ 与入射角 i_0 的关系曲线

Fig. 4 Relation curve between the extinction rate ρ and the incident angle i_0

当 $-1.5^\circ \sim 1.5^\circ$ 时,消光比 ρ 的数值变化曲线,可以看出,消光比参量 ρ 随着入射角的变化呈现明显的非线性扰动,且所得到的参量 ρ 的量级为 10^{-4} ,是达不到准确度要求的。

1.2 消光位置定位误差引起的测量误差

根据马吕斯定律,当存在定位误差 δ_α 时,消光比的检测误差为

$$\frac{\delta I}{I_0} = -2\cos \alpha \cdot \sin \alpha \cdot \delta_\alpha \quad (8)$$

假设待测偏振棱镜的消光比准确度为 10^{-7} 量级,当 $\delta_\alpha = 0.5^\circ$ 时,对消光比检测带来的误差约为 1.52×10^{-4} 。消光比检测误差与定位误差的关系如图 5。

由图 5 可知,当定位误差 $0 < \delta_\alpha < 0.5^\circ$ 时,消光比的检测误差在 10^{-5} 的量级上,无法满足检测准确度要求。所以,实现高准确度的消光比参量测量,定位误差必须要足够小。经过理论计算,当定位误差达到 $5'$ 时,检测误差可以达到 10^{-6} 量级,满足准确度要求。

综上所述,由于光线的非垂直入射及消光位置的

定位误差对透射光强的影响较大,导致不能精确得到偏振棱镜的消光比参量,所以必须针对上述两点进行改进。

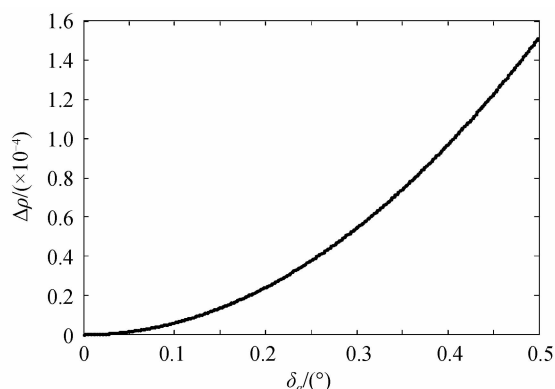


图5 消光比的检测误差与定位误差 δ_α 的关系曲线

Fig. 5 Relation curve between detection error $\delta I/I$ and location error δ_α

2 精确测量解决方案

由分析可知,为实现高准确度的消光比参量测量,可以采用磁光调制^[11-12]方案实现高准确度消光位置定位并采用小角度旋转待测偏振棱镜减弱非垂直入射引起的非线性扰动。

2.1 待测偏振棱镜的高准确度定位

原理图如图 6,起偏器晶体光轴与 X 轴平行,光束经过准直后沿 Z 轴依次通过起偏器和磁光玻璃,得到经过调制的线偏振光,垂直入射待测偏振棱镜,待测偏振棱镜晶体光轴与 Y 轴的夹角为 β 。将待测偏振棱镜晶体光轴分别转至与起偏器晶体光轴垂直和平行时,光电接收器完成两个状态的光强检测,最终求出待测偏振棱镜的消光比 ρ 。

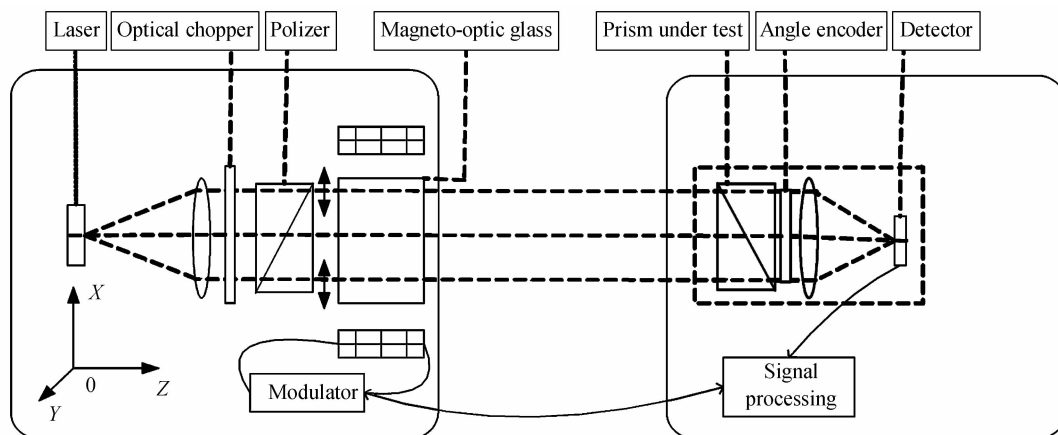


图6 消光比检测原理图

Fig. 6 Figure of the detection principle of the extinction rate

对磁光玻璃进行正弦调制,令

$$\theta = VLB_m \sin \omega t$$

定义 $m_t = 2VLB_m$ 为调制度, ω 为调制频率, V 是维尔德常量, L 是旋光玻璃的有效长度, B_m 是穿过磁光玻璃的磁感应强度的幅值。

将式(9)代入马吕斯公式,得到接收到的光强为

$$I(\alpha, \theta) = I_0 \cos^2(\alpha + \theta) = \frac{I_0}{2} [1 + \cos 2\alpha \cdot \cos(m_i \sin \omega t) - \sin 2\alpha \cdot \sin(m_f \sin \omega t)] \quad (10)$$

将 $\alpha = 90^\circ + \beta$ 带入式(10),进行第一类贝塞尔函数展开,并忽略二阶以上的贝塞尔函数,得

$$I(\alpha, \theta) = \frac{I_0}{2} \{1 - \cos 2\beta \cdot J_0(m_i) + 2J_1(m_i) \cdot \sin 2\beta \cdot \sin(\omega t) - 2J_2(m_i) \cdot \cos 2\beta \cdot \cos(2\omega t)\} \quad (11)$$

为消除直流分量的影响,对式(11)进行隔直.令 $U = I_0 J_1(m_i) \cdot \sin(2\beta)$, $V = I_0 J_2(m_i) \cdot \cos(2\beta)$ 则

$$I = U \sin(\omega t) - V \cos(2\omega t) \quad (12)$$

对式(12)求极值点:令 $\frac{dI}{d\omega t} = 0$,解得极值点为

$$2n\pi + \frac{\pi}{2}, (2n+1)\pi - \arcsin\left(\frac{U}{4V}\right), 2n\pi + \frac{3\pi}{2},$$

$$(2n+1)\pi + \arcsin\left(\frac{U}{4V}\right), n=0, \pm 1, \pm 2, \dots; \text{对应的幅值分别记为: } I_1, I_2, I_3, I_4.$$

可知只有极值点 I_1, I_3 的位置不随 β 角而变化(ωt 不随 U 或 V 变化). 则

$$T = \frac{I_1 - I_3}{I_1 + I_3} = \frac{J_1(m_i)}{J_2(m_i)} \tan 2\beta \quad (13)$$

由式(13)可知,结果与光强信号 I_0 无关,即消除了光强波动对测量结果的影响.设阈值为 T_0 , T_0 是一个很小的量值.当 $T \leq T_0$ 时,可认为此时 $\beta = 0$ 或 $\beta = 90^\circ$,从而得到消光态位置与平行态位置,目前采用磁光调制技术已经可以实现优于 $10''$ 的定位水平^[13].此时定位误差带来的消光比参量测量误差基本可以忽略不计.

由于系统噪音的存在,使得很难对光强大小进行高精度检测,为最大限度地消除噪音,需对光信号光进行强度调制,本文采用光学斩波器来对光强信号进行间接调制,斩波器位置如图6.

当待测偏振棱镜晶体光轴与起偏器晶体光轴平行时,检测通过待测偏振棱镜的光强 I_1 ,此时一般 $I_1/I_2 \geq 10^5$,由于采用硅光电二极管直接检测,会造成测量光强 I_1 超出光电二极管的线性区域,引起大的测量误差甚至会对光电器件造成损坏.此时最简便的方法是在测量 I_1 时添加提前标定过的衰减组件,使光强衰减到光电二极管的线性区域.但这种方法增加了仪器的复杂程度,且衰减组件的标定显然也是存在误差的.为保护硅光电二极管,并消除非垂直入射对测量准确度的影响,拟采用下述方法解决.

2.2 减弱透射光强的非线性扰动对测量准确度的影响

由于待测棱镜出射光强满足马吕斯定律,设在消光位置测得的光强为 I_2 ,平行位置的光强为 I_1 .根据马

吕斯公式,得出射光强

$$I = I_1 \cos^2 \alpha + I_2 \quad (14)$$

经过磁光调制后,可以很容易地测得光强 I_2 .微转待测偏振棱镜一个小角度 α (该值可以由与待测偏振棱镜相连的角度编码器的得出),则通过检测此时的出射光强 I 就可以得知 I_1 的大小,进而得到 ρ .此时避免了使用衰减组件,并且角度编码器可以得到很高的测角准确度,其测角误差对测量结果的影响也是可以忽略的.在小角度旋转的情况下,待测偏振棱镜出射光强的非线性扰动变化较小,此时非线性扰动对测量准确度的影响较小.

图7为透射光强 I 与入射角 i_0 、旋转角 φ' 的关系曲线.从图7可以看出,当待测棱镜在消光位置附近 $(-2', 2')$ 的范围内转动时,入射角 i_0 对透射光强 I 的影响在很小,在准确度要求范围内,可忽略不计,从而

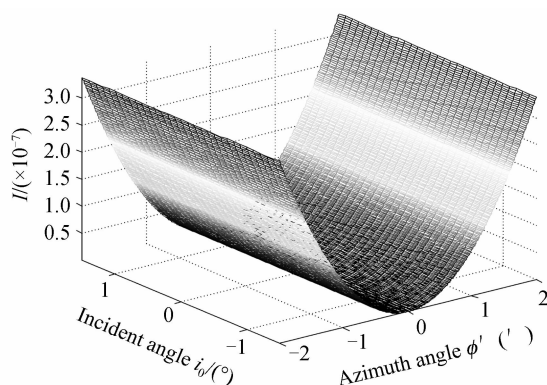


图7 透射光强 I 与入射角 i_0 、旋转角 φ' 的关系曲线
Fig. 7 Relation curve between the extinction rate ρ and the incident angle i_0 , rotation angle φ'

认为消除了消光比与入射角的关系.假设待测棱镜在消光位置附近,两次小角度转动,角度分别为 α, α' ,得到的光强为 I, I' ,可得

$$\begin{cases} I = I_1 \cos^2(90^\circ + \alpha) + I_2 \\ I' = I_1 \cos^2(90^\circ + \alpha') + I_2 \end{cases} \quad (15)$$

解得 $I_1 = \frac{I - I'}{\sin^2 \alpha - \sin^2 \alpha'}$, $I_2 = I - \frac{I - I'}{\sin^2 \alpha - \sin^2 \alpha'} \cdot \sin^2 \alpha$,从而得到偏振棱镜的消光比为

$$\rho = \frac{I' \sin^2 \alpha - I \sin^2 \alpha'}{I - I'} \quad (16)$$

所以通过角度编码器可以得到 α, α' 的值,并可以检测到此时 I, I' 的大小,利用式(16)就可以解算出消光比参量 ρ .

3 实验验证

按照图6 搭建实验平台,选择光源波长为 632.8 nm 的 DD635-10-3 型半导体激光器,输出功率为 10 mW.准直镜组对半导体激光器出射的光进行准直.光学斩波器调制频率为 1.2 kHz,起偏棱镜采用消光比为 $1:10^7$ 的格兰-汤普森棱镜.光信号偏振调制单元

包括调制磁旋光玻璃、调制线圈和振荡信号发生电路、磁屏蔽罩.角度编码器采用海德汉公司的RCN 200内置空心轴承绝对式角度编码器,测量准确度为 $5''$,信号光接收单元主要包括光电倍增管、信号接收及滤波放大电路和A/D相关采样放大电路.根据式(13),使用电机驱动旋转待测棱镜,确定消光位置,为精确测定待测偏振棱镜的消光比,采用多次测量求取平均值的方法

减小误差,即在消光位置附近通过电机多次小角度旋转待测棱镜(每次转动 $20''$ 左右,但具体数值由编码器读出),根据式(15-16)得到平均平行光光强 I_1 和消光光强 I_2 ,将3个偏振棱镜的测量结果与偏振镜生产厂家曲阜师范大学测定的数值进行比较,表1为每个棱镜的消光比测量值和计算平均值.

表1 实验数据表
Table 1 Experiment data

Samples	Manufacturer of measurements	First test	Second test	Third test	Average value
1	1.52×10^{-6}	1.47×10^{-6}	1.56×10^{-6}	1.49×10^{-6}	1.51×10^{-6}
2	6.60×10^{-6}	6.62×10^{-6}	6.67×10^{-6}	6.58×10^{-6}	6.62×10^{-6}
3	4.21×10^{-6}	4.22×10^{-6}	4.18×10^{-6}	4.25×10^{-6}	4.22×10^{-6}

由实验数据可以发现,采用磁光调制和消光位置附近多次小角度光强的方法测量偏振棱镜的消光比时,系统测量准确度可达 10^{-6} ,测量结果说明该测量方法具有很高的准确度与稳定性.

4 结论

理论和实验证明,通过利用磁光调制的方法,能够精确地得到待测偏振棱镜的消光位置,消除定位误差对消光比参量测量的影响.在消光位置附近多次小角度转动,可有效地削弱入射光的非垂直入射对消光比参量的非线性微扰,从而提高棱镜消光比参量的测量准确度,使测量准确度达到 10^{-6} 量级.本方法稳定性高,准确度高.随着偏振器件的应用越来越广泛,本文提出的方法对偏振器件的性能检验和实际应用具有一定的意义.

参考文献

- [1] ZHAO Ting-sheng, LI Guo-hua, PENG Han-dong, *et al.* Modified Glan-Taylor prisms and its characteristics[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, **34**(10): 1383-1387.
赵廷生,李国华,彭捍东,等. 格兰-泰勒棱镜的改进设计及其特性[J]. 中国激光, 2007, **34**(10): 1383-1387.
- [2] HUANG Jian-yu. Measurement of extinction ration of polarizer using interference method of polarization[J]. *Applied Laser*, 1996, **16**(6): 267-268.
黄建余,季家熔. 偏振干涉法用于偏振器消光比的测量[J]. 应用激光, 1996, **16**(6): 267-268.
- [3] DING Peng, CAO Yin-hua, SU Guo-qiang, *et al.* 1 kW high power diode laser with polarization coupled by Gran-Taylor prism[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, **36**(2): 290-293.
丁鹏,曹银花,苏国强,等. 使用格兰-泰勒棱镜偏振耦合的1kW大功率半导体激光器[J]. 中国激光, 2009, **36**(2): 290-293.
- [4] WANG Pu, CHEN Kai-xuan. Analysis of the incident angle's nonlinear disturbing effects on the transmitted light intensity of Glan-Taylor prisms[J]. *Physics Experimentation*, 2009, **29**(10): 42-44.
王璞,陈凯旋. 入射角对格兰-泰勒棱镜透射光强的非线性扰动分析[J]. 物理实验, 2009, **29**(10): 42-44.
- [5] SHI Meng, WU Fu-quan, FAN Ji-yang. Effect of the air gap thickness on the intensity perturbation of transmitted light for the taylor prism [J]. *Optics&Optoelectronic Technology*, 2005, **3**(27): 50-53.
史萌,吴福全,范吉阳. 空气隙厚度对格兰-泰勒棱镜透射光强扰动影响的理论分析[J]. 光学与光电技术, 2005, **3**(27): 50-53.
- [6] KONG Fan-zhen, SONG Lian-ke. Analysis of the effects of incident angle on light transmission of polarizing prisms[J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(1): 126-128.
孔凡震,宋连科. 入射角对偏光棱镜光强透射比的影响分析[J]. 光学技术, 2006, **32**(1): 126-128.
- [7] 物理光学与应用光学(第二版). 石顺祥,王学恩,刘劲松. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008, 8.
- [8] LI Hong-xia, WU Fu-quan, FAN Ji-yang, *et al.* The rotary vibration influence on the transmitted light intensity' s perturbation of the Glan-Taylor prism[J]. *Journal of Qufu Normal University (Natural Science)*, 2003, **29**(2): 59-62.
李红霞,吴福全,范吉阳,等. 旋转振动对格兰-泰勒棱镜透射光强扰动影响的研究[J]. 曲阜师范大学学报(自然科学版), 2003, **29**(2): 59-62.
- [9] ZHU Hua-feng, SONG Lian-ke, PENG Han-dong, *et al.* Distribution of Transmitted Light of a Glan-Taylor Prism[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12): 1881-1884.
朱化凤,宋连科,彭捍东,等. 格兰-泰勒棱镜透射光强分布研究[J]. 光子学报, 2005, **34**(12): 1881-1884.
- [10] ZHU Hua-feng, LI Dai-lin, SONG Lian-ke, *et al.* Precise analysis of formation and suppression of intensity transmittance fluctuations of Glan-Taylor prisms [J]. *Laser&Optoelectronics Progress*, 50, **052302**(2013): 1-10.
朱化凤,李代林,宋连科,等. 格兰-泰勒棱镜光强透射比波动的成因及抑制方法精确分析[J]. 激光与光电子学进展, 50, **052302**(2013): 1-10.
- [11] ZHENG Hong-zhi, MA Cai-wen, WU Yi-ming, *et al.* Temperature adaptability of magneto optic modulation in a disconnect Mechanically azimuth measurement [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5): 638-640.
郑宏志,马彩文,吴易明,等. 无机机械连接方位角测量系统中磁光调制的温度适应性研究[J]. 光子学报, 2004, **33**(5): 638-640.
- [12] WU Yi-ming, GAO Li-min, LI Ming, *et al.* A precision measurement method of glass material inner-stress[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(3): 490-493.
吴易明,高立民,李明,等. 一种玻璃材料内应力精密测定的方法[J]. 光子学报, 2010, **39**(3): 490-493.
- [13] WU Yi-ming, GAO Li-min, CHEN Liang-yi. Precision measurement and transmission of azimuthal information based on polarization modulated light [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(3): 525-529.
吴易明,高立民,陈良益. 基于偏振光的精密角度测量及传递技术[J]. 红外与激光工程, 2008, **37**(3): 525-529.