

文章编号: 0253-2239(2003)12-1456-4

偏光棱镜调制器调制光强扰动的理论分析

李红霞* 吴福全

(曲阜师范大学激光研究所, 曲阜 273165)

范吉阳

(曲阜师范大学物理系, 曲阜 273165)

摘要: 以格兰-泰勒棱镜为例, 根据实验现象对透射光强随旋转角扰动的的原因进行了理论分析。实验中发现, 透射光强曲线随着入射角的微小变化而偏离马吕斯定律, 出现了周期性扰动。通过格兰-泰勒棱镜的单体偏振光束产生的干涉, 再加上晶体-空气隙界面处反射比的因素, 使得出射光强依赖于入射角。引入了扰动因子的概念, 并系统讨论了扰动因子所造成的影响, 从而得出了减小扰动的方法。理论研究结果与实验符合较好。为偏光棱镜的优化设计、生产及使用提供了理论基础。

关键词: 物理光学; 偏光; 偏光棱镜; 光强调制; 扰动现象; 干涉效应

中图分类号: O436 文献标识码: A

1 引 言

高精度干涉测量、光谱精细结构分析以及相干光系统中都涉及到激光的调制问题^[1,2], 偏光棱镜是激光调制和测量中非常重要的无源器件^[3]。格兰-泰勒(Glan-Taylor)棱镜是当前偏光技术采用最普遍的高精度激光偏光镜之一^[4]。它使用冰洲石晶体制成, 由于光学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, 所以格兰-泰勒棱镜的透射比高, 消光比优于 10^{-5} , 使用光谱范围为 $300 \sim 2500 \text{ nm}$ ^[5,6]。它由光轴垂直一直角面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, 且不受棱镜旋转的影响, 这在光路调整技术中是极重要的一个特点, 尤其适合激光应用技术的要求。近年来随着激光应用技术的发展, 该棱镜更显示了其高抗光损伤的优越性。

偏光棱镜的出射光强应为旋转角的光滑余弦函数。然而在实验中发现, 格兰-泰勒棱镜的透射光强随旋转角的变化曲线不是光滑的余弦曲线, 而是出现了周期性的扰动(扰动出现的位置呈周期性)。这些干扰影响了偏振光的质量, 对实际工作有着非常不利的影 响。本文从理论上分析了扰动产生的原因, 并提出了增强出射光质量的有效方法。从而可

以在实际生产和应用棱镜时, 减少或避免上述现象所带来的不利影响。文中的理论分析具有普遍性, 很容易推广到其它各种棱镜, 对高性能光学系统设计及实验中选择匹配棱镜具有重要的指导意义。

2 实验现象

我们采用如图 1 所示的实验装置。实验中使用的 光源是波长为 650 nm 的半导体激光。图中 2 为起偏棱镜, 通过它产生的线偏振光正入射进入待测的格兰-泰勒棱镜(偏光调制棱镜)。格兰-泰勒棱镜放置在由步进电机带动的可以使棱镜绕光线轴连续旋转的支架上, 从而使得两棱镜的晶体光轴夹角可以周期性变化。出射光强由光电探测器测得后输入光信息处理系统,

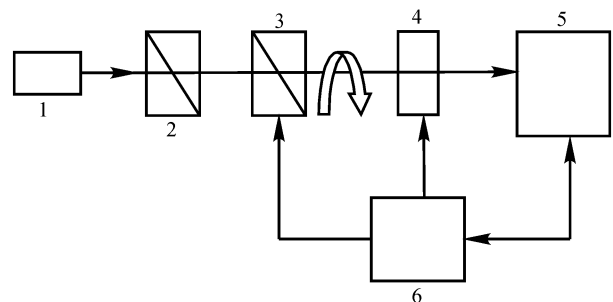


Fig. 1 The experimental setup. 1: Semiconductor laser; 2: polarizer; 3: Glan-Taylor prism; 4: photoelectric detector; 5: optical-information processor; 6: automatic control system

* 现通讯地址: 南京大学物理系, 南京 210093。

E-mail: hongxialijy@eyou.com

收稿日期: 2002-09-19; 收到修改稿日期: 2002-12-02

可在微机上直接显示出透射光强曲线图(图 2)。

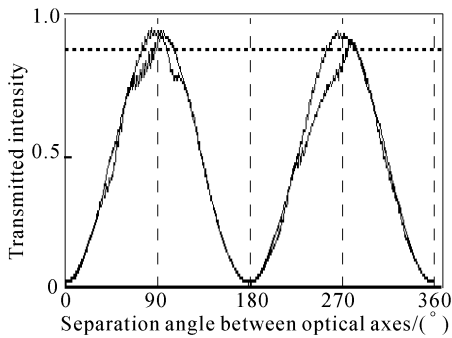


Fig. 2 Curves of transmitted light intensity for two random rotation periods

激光通过起偏镜后,成为强度为 I_0 的线偏振光;然后通过待测格兰-泰勒棱镜时,透射光强按照马吕斯定律变化:

$$I = I_0 \cos^2 \varphi, \quad (1)$$

式中 φ 是待测格兰-泰勒棱镜透射光电矢量的振动方向与入射的线偏振光的振动方向之夹角,即为旋转角。出射光强应为一光滑的余弦曲线。实验中发现曲线大体上是按上述规律变化的,但存在一定的不规则扰动(扰动本身不规则)。这种扰动在起偏镜晶体光轴与调制镜晶体光轴相平行的位置附近最为明显。图 2 中给出了两只样品棱镜旋转一周过程中的透射光强实验曲线(开始旋转时两棱镜晶体光轴夹角为 $\pi/2$, 纵坐标值为相对光强)。

3 理论分析

以上是实验现象,下面对这种不规则扰动产生的原因进行理论上的分析。

格兰-泰勒棱镜为空气隙型胶合棱镜^[3]。单色光进入棱镜的前半部分被分成光 e 和 o 光,但没有分开,当到达晶体-空气界面时, o 光被全反射, e 光透过。因为研究的是透射 e 光的行为,所以在图 3 中只标出了两条 e 光: e_1 和 e_2 。 e 光在通过空气隙时将发生多次反射,其中经两次反射后的出射光束 e_{12} 与直接透射光束 e_{21} 相遇形成干涉。考虑到这种干涉效应以及界面处的反射比^[7],下面计算出射光强的大小,并分析它所依赖的因素。

由折射定理

$$n_e \sin \theta = \sin \alpha, \quad (2)$$

式中 θ 为 e 光在晶体-空气界面上的入射角(当光正入射进入棱镜时, θ 与棱镜的结构角 s 相等), α 为折射角,求出 e_{12} 与 e_{21} 的相位差,得

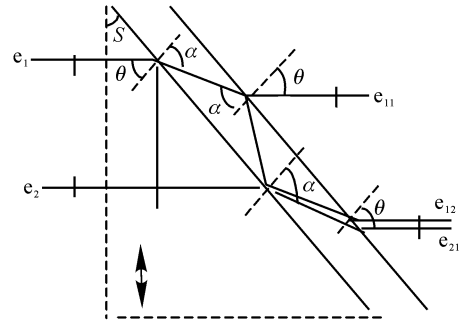


Fig. 3 Extrordinary light's transmission and interference in the air-gap layer

$$\delta = \frac{4\pi h \cos \alpha}{\lambda}, \quad (3)$$

其中 h 为空气隙厚度,且是均匀的。考虑了在两晶体-空气界面处几次反射与透射的结果,相干光束 e_{12} 、 e_{21} 的光强分别为

$$I_1 = I_0 \cos^2 \varphi \times T^2 R^2, \quad (4)$$

$$I_2 = I_0 \cos^2 \varphi \times T^2, \quad (5)$$

其中 T 、 R 分别为 e 光在晶体-空气界面的透射比、反射比,它们分别由下式给出^[6]:

$$T = \frac{\sin 2\theta \sin 2\alpha}{\sin^2(\theta + \alpha) \cos^2(\theta - \alpha)}, \quad (6)$$

$$R = \frac{\tan^2(\theta - \alpha)}{\tan^2(\theta + \alpha)}. \quad (7)$$

e_{12} 与 e_{21} 干涉后的出射光强为

$$I_f = I_0 \cos^2 \varphi \left[\frac{\sin 2\theta \sin 2\alpha}{\sin^2(\theta + \alpha) \cos^2(\theta - \alpha)} \right]^2 \times \left[1 + 2 \frac{\tan^2(\theta - \alpha)}{\tan^2(\theta + \alpha)} \cos \frac{4\pi h \cos \alpha}{\lambda} \right]. \quad (8)$$

由于实验中反射比 R 约为 4% 左右,因而上式已经忽略掉反射比的平方项。将上式右方与 θ 有关的部分用 $f(\theta)$ 表示,它的变化曲线如图 4(a) 所示。由图可见, $f(\theta)$ 为振荡函数,振幅及频率都随入射角的增大而增大,显然这与反射比 R 有关。且将 $f(\theta)$ 称为扰动因子。最后的出射偏振光强可表示为

$$I_f = I_0 \cos^2 \varphi \times f(\theta). \quad (9)$$

若入射角 θ 不变,则出射光强为旋转角 φ 的余弦函数。由于步进电机在转动过程中棱镜会有小的振动,从而致使入射角 θ 在 θ_0 (无扰动时的入射角) 附近作幅度为 $\pm \Delta\theta$ 的变化。从图 4(a) 可见,扰动因子为高频振荡函数,所以入射角的小扰动将引起扰动因子较大的涨落。而考虑扰动后的出射光强则为

$$I_f = I_0 \cos^2 \varphi \times f(\theta_0 + \Delta\theta). \quad (10)$$

又由于 θ 的改变与 φ 无关,所以 $I_0 \cos^2 \varphi$ 越大的地方,

扰动值越大。因而实验曲线中透射光强越大的位置，扰动越明显，从而导致了出射光强在原随 φ 角成余

弦函数变化的基础上，产生一不规则的小的扰动，且呈现出周期性。

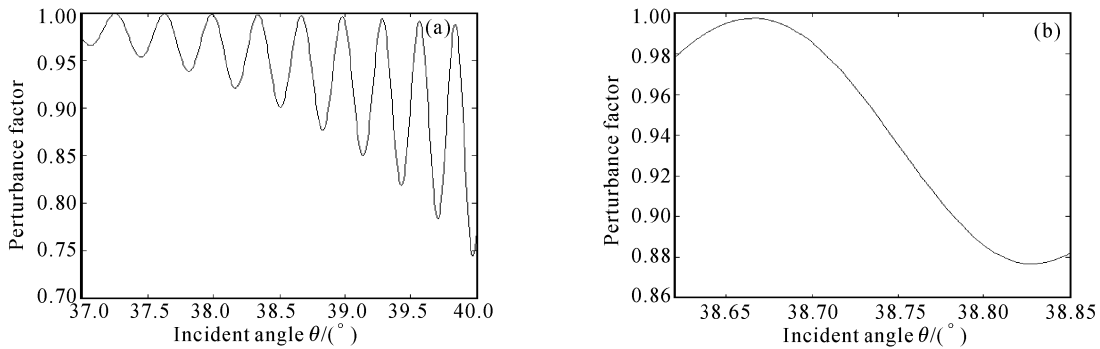


Fig. 4 Perturbance factor as an oscillating function of incident angle with wavelength $\lambda=650$ nm, refractivity $n_o=1.4848$, thickness of air-gap $h=0.02$ mm. (a) Several vibration periods; (b) About half the vibration period

将(2)式以及实验中所取各参量值：光波长 650 nm、角度 θ_0 为 38.77° 、主轴非常光折射率 1.4848、空气隙厚度 0.02 mm 分别代入(8)式，用 Matlab 软件作出格兰-泰勒棱镜的透射光强曲线如图 5 所示(纵坐标值以为单位)。

扰动，用振幅为 0.05° 的随机数发生器产生小的角度扰动加载到恒定值 38.77° 上，作为入射角。作为比较，图 6 给出了实验中实测得到的透射光强曲线图(开始旋转时两棱镜晶体光轴夹角为 $\pi/2$ ，能量为相对单位)。由图中可见，理论很好地解释了实验结果。

其中为了模拟实验中 θ 随电机转动所作的随机

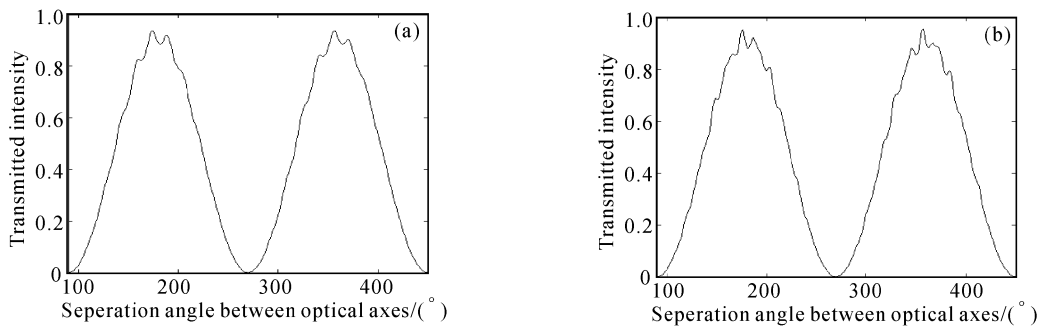


Fig. 5 Curves of transmitted light intensity drawn with software Matlab based on theoretical results for two different periods (a) and (b)

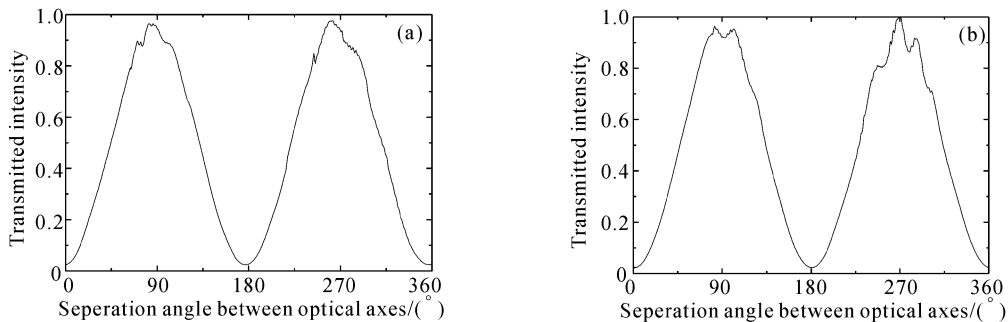


Fig. 6 Experimental curves of transmitted light intensity

结论

1) 由于光的干涉效应，以及晶体-空气界面处光的反射比，导致了格兰-泰勒棱镜的透射光强对入

射角有较为敏锐的依赖关系。实验中棱镜在转动过程中不可避免地会产生微小振动，致使入射角在一定范围内不规则变化，最终引起出射光强的扰动。

2) 由图 4(a)可以看出，扰动因子 $f(\theta)$ 的振幅

和频率都随值 θ 的增大而增大,因此较小的 θ 角可以减弱扰动因子对透射光强扰动的影响。

3) 图 4 (b) 是局部放大了图 4 (a) 中 $38.62^\circ \sim 38.85^\circ$ 大约半个周期内扰动因子的函数曲线,由此可以看出:若 θ 角选在曲线的斜率为 0 处(如 38.67°),再采取一些减小棱镜旋转过程中振动的措施,也会减弱扰动因子对透射光强扰动的影响。

4) 本文讨论的内容对光强的精确余弦调制具有实际指导意义。

参 考 文 献

- 1 Ma Hongliang, Zhang Jing, Li Fengqin *et al.*. Suppression of intensity noise by an opto-electronic feedback Loop with amplitude modulator. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(10):1202~1205 (in Chinese)
- 2 Lu Hongbin, Wang Xiangzhao, Wang Xuefeng *et al.*. Intensity modulation characteristics of optically-injected laser diode. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2002, **A29**(4): 297~300 (in Chinese)
- 3 Driscall W G. *Handbook of Optics*. New York: McGraw-Hill, 1978. 7.15, 10.43~10.45
- 4 Wu Fuquan, Li Guohua, Song Lianke *et al.*. Study of high efficiency laser polarizers. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 1995, **A22**(1):37~39 (in Chinese)
- 5 Li Jizhong, Li Guohua, Li Jing *et al.*. Polarization spectra and dichroic polarizers of some birefringent crystals. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (光谱学与光谱分析), 1994, **14**(5):117~120 (in Chinese)
- 6 Shen Weimin, Shao Zhongxing. Dispersion between ordinary ray and extraordinary ray in uniaxial crystals for any orientation of optical axis. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(6):765~768 (in Chinese)
- 7 Born M, Wolf E. *Principles of Optics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 44

An Analytical Study on Modulated Intensity's Perturbance for the Polarizing Prisms

Li Hongxia Wu Fuquan

(Laser Research Institute, Qufu Normal University, Qufu 273165)

Fan Jiyang

(Physics Department, Qufu Normal University, Qufu 273165)

(Received 19 September 2002; revised 2 December 2002)

Abstract: The analytical study on transmitted intensity's perturbation of the Glan-Taylor prism with varying rotation angle is given. It is found that the variation of the transmitted intensity with the rotation angle deviates from Malus law, exhibiting a cyclic fluctuation with the rotation angle. The occurrence of the disturbance is explained by interference between the monochromatic light passing through the Glan-Taylor prism and the factor of the crystal-air interface transmissivity, which together lead to the relation between the transmitted intensity and the incident angle. The notion of the perturbation factor is introduced, and the influences of the factor discussed systematically. Theoretical results meet well with the experiment. Effective measures for weakening the disturbance are presented. The discussions here supply theoretical basis for the design, production and use of the polarizing prisms.

Key words: physical optics; polarized light; polarizing prisms; intensity modulation; perturbation phenomena; interference effect